



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA CHAPINGO

POSTGRADO EN INGENIERIA AGRÍCOLA

Y USO INTEGRAL DEL AGUA

"Enseñar la explotación de la tierra, no la del hombre "

APLICACIÓN DE CONCENTRADORES SOLARES PARA ILUMINACIÓN NATURAL

TESIS QUE COMO REQUISITO PARCIAL PARA OBTENER EL GRADO DE:

**MAESTRO EN CIENCIAS EN INGENIERIA AGRÍCOLA Y USO INTEGRAL DEL
AGUA**

PRESENTA:

ING. FRANCISCO BETANZOS CASTILLO

DIRECTOR:

DR. EUGENIO ROMANTCHIK KRIUCHKOVA

Chapingo, Estado de México, Julio de 2009



APLICACIÓN DE CONCENTRADORES SOLARES PARA ILUMINACIÓN NATURAL

Tesis realizada por el **Ingeniero Francisco Betanzos Castillo** bajo la dirección del comité asesor indicado, aprobada por el mismo y aceptada como requisito parcial para obtener el grado de:

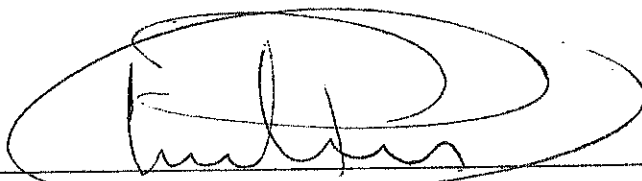
MAESTRO EN INGENIERÍA AGRÍCOLA Y USO INTEGRAL DEL AGUA

DIRECTOR:



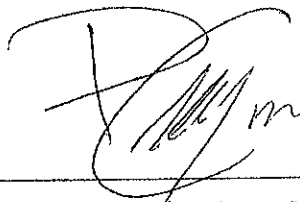
Dr. Eugenio Romantchik Kriuchkova

ASESOR:



Dr. Carlos Alberto Villaseñor Perea

ASESOR:



M.C. Pedro Cruz Meza

DEDICATORIAS

A TODA MI FAMILIA POR SU APOYO INCONDICIONAL DURANTE MI PROCESO DE FORMACIÓN.

A MIS PADRES Y HERMANOS POR SUS INVALUABLES CONSEJOS Y APOYO.

A TODOS LOS HAN SIDO PARTICIPES DE MI FORMACIÓN PROFESIONAL.

GRACIAS.

SINCERAMENTE.

Francisco Betanzos Castillo

AGRADECIMIENTOS

Al Posgrado de Ingeniería Agrícola y Uso Integral del Agua de la Universidad Autónoma Chapingo, por seguir formándome profesionalmente, como persona íntegra, con valores humanos y científicos.

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT), y al Consejo Mexiquense de Ciencia y Tecnología (COMECYT) por su apoyo económico para el desarrollo del presente.

Al Dr. Eugenio Romantchik Kriuchkova, Dr. Carlos Alberto Villaseñor Perea, y, M.C. Pedro Cruz Meza por el apoyo invaluable en el desarrollo del presente trabajo y por sus consejos que me han dado a lo largo de mi formación.

A los Departamentos de Ingeniería Mecánica Agrícola e Ingeniería en Irrigación de la UACH, por su apoyo.

Al Dr. Ramón Arteaga Ramírez por su apoyo y confianza brindada.

DATOS BIOGRÁFICOS

Betanzos Castillo

Francisco



Av. Cristóbal Hidalgo S/N, Col. Las
Rosas, Tejupilco, México.
Calle Libertad # 10, Barrio Las
Flores, Tapanatepec, Oaxaca.

Cel 7221488533

Tel. (994) 7218299

e-mail : fbetanzosc Castillo@gmail.com

Nacionalidad: Mexicana.

Edad: 34 años.

Fecha y Lugar de nacimiento: 10 de Septiembre de 1974, Tapanatepec, Oaxaca.

CURP: BECF740910HOCTSR05

Cartilla del SMN: B-945368

Educación

- Licenciatura en *Ingeniería Mecánica Agrícola*. Departamento de Ingeniería Mecánica Agrícola (DIMA), UNIVERSIDAD AUTÓNOMA CHAPINGO, km. 38,5 Carretera México - Texcoco, Chapingo, Estado de México. Cedula profesional: **5174610**.

Título: INGENIERO MECÁNICO AGRÍCOLA (1994-1999)

- **Maestría en Ciencias en Ingeniería Agrícola y Uso Integral del Agua (IAUIA), con orientación en Mecánica.** UNIVERSIDAD AUTÓNOMA CHAPINGO km. 38,5 Carretera México - Texcoco, Chapingo, Estado de México. (2006- 2009).
- Estancia de Investigación en el **Centro de Investigación en Mecatrónica Automotriz (CIMA)**, INSTITUTO TECNOLÓGICO DE ESTUDIOS SUPERIORES DE MONTERREY (ITESM), Campus Toluca. Enero-Mayo 2008.

Experiencia profesional

- Subdirector e Instructor del Centro Educativo de Vehículos Automotores (CEDVA GUADALAJARA), Guadalajara, Jalisco. Mayo del 2000 – Abril del 2001
- Profesor Tiempo Completo de la Carreras de Mecánica, Tecnología de alimentos y Mecatrónica, Universidad Tecnológica del Sur del Estado de México. Tejupilco, Estado de México. Enero del 2002 – Julio de 2006

APLICACIÓN DE CONCENTRADORES SOLARES PARA ILUMINACIÓN NATURAL

Francisco Betanzos Castillo¹
Eugenio Romantchik Kriuchkova²

RESUMEN

El presente trabajo trata sobre el diseño y evaluación de un sistema concentrador-luminoducto para iluminación natural. Se diseñó un concentrador con perfil troncocónico para captar, transferir y difundir luz solar, esta fue concentrada y transportada mediante reflexión a lo largo de las paredes del sistema y finalmente proyectada al interior de una construcción agropecuaria. Se comparó la iluminancia lograda por el sistema con y sin concentración encontrándose una diferencia significativa en los niveles de iluminación.

El concentrador obtuvo factores de concentración entre 1.7 y 3.6. Los aspectos críticos que determinaron la concentración de luz natural fueron el ángulo de aceptación (45.68°), la orientación (45° y 90°) y la reflectancia del material utilizado (95%), además, se logró reducir las dimensiones que ocupan estos sistemas, conservando la iluminancia. Se probó que este sistema aumentó la iluminación del espacio interior en donde la luz no llegaba de forma natural, mejorando los niveles de iluminancia (300-500 lx), según CIE (Commission Internationale l'Eclairage).

Se demostró que el sistema representa una solución viable y adaptable para iluminar construcciones naturalmente.

Palabras clave: Energía solar, Iluminancia, Iluminación natural.

¹ Autor de tesis

² Director de tesis

APPLICATION OF SOLAR CONCENTRATORS FOR NATURAL ILLUMINATION

Francisco Betanzos Castillo¹
Eugenio Romantchik Kriuchkova²

ABSTRACT

This work deals with the design and evaluation of a light pipes-concentrator system for natural illumination. A concentrator in the shape of a truncated cone profile was designed to catch, transfer and spread solar light. This was concentrated and transported by means of reflection throughout the walls of the system and finally projected to the interior of a farming construction. The illuminance obtained by the system with and without concentration was compared, with a significant difference being found in the illumination levels.

The concentrator obtained concentration factors between 1.7 and 3.6. The critical aspects that determined the concentration of natural light were the angle of acceptance (45.68°), the direction (45° and 90°) and the reflectance of the material used (95%). In addition, it was possible to reduce the space taken up by these systems, conserving the illuminance. It was proved that this system increased the illumination of the interior space where the light did not reach in a natural way, improving the illuminance levels (300-500 lx), according to CIE (Commission Internationale l'Eclairage).

It was demonstrated that the system represents a viable and adaptable solution to illuminate constructions naturally.

Key words: Solar energy, Illuminance, Natural illumination.

¹ Thesis author

² Thesis director

ÍNDICE

DEDICATORIAS.....	iii
AGRADECIMIENTOS	iv
DATOS BIOGRÁFICOS	v
LISTA DE FIGURAS	xii
CAPÍTULO I. INTRODUCCIÓN.....	1
1.1 Introducción	1
1.2 ¿Por qué utilizar luz natural?	3
1.3 Ventajas de la luz de día.....	3
1.4 Salud y bienestar	4
1.5 Iluminación natural en instalaciones agropecuarias	4
1.6 Sistemas innovativos de iluminación natural	6
1.7 Objetivos.....	7
1.7.1 General	7
1.7.2 Específicos.....	7
1.8 Hipótesis.....	8
1.9 Desarrollo de la investigación	8
CAPÍTULO II. REVISIÓN DE LITERATURA.....	9
2.1 Luz e iluminación	9
2.2 Sistemas de transporte de luz	11
2.2.1 Sistemas conductores de luz.....	11
2.2.2 Sistemas transportadores de luz.....	11
2.3 Comparación de sistemas los sistemas transportadores.....	17

2.4 Métodos predictivos del transporte de luz	20
2.5 Concentradores solares	25
2.6 Diseño de concentradores solares. Método secuencial y Principio del rayo-límite.....	29
2.7 Geometría óptica.....	32
2.8 Resumen.....	34
CAPITULO III. DISEÑO Y CÁLCULO DEL CONCENTRADOR	37
3.1 Definiciones y teoría.....	37
3.2 Concentrador solar cónico	40
3.3 Diseño del concentrador	43
3.3.1 Metodología de diseño	43
3.3.2 Cálculo de aceptación máxima ($\theta_{\max}$)	48
3.3.3 Cálculo de la concentración geométrica (C_{geo})	49
3.3.4 Cálculo de la étendue	49
3.3.5 Cálculo de la concentración óptica (C_{opt})	49
3.3.6 Cálculo del concentrador ideal $R\phi$	50
3.3.7 Calculo de horas de captación del concentrador	51
CAPÍTULO V. MATERIALES Y MÉTODOS.....	53
5.1 Antecedentes	53
5.2 Descripción de la metodología.....	53
5.3 Diseño del Concentrador	54
5.4 Sistemas de prueba	55
5.5 Pruebas modelo real.....	58

5.6 Análisis de resultados de la experimentación del modelo real	59
5.7 Materiales.....	59
5.7.1 Sensores de luz.....	60
5.7.2 Datos técnicos de los sensores de luz	61
CAPÍTULO VI. RESULTADOS.....	62
6.1 Dimensiones del concentrador.....	62
6.2 Mediciones de iluminancia del concentrador.....	65
6.3 Iluminación de una bodega agropecuaria	69
6.4 Comportamiento del sistema con concentración y sin concentración configuración 1.....	72
6.5 Rendimiento del sistema con concentración y sin concentración configuración 2.....	75
6.6 Rendimiento del sistema con concentración y sin concentración configuración 3.....	77
6.7 Parámetros calculados y medidos durante el experimento.....	79
6.8 Costos y rentabilidad	80
CONCLUSIONES	81
LITERATURA CITADA	84
ANEXOS.....	89
Anexo 1. Cantidades fotométricas, unidades y estándares. Símbolos, nombres y unidades.....	89
Anexo 2. Tabla 19. Resumen de ecuaciones para diseño de un CPC	100
Anexo 3. Tablas de Sistemas de Luz	101

LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Consideraciones ambientales específicas de iluminación*	6
Tabla 2. Magnitudes fotométricas	10
Tabla 3. Valores de cálculo para la concentración geométrica del prototipo	49
Tabla 4. Valores de cálculo de la concentración óptica del prototipo	49
Tabla 5. Dimensiones del concentrador ideal	50
Tabla 6. Número de horas de captación de luz natural durante el año	52
Tabla 7. Parámetros de diseño del concentrador ideal	62
Tabla 8. Factores de concentración para concentradores con ángulos de aceptación entre 15° y 90°	63
Tabla 9. Resumen de parámetros calculados y medidos durante el experimento	79
Tabla 10. Costo de producción estimada	80
Tabla 11. Análisis de consumo de energía eléctrica para la bodega agropecuaria	80
Tabla 12. Unidades y cantidades fotométricas	89
Tabla 13. Factores de conversión para el lux, el pie-candela y el fotón	92
Tabla 14. Factores de conversión utilizados en cantidades de exitancia luminosa	93
Tabla 15. Factores de conversión comúnmente utilizadas para las unidades de luminancia	94
Tabla 16. Niveles de iluminancia en la superficie de la tierra debido al sol	96
Tabla 17. Iluminancia natural	97
Tabla 18. Valores aproximados de luminancia del cielo cercano al horizonte bajo diferentes condiciones	97
Tabla 19. Resumen de ecuaciones para diseño de un CPC	100
Tabla 20. Sistemas con pantallas (luz difusa)	101

Tabla 21. Sistemas con pantalla (luz directa)	102
Tabla 22. Sistemas conductores de luz difusa (sin pantalla)	103
Tabla 23. Sistemas conductores de luz directa, sistemas difusores de luz (sin pantalla).....	104
Tabla 24. Sistemas de transporte de luz (sin pantalla)	105

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Porción del espectro electromagnético que al incidir en el ojo humano provoca las sensaciones de claridad y color.	9
Figura 2. Curvas de sensibilidad espectral para (a) el observador CIE en condiciones fotópicas (b) el observador CIE en condiciones escotópicas (CIE, 1970, 1978).	10
Figura 3. Sistemas de iluminación natural.	12
Figura 4. Métodos para la transmisión de rayos solares. A) Lentes, B) Tubos huecos con prismas, D) vigas de luz, D) Tubos de luz con espejos (MLP), E) Fibras ópticas. (Hansen, 2006).	13
Figura 5. Sutton Sport Arena-South London, (Technical Committee 3-38, 2006)	14
Figura 6. Domo tipo diamante.....	15
Figura 7. A la izquierda: tubo colector de sol Monodraught (Monodraught, 2005). Al centro: paneles cortados con láser Skytube (Skydome, 2005). A la derecha: domo prismático Solatube (Solatube, 2005.a).	15
Figura 8. Luminoductos: a. con emisores mecánicos para ventilación, b. con ventilación pasiva (www.solatube.com.au/homeowner/solarstar.php , 2009)	16
Figura 9. Ejemplo del empleo del LUXPLOT para determinar la iluminación de un luminoducto para una cuarto de 4 x 4 m.	20
Figura 10. Curvas de comparación en la medición de luz por los métodos de Carter, Jenkins y Munner y Zhang y Munner.....	24
Figura 11. Modelo de un concentrador solar 2D , $\theta_{\max}$ es el máximo ángulo de aceptación.	26
Figura 12. Concentrador con absorbedor plano. Todos los rayos incidentes con $\theta_{\max}$ chocan y/o convergen en el punto p de la abertura de salida.	30

Figura 13. Método secuencial para la construcción de un concentrador ideal. El anillo del final de la secuencia es libre de moverse a lo largo de la barra AC.	31
Figura 14. (Concentrador típico). Configuración típica de concentradores solares. La luz inciden en el área de entrada A_1 con $\pm\theta_1$ y área de salida A_2 con $\pm\theta_2$	33
Figura 15. Parábola base	37
Figura 16. Parámetros del concentrador	38
Figura 17. Contorno del perfil base concentrador	39
Figura 18. Sección transversal de un concentrador cónico. Algunos de los rayos incidentes con $\theta_{\max}$ son regresados en lugar de salir por la abertura de salida.	40
Figura 19. Perfil de un concentrador cónico	42
Figura 20. Angulo solar del rayo extremo saliente (α_s) del concentrador cónico por la apertura de salida.	42
Figura 21. Reflexión de un rayo sobre una superficie en coordenadas polares.	44
Figura 22. Parametros de diseño del concentrador para $\phi > \pi/2 - \theta_s$.	44
Figura 23. Parametros de diseño del concentrador para $\phi \leq \pi/2 - \theta_s$.	45
Figura 24. Ángulo de aceptación máximo	48
Figura 25. Concentrador, Luminoducto y sensores de luz (configuración 0)	55
Figura 26. Prototipos: Concentradores Solares.	56
Figura 27. Configuración 1: Luminoducto con concentrador y sin concentrador. Longitud de 280 mm y 101.6 mm de diámetro.	56
Figura 28. Configuración 2: 2 Luminoductos con concentrador y sin concentrador. Longitud de 560 mm y 101.6 mm de diámetro.	57

Figura 29. Configuración 3: 2 Luminoducto con concentrador y sin concentrador con inclinación del sistema 45°. Longitud de 280 mm y 101.6 mm de diámetro por cada luminoducto.	57
Figura 30. Instalación del sistema en la bodega.	58
Figura 31. Instrumentación y Metrología utilizada en la presente investigación.	60
Figura 32. Concentrador 2D. Concentrador ideal (izquierda), concentrador prototipo (derecha).	64
Figura 33. Trayectorias de los rayos según ángulo de entrada, θ_e	65
Figura 34. Iluminancia incidente sobre el sistema de transporte de luz natural bajo condiciones de cielo abierto.	66
Figura 35. Iluminancias para $C_{m\acute{a}x} = 3.2$	66
Figura 36. Nivel de iluminancia máxima a la altura del plano de trabajo a 0.82 m. (Jun. 17, 13:32h).	67
Figura 37. Nivel de iluminancia promedio a la altura del plano de trabajo 0.82 m. (Jun. 17).	68
Figura 38. Iluminación de una bodega agropecuaria	70
Figura 39. Niveles de iluminancia del sistema	71
Figura 40. Nivel de iluminancia real del sistema	72
Figura 41. Iluminancia promedio sobre el plano de trabajo del sistema	73
Figura 42. Iluminancia promedio sobre el plano de trabajo del sistema	73
Figura 43. Iluminancia promedio sobre el plano de trabajo del sistema	75
Figura 44. Iluminancia promedio sobre el plano de trabajo del sistema	76
Figura 45. Iluminancia promedio sobre el plano de trabajo del sistema	77
Figura 46. Iluminancia promedio sobre el plano de trabajo del sistema	78
Figura 47. Representación esquemática de varias unidades fotométricas (cortesía de la oficina nacional de estándares)	91

Figura 48. Radiancia espectral E_{λ} del sol promediada en la distancia de la tierra al sol. Las áreas sombreadas indican la absorción a nivel del mar debido a los componentes de la atmósfera.....	95
Figura 49. Distribución espectral de la luz del cielo en un día claro. La curva a línea discontinua muestra la distribución espectral de la radiación de un cuerpo negro a 25,000°K.....	99

CAPÍTULO I. INTRODUCCIÓN

1.1 Introducción

La mayoría de las actividades humanas y biológicas sobre la tierra están gobernadas y potenciadas por el sol, ya que éste ha constituido un recurso de iluminación a lo largo de la historia del ser humano. El desarrollo y uso de luces artificiales eficientes, ha llevado al humano a separarse de lo saludable y del mejor recurso de iluminación: luz natural. Estudios han demostrado los beneficios en salud, seguridad y productividad laboral cuando las construcciones son iluminadas naturalmente (Roche, 2000). Además de la calidad de la luz natural, otras de las razones del porqué usarla es su compatibilidad con sistemas de control de iluminación para lograr una reducción del uso y costo de energías convencionales, logrando así un sistema sostenible.

Para transportar luz natural del exterior al interior de un espacio físico, se están empleando luminoductos que son estructuras simples que permiten transmitir la luz natural, en la actualidad hay un incremento considerable en uso de esta tecnología. CIBSE (The Chartered Institution of Building Services Engineers), (2003), declara una estimación de tres millones de ductos instalados en todo el mundo. Generalmente consisten de un colector (usualmente domo hemisférico de policarbonato), el conducto en sí mismo y un emisor. El diseño de luminoductos tiene diferentes geometrías y constantemente se realizan mejoras y actualizaciones (Carter, 2002; Jenkins y Muneer, 2003 y 2004), emplean ductos recubiertos de aluminio (96 % de reflexión), en tal grado, la luz es transmitida de forma especular (transparente), existen películas reflectivas desarrolladas por 3M con un grado de reflexión entre 98 y 99%, con lo que la luz es totalmente transmitida hacia el interior. Cada innovación hecha a los luminoductos incrementa su eficiencia, pero es importante verificar la fiabilidad de esta eficacia y su aplicación tecnológica pertinente, de aquí la

importancia de corroborar y generar metodologías para cuantificar los niveles de iluminación logrados (Mohammed y Carter, 2006).

El presente trabajo trata sobre el diseño y caracterización de un sistema de transporte de luz natural (Acoplamiento de un Concentrador Solar a un Luminoducto) para predecir los niveles de iluminación logrados al transmitir luz natural del exterior al interior, en general para instalaciones agropecuarias de acuerdo a iluminancia requerida por sus ocupantes.

Los concentradores solares se han utilizado con la finalidad de producción de calor y para mejorar la eficiencia de celdas solares, pero no han sido empleados para la colección, concentración y transporte de luz, con fines de iluminación natural. Existen trabajos sobre el acoplamiento de concentradores con fibras ópticas, pero presenta desventajas debido a su alto costo y al bajo rendimiento en el transporte de la luz. Por otro lado comercialmente y físicamente los luminoductos son de dimensiones considerables que difícilmente pueden ser adaptados a pequeños espacios y a cambios de sección. Entonces, el presente trabajo aborda este problema bajo la hipótesis de que emplear concentradores solares puede reducir las dimensiones, los costos y el espacio utilizado por un sistema de transporte de luz dentro de una instalación, de tal forma se transporte la misma cantidad de iluminancia.

Se diseñó un concentrador solar con perfil troncocónico bajo la teoría de la óptica no formadora de imagen para la colección, concentración y transporte de luz. Se construyó un prototipo para mediciones experimentales y caso de estudio considerando la geometría, longitudes y niveles de iluminancia logrados para cada caso. Finalmente, se concluye que es factible emplear concentradores solares para incrementar la iluminancia y disminuir las dimensiones del sistema de transporte de luz con lo cual se logró una reducción de costos del empleo de energías tradicional y dar énfasis al desarrollo y empleo de edificios verdes, como una alternativa y una mejor solución para el ahorro de energía en instalaciones agropecuarias.

1.2 ¿Por qué utilizar luz natural?

Callow (2003), puntualizó acerca de los beneficios del uso de luz natural tanto para la salud del ser humano y del mundo, así como la reducción en el uso de combustibles fósiles y gases de efecto invernadero.

Goulding y et. al. (1994), focalizan su atención sobre los costos asociados al uso iluminación natural al interior de edificios, así como el hecho de incrementar su uso. Estas son: Calidad de la luz natural, es decir, su variabilidad y composición espectral da una mejor iluminación ambiental con respecto a la luz eléctrica. El ojo humano tiene una respuesta al estímulo de la luz natural cosa que no consigue con la eléctrica.

La luz natural tiene beneficios psicológicos y fisiológicos ya que mejora el rendimiento de los seres vivos, que no se logra con ventanas y la luz eléctrica.

- Reducción del uso de combustibles fósiles y emisión de gases efecto invernadero
- Reducción de costos relacionados a la luz eléctrica.
- Emplear de energías limpias renovables.

1.3 Ventajas de la luz de día

Cuentas más bajas de electricidad y condiciones de trabajo más sanas podían ser alcanzadas haciendo un mejor uso de la luz del día. “Estudios numerosos demuestran que viviendo y trabajando por largos periodos en las áreas que reciben niveles bajos de la luz de día trastorna un número de ciclos biológicos”¹. La luz del día entra ampliamente en la categoría de rendimiento energético, pues no genera energía, pero reduce la demanda para ella. La cantidad de demanda energética generada por el uso de luces eléctricas es considerable y da la posibilidad de ahorros significativos por luz del día. La demanda máxima para la iluminación eléctrica ocurre al mismo tiempo que poca disponibilidad de

¹ www.newscientist.com, 2008

la luz natural. En un edificio de oficinas con luces artificiales encendidas, genera un considerable porcentaje del calor que requiere ser removidos y los ahorros totales con luz del día son significativos (Bodart y De Herde, 2002).

1.4 Salud y bienestar

La luz del día permite que la gente esté bien y sienta una cierta conexión con su ambiente (Boyce y Cuttle, 1998) y cuando se les permite expresar una preferencia, las personas eligen luz natural sobre luz artificial. Los estudios de largo plazo han encontrado que la gente prefiere los niveles de variación de luz proporcionados por un ciclo de la luz del día a los niveles ligeros constantes proporcionados por las luces artificiales (Begemann y et. al. 1997).

El mismo estudio demostró que la gente eligió niveles superiores de luz natural que corresponden a los niveles de luz en los cuales el estímulo biológico ocurre. El trabajo concluyó que una amplia gama de los problemas de salud pudo ser debido a la carencia del acceso a la luz natural a través del día.

El desorden afectivo estacional (SAD) es un desequilibrio bioquímico bien estudiado “resultado de niveles bajos de la luz natural en la estación del invierno, para la cual el remedio es exposición a los niveles de iluminación de 2500 lux o más”². La mayor exposición a la luz natural disminuye los efectos de este desorden, así dando una razón no visual, es decir, biológica de la luz del día.

1.5 Iluminación natural en instalaciones agropecuarias

Una instalación para animales debe facilitar la investigación mediante la disminución de variables experimentales imprevistas, mientras provee todos los requerimientos fisiológico, sociales y de comportamiento del animal. Proyectos de investigación diferentes, y/o especies diferentes de animales, requieren a

² www.sada.org.uk, 2008

menudo ambientes e instalaciones distintos. Por lo tanto, es muy importante hacer todo lo posible para asegurarse que las nuevas instalaciones sean programadas, diseñadas y construidas en función del tamaño y de la extensión para el uso animal del momento, pero con la polivalencia suficiente para satisfacer futuras necesidades.

Existen varias alternativas en la manera de concebir el diseño, que permitan lograr cualquier exigencia funcional. Otras referencias y asistencia técnica pueden ser obtenidas del Consejo Canadiense de Protección de los Animales (CCPA).

Se debe considerar los siguientes aspectos:

Ubicación, Servicios mecánicos, Diseño, Ambiente y Control del ambiente (Temperatura, Humedad, Ventilación e Iluminación).

Las tres características de iluminación que pueden influir sobre las plantas y los animales son la intensidad, la calidad, y el fotoperiodo. La iluminación debe proveer una buena visibilidad y una luz uniforme y sin reflejos. El nivel recomendado de 323 lux (30 pc) aproximadamente a 1m del piso fue juzgado suficiente para el desempeño de tareas de rutina con los animales.

La intensidad luminosa experimentada por animales alojados cerca de la fuente puede diferir notablemente con la que experimentan otros más alejados, porque la intensidad es inversamente proporcional al cuadrado de la distancia de la fuente luminosa.

Existen pocos estudios sobre el efecto de la calidad de la luz o del espectro luminoso sobre animales. Se ha constatado que la iluminación en las salas donde se alojan animales deberían tener en la medida de lo posible las características de la luz solar.

El fotoperiodo es probablemente la característica de la luz que influye más a los animales. Tiene una influencia sobre los ritmos circadianos encontrados en los

aspectos bioquímicos, fisiológicos, y de comportamiento en los modelos animales estimulados y sincronizados mediante la vía neuroendocrina. El ciclo circadiano puede afectar la respuesta del animal a drogas o su resistencia a organismos infecciosos inoculados (McSheehy, 1983). La relación luz/oscuridad puede afectar el desempeño reproductivo y la madurez sexual. Se cree que si un cambio ocurre en el fotoperiodo de un animal, no se deben ejecutar experiencias con él durante por lo menos una semana (Davis, 1978). Si el período de luz está interrumpido por la oscuridad, hay pocos efectos importantes; por lo contrario, si ocurre el revés, los ritmos endógenos pueden ser significativamente afectados.

Tabla 1. Consideraciones ambientales específicas de iluminación *

Especie	Iluminancia [Lx]
Ganado bovino	215 - 538
Carneros	538
Cerdos	500-1000
Caballos	200-800
Aves de corral	10-35

*Fuente: Consejo Canadiense de Protección de los Animales (CCPA).

1.6 Sistemas innovativos de iluminación natural

Existen dos grupos de dispositivos de iluminación natural: sistemas conductores de luz y sistemas transportadores de luz.

Los sistemas conductores envían la luz directa y difusa del sol al interior de un edificio sin efectos secundarios de sobrecalentamiento y deslumbramiento. Estos sistemas pueden ser agrupados en: verticales (paneles laser y paneles prismáticos), horizontales (estantes de luz) y colectores parabólicos. La mayoría de los sistemas colectores de luz mejoran los niveles de iluminación al interior de una habitación, sin embargo estos sistemas son incapaces de iluminar las

zonas más alejadas, por lo tanto otros sistemas de iluminación natural son requeridos.

Los sistemas de transporte de luz colectan y transportan la luz del sol a grandes distancias dentro del interior de los edificios, usualmente son referenciados como tubos de luz o guías de luz. Los sistemas de transporte generalmente tienen tres elementos: 1) Un colector, que guía o redirecciona la luz al interior del tubo, 2) el tubo que transporta la luz, con lo que el método de transporte depende del material seleccionado (lentes, tubos de luz con espejos, tubos prismáticos y sistemas sólidos); y 3) un sistema de distribución que incluye dispositivos de extracción y difusión que esparcen la luz uniformemente a través del espacio a iluminar. Los sistemas de iluminación natural más eficientes y con mayor disponibilidad de luz natural requieren de complicados sistemas seguidores de sol y sistemas colimadores de luz antes del colector.

Sistemas pasivos de transporte de luz natural son baratos y de diseños no tan complejos. Entonces el acoplamiento un concentrador solar con luminoductos (tubo de luz), es la idea central de la presente investigación, el objetivo primordial es mejorar y encontrar una solución alternativa para iluminación natural, apoyándonos en modelos teóricos, mediciones experimentales y caso de estudio.

1.7 Objetivos

1.7.1 General

Aplicar la tecnología de concentración solar a un sistema de transporte de luz natural para iluminación.

1.7.2 Específicos

Diseñar un concentrador solar para aplicaciones en sistemas de iluminación natural.

Medir y caracterizar el comportamiento del sistema concentrador-luminoducto para transportar luz natural para aprovechamiento en instalaciones agropecuarias.

1.8 Hipótesis

Usar concentradores solares combinados con luminoductos aumenta los niveles de iluminancia 15%.

1.9 Desarrollo de la investigación

El objetivo esencial de esta investigación es la evaluación del funcionamiento ambiental del uso de luminoductos y concentradores solares mediante pruebas en prototipos y análisis matemático. Esta investigación posibilita el uso de la tecnología de luminoductos y concentradores solares en la iluminación natural de instalaciones. Más allá del alcance de este proyecto de investigación existen otros aspectos que son requeridos como: la relación costo-beneficio, que puede ser incorporada al diseño e implementada en la construcción de instalaciones.

Los modelos a escala son utilizados porque la luz no requiere ninguna corrección por escalamiento (i.e. como la longitud de la luz visible es la misma, el comportamiento es el mismo, tanto, en un modelo a escala como en uno de tamaño real). El funcionamiento del prototipo y los niveles de iluminancia fueron monitoreados y registrados para su análisis cuantitativo bajo condiciones naturales de cielo abierto.

CAPÍTULO II. REVISIÓN DE LITERATURA

2.1 Luz e iluminación

La **luz** (del latín *lux*, *lucis*) es una onda electromagnética capaz de ser percibida por el ojo humano y cuya frecuencia determina su color.

La luz corresponde a la pequeña parte del espectro electromagnético comprendido entre las longitudes de onda de 380 nm (nm: nanómetros; $1\text{nm}=10^{-9}\text{ m}$) y 760 nm, aproximadamente cuya energía es absorbida por los fotorreceptores del sistema visual humano, iniciando así el proceso de la visión (Figura 1).

Debido a las diferencias individuales, y al a dependencia de esta curva de sensibilidad espectral de las condiciones experimentales, y en especial del nivel de iluminación, ha sido necesario lograr acuerdos internacionales, los que han sido regidos por la Comisión Internacional de la Iluminación (CIE), (CIE, 1993).

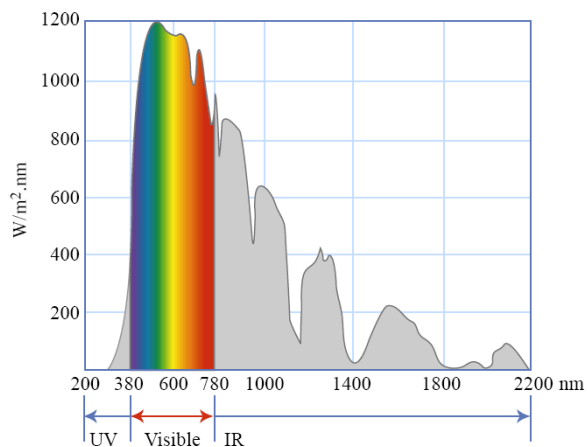


Figura 1. Porción del espectro electromagnético que al incidir en el ojo humano provoca las sensaciones de claridad y color.

Las fuentes luminosas emiten luz en forma de ondas electromagnéticas. Esta radiación se cuantifica con la ayuda de las **magnitudes radiométricas**. Si

interesa cuantificar solamente la radiación a la que es sensible el ojo humano estas magnitudes radiométricas se transforman en **magnitudes fotométricas**. (Ver detalles en anexo 1).

En la figura 2 se muestra curvas dos curvas de sensibilidad espectral, que van directamente relacionadas con los dos sistemas fotoreceptores del sistema visual humano, el de los conos, que opera en condiciones fotópicas (555 nm), y el de los bastones, que opera en condiciones escotópicas (507 nm).

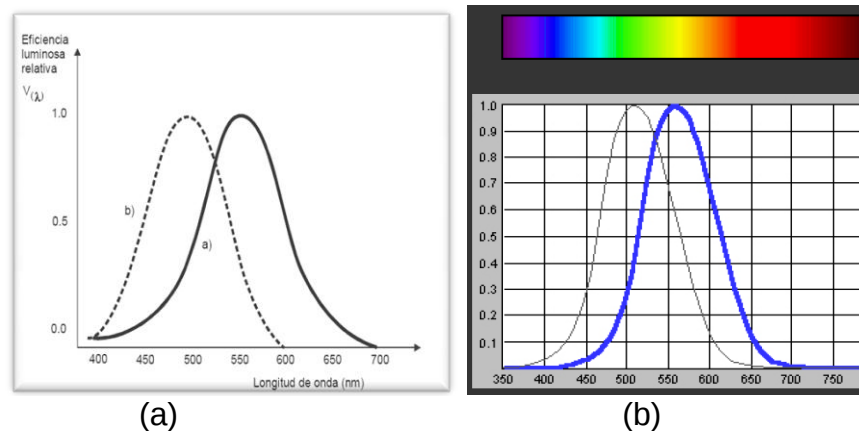


Figura 2. Curvas de sensibilidad espectral para (a) el observador CIE en condiciones fotópicas (b) el observador CIE en condiciones escotópicas (CIE, 1970, 1978).

En la tabla 2 se resumen las definiciones de las magnitudes fotométricas.

Tabla 2. Magnitudes fotométricas

Magnitud fotométrica	Definición	Unidades
<i>Flujo luminoso</i> : cantidad de flujo radiante que produce sensación visual	$\Phi_{lum} = K_m \int_{380}^{760} V_{\lambda} \Phi_{rad} d\lambda$	Lumen (lm)
<i>Intensidad luminosa</i> : flujo luminoso emitido en un pequeño cono que contiene una dirección dada dividido por el ángulo sólido del cono	$I_{lum} = \frac{d\Phi_{lum}}{d\omega}$	Candela(cd)
<i>Iluminancia</i> : Flujo Luminoso sobre una determinada área	$E_{lum} = \frac{d\Phi_{lum}}{dS}$	Lux (lumen.m ⁻²)
<i>Luminancia</i> : flujo luminoso emitido en una dirección dividido por el producto del área proyectada de una fuente puntual	$L_{lum} = \frac{d\Phi_{lum}}{d\omega dS \cos \alpha}$	cd.m ⁻²

Fuente: Electro-optics handbook, 1980. (Para detalles ver anexo 1)

2.2 Sistemas de transporte de luz

Básicamente existen dos grandes grupos de dispositivos innovativos para transportar luz natural: Sistemas conductores de Luz y Sistemas transportadores de luz.

El tema central de este capítulo es hacer una revisión de las tecnologías disponibles para transportar luz, y evaluar los factores críticos del transporte y definir los beneficios y limitantes del sistema pasivo propuesto como solución en esta investigación.

2.2.1 Sistemas conductores de luz

Estos envían la luz solar (directa y difusa) al interior de los espacios sin efectos secundarios de deslumbramiento y sobrecalentamiento. Existen diferentes sistemas pero todos tienen el mismo principio de funcionamiento, posición en los edificios o los medios para direccionar la luz. Estos se pueden agrupar de distintas formas, ver anexo 2.

2.2.2 Sistemas transportadores de luz

Son empleados para distancias mayores a 10 m desde las ventanas, y consiguen introducir y mejorar la iluminación natural. Estos son capaces de encanalar la luz del sol hacia áreas remotas de los edificios donde los niveles de iluminación no son adecuados. Estos sistemas tienen tres elementos: 1) Colección, 2) Transporte y 3) distribución (extracción y emisión) (Ayers y Carter, 1995; Carter, 2001; Jenkins y Muneer, 2003).

Una variedad de sistemas de transporte han sido investigados, construidos y probados por reconocidos investigadores y estos estudios han mostrado los beneficios de su uso (Tsangrassoulis y et. al. 2005; Rosemann y Kaase, 2005;

Canziani y et. al. 2004; Aizenberg, 2000; Carter, 2001; Jenkins y Muneer, 2003; Shao y et. al. 1998).

En el capítulo 1 se explicaron los beneficios de emplear los luminoductos, adicionalmente podemos incluir: la posibilidad de centralizar el sistema de iluminación de los edificios con luz natural y artificial, disminuyendo las horas de consumo eléctrico; la eliminación o reducción de radiación infrarroja y ultravioleta del sol, aunque adicionalmente se requieren estudios para cuantificar esta reducción, particularmente para radiación ultravioleta; economías de escala con grandes recursos de luz; remoción de cableado y conexiones eléctricas; reducción de calor y áreas de aire acondicionado (ver figura 3).

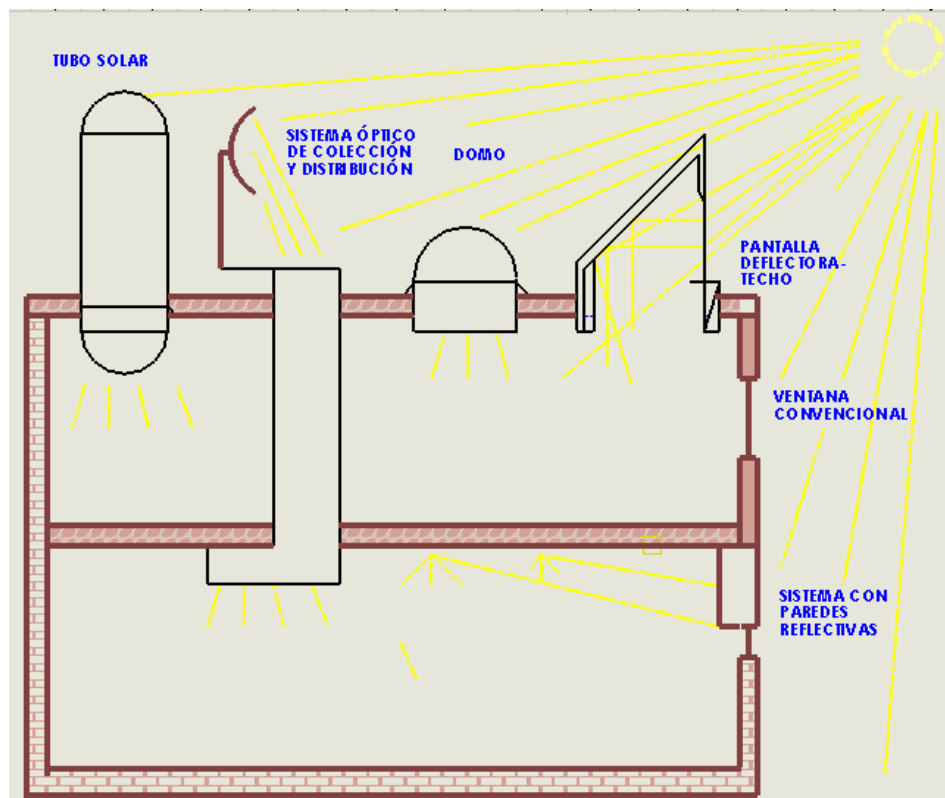


Figura 3. Sistemas de iluminación natural.

Sin embargo la iluminación con luminoductos presenta grandes retos:

- Sistema de colección.
- La dependencia de la potencia de transmisión y la elevación solar.

- La extracción de fracciones de luz a lo largo del ducto.
- Lograr la distribución uniforme de la luz en los espacios interiores debido a que esta viene concentrada.

Consecuentemente, investigaciones relacionadas se han centrado en desarrollar y mejorar cada una de las secciones de los sistemas de transporte de luz (colección, transportación y dispositivos de distribución), y encontrar soluciones eficientes y de bajo costo.

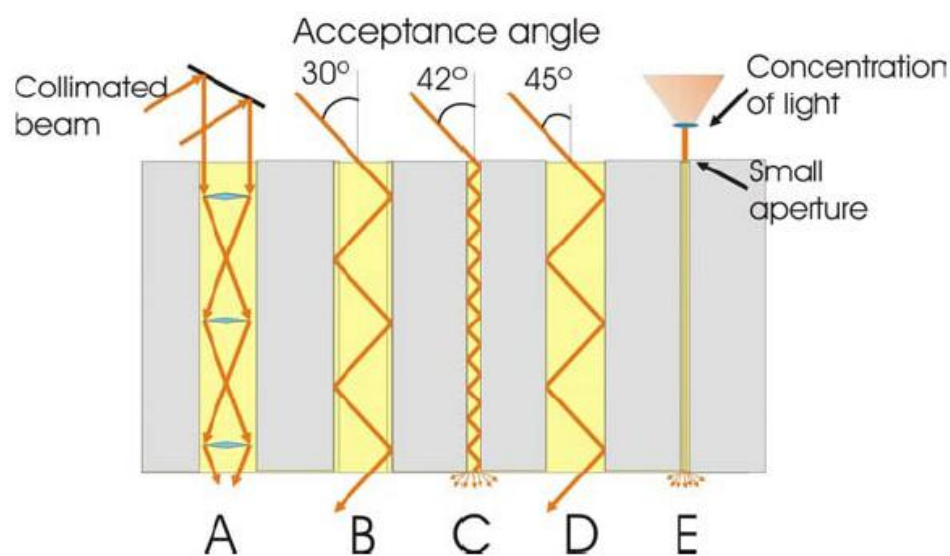


Figura 4. Métodos para la transmisión de rayos solares. A) Lentes, B) Tubos huecos con prismas, C) Vigas de luz, D) Tubos de luz con espejos (MLP), E) Fibras ópticas. (Hansen, 2006).

La luz es transmitida al interior del luminoducto desde la apertura de salida por un número de reflexión especular sobre las paredes internas del tubo (Zastrow y Wittmer, 1986). La transmisión de la luz depende de su ángulo de incidencia, la proporción de los tubos esta en términos del radio, de la longitud de la sección transversal y sobre la reflexión del conductor (Ayers y Carter, 1995). La luz entra con un cierto ángulo axial a lo largo del luminoducto, sometida a numerosas reflexiones con sus correspondientes pérdida que dependen de las dimensiones y de la reflectancia del material (e.g. Aluminio brillante tiene 85% de reflectancia; plásticos recubiertos de plata y aluminio tiene 95%; y nuevos productos tiene reflectancias superiores al 98% como son Miro-silver, y aluminio

mejorado con procesos PVD). MLP a escala pequeñas pueden ser utilizados con bastante éxito en aplicaciones domésticas y comerciales para realzar la luz natural en habitaciones con pobre niveles de iluminación. Esta tecnología es también aplicada a edificios con largos pisos y fachadas que necesitan ser iluminadas a lo largo de los techos internos, como son supermercados, almacenes, etc. (Figura 5).



Figura 5. Sutton Sport Arena-South London

Actualmente están disponibles en el mercado luminoductos de diferentes marcas: Monodraught, Skydome, Solatube, etc., Estos productos están disponibles y usados de forma vertical y constan de:

1. Un colector, es un simple domo de acrílico. La figura 6 muestra más caras y eficientes soluciones que redireccionan la luz axialmente al luminoducto, el cual incluye un ejemplo de diamante prismático de Monodraught Sunpipe (Monodraught, 2005), paneles doblados en una pirámide truncada (i.e. Skytube Intech), diseñado por Dr. Ian Edmonds en 2004 para Skydome (Skydome, 2005), o un sistema colector que combina materiales reflectivos y un dome prismático de acrílico para luminoductos de Solatube (Solatube, 2005a).



Figura 6. Domo tipo diamante

2) Guía transportadora, los tubos son fabricados con materiales altamente reflectivos como son: Aluminio abrillantado (85%), plata (95%), aluminio y plata recubiertos con películas holográficas (95%), y nuevos materiales reflectivos como lo es aluminio mejorado con procesos PVD llamado Miro-Silver (98%) desde Alonod (ALANOD, 2005) y un aluminio polímero llamado Spectralight infinity (99%) desde Solatube (Solatube, 2005b).



Figura 7. A la izquierda: tubo colector de sol Monodraught (Monodraught, 2005). Al centro: paneles cortados con láser Skytube (Skydome, 2005). A la derecha: domo prismático Solatube (Solatube, 2005.a).

3) Emisores, colocados a la salida del luminoducto, usualmente un dispositivo difusor es colocado para evitar la luz directa del sol, y obtener una distribución uniforme de la luz.

Los tamaños comerciales van desde 200 mm a 400 mm de diámetro, con longitudes superiores a 5 m (2 pisos). El uso más común de estas soluciones comerciales es usado en techos con espacios reducidos donde no es posible emplear domos. Comparándolos con los domos transmiten menos calor (Shao y et. al. 1998; Zhang y Munner, 2000). Adicionalmente estos productos integran

elementos mecánicos para ventilación natural³. Monodraught tiene un sistema (Suncatcher)⁴ con ventilación pasiva para desalojar calor (movida por viento)(Monodraught y Windcatcher, 2007). Ambos sistemas son mostrados en la figura 8.

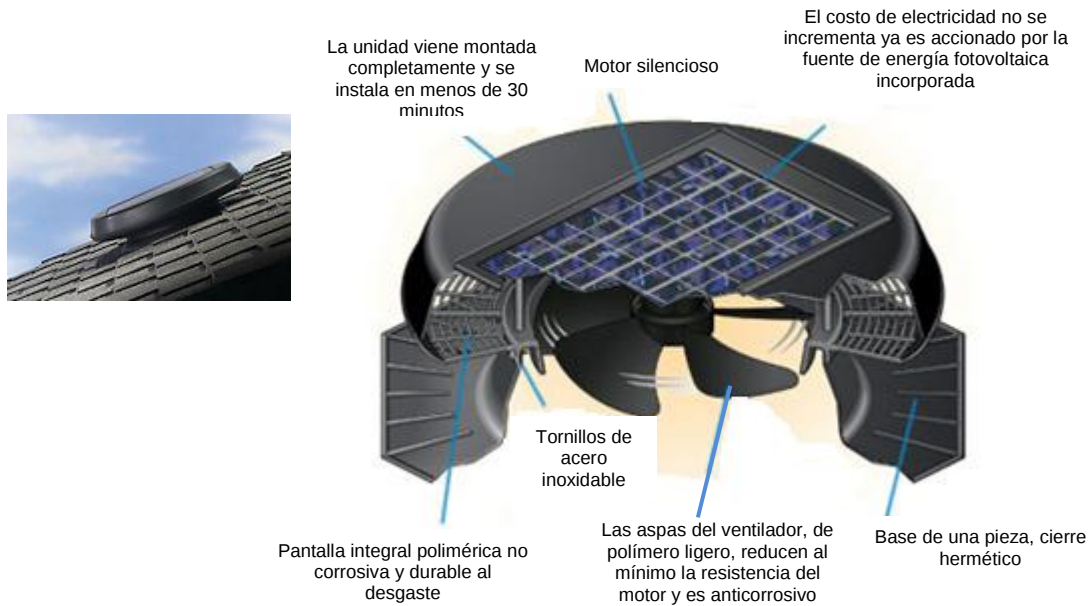


Figura 8a

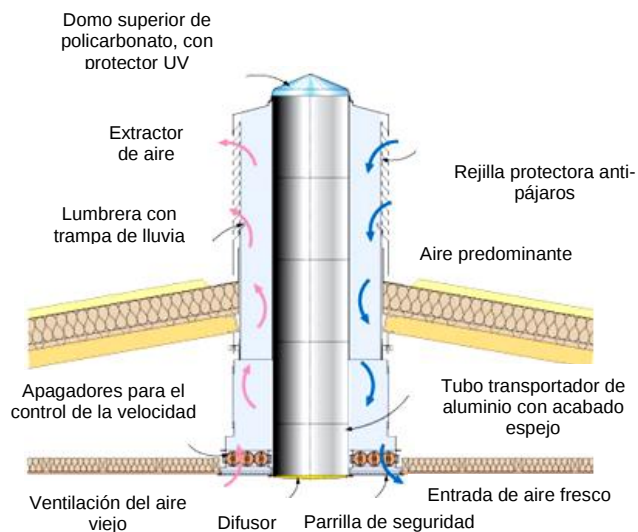


Figura 8.b

Figura 8. Luminoductos: a. con emisores mecánicos para ventilación, b. con ventilación pasiva⁵

³ Solatube.com.au, 2009

⁴ <http://www.sunpipe.co.uk/suncatcher/>, 2009

⁵ www.solatube.com.au/homeowner/solarstar.php, 2009

Numerosos estudios de luminoductos comerciales han sido realizados por grupos de investigadores especialmente del Reino Unido. (Shao y et. al. 1998) Estudiaron el rendimiento de de luminoductos en 4 tipos de edificios (comercial, residencial, educativos y salud). Los luminoductos evaluados fueron de diámetro (330 mm y 530 mm), longitud (0.6m a 12m), factor radio (2-30), y codos (0-4). La colección de la luz fue a través de un domo de acrílico, y la reflectancia fue 95%. Este estudio mostro que factores de radio superior a 6 dan las diferencias del 1 % de las iluminancias (interna/externa). Sin embargo. El rendimiento decrece con aspectos radios grandes o se incrementa el número de codos.

Otros estudios también han confirmado la dependencia del rendimiento del aspecto radio y número de codos empleados en los luminoductos (Oakley y et. al. 2000; Carter, 2002; Jenkins y Muneer, 2003).

En conclusión, el rendimiento de los luminoductos está fuertemente determinado por la iluminancia externa y la configuración propia. La cantidad de luz que entra al tubo depende de la iluminancia incidente sobre el colector, el tipo de colector y el área de la sección transversal del tubo. Las pérdidas de luz ocurren en cada proceso óptico cuando esta pasa a través del colector, de la longitud de tubos rectos, difusores y codos (Carter, 2002).

2.3 Comparación de sistemas los sistemas transportadores

En esta sección se reviso el principio de funcionamiento de los sistemas transportadores y sus componentes. Los sistemas son definidos en términos de los materiales empleados para guía la luz como sistemas que emplean lentes, guías con espejos, tubos huecos y sistemas sólidos. Haciendo un análisis comparativo del comportamiento de los sistemas a la variación de los parámetros de diseño : 1) Factor radio de la guía de luz; 2) eficiencia del sistema; 3) tipo de colector de luz natural; 4) medio de transporte; 5) sistema de distribución; 6) principio de transmisión de luz; 7) espacio requerido; 8)

integración luz natural/artificial; 9) dimensiones del edificio; 10) costos; 11) beneficios y 12) limitaciones.

Lentes: su mayor ventaja es que en teoría no se necesita de un tubo para transportar la luz, ya que esta es guiada por los propios lentes, por lo que pueden ser integrados fácilmente a los edificios y el espacio que ocupan es mínimo. Sin embargo, la eficiencia de los procesos ópticos en el sistema es reducidos por la acumulación de suciedad y el desalineación de las lentes, y por lo tanto un tubo es requerido para montar y proteger las lentes. Adicionalmente para colimar eficazmente la luz se requiere de colectores activos que concentran la luz. Las lentes tienen un 92% de transmitancia y el espacio entre lentes depende de la longitud focal. Bennett y Eijadi (1980) lograron una eficiencia del 28% con un arreglo de 13 lentes, este tipo de tecnología no ha vuelto a ser instalada.

Luminoductos: presentan claros beneficios como son: su disponibilidad y bajo costo en el mercado, su producción en serie sobre todo para uso domestico, su sistema de colección son pasivos y la facilidad de extracción al final (Edmonds y et. al. 1997 a), o regularmente por difusores a lo largo del tubo (Canziani y et. al. 2004), o también por pequeños cortes o rendijas para lograr una mejor distribución de luz (Aizemberg y et.al. 2003). Adicionalmente, el potencial de integración con sistemas de luz artificial y ventilación natural de los ductos para el desalojo del calor generado. Pero, el tamaño del diámetro del tubo de estos sistemas, es considerado una limitante, ya que dificulta su integración con la arquitectura y la reingeniería de los edificios. Los tubos no son flexibles y los codos disminuyen su rendimiento. La eficiencia de estos sistemas depende de: a) área y geometría del tubo, b) la reflectividad del material, c) la fuente y la dirección de los rayos solares.

Guías de luz huecas: la ventaja que representa que estas pueden ser utilizadas como dispositivo de transporte y emisión, tienen buenas cualidades estéticas y pueden ser integrados fácilmente con dispositivos de luz artificial. Adicionalmente, cuando la luz es colimada tienen alta eficiencia. Sin embargo,

para ángulos bajos de aceptación (27.6°) la luz requiere colimación, resultando esto complicado, por lo que se requiere colectores activos, aunque algunos ejemplos con colectores pasivos son presentados (Aizemberg, 1997 b). Estos sistemas no permiten codos y así la flexibilidad del material es reducida. Además, porque la dificultad de acoplarlo materiales con películas reflectivas de gran longitud lo que reduce su rendimiento. (Whitehead y et. al. 1984; Aizemberg, 1997 b) encontraron eficiencias del 30% con factor radio 15 cuando fueron utilizados con luz natural, la eficiencia mejora cuando usaron luz artificial.

Fibras ópticas: por su flexibilidad y eficiencia en diámetros pequeños, lo que les permite su fácil instalación y al posibilidad de hacer remodelaciones en los edificios. La distribución de la luz es similar a la artificial (e.g. cables y luminarias), y su integración es muy fácil en los edificios. Existen nuevos materiales de fibras más asequibles, aunque estas no son tan eficientes en transportar la luz ya que su uso principal es para telecomunicaciones. La principal limitante para emplear las fibras ópticas es que se necesitan colectores de luz natural muy complicada, debido al ángulo de aceptación para la fibra (entre 10° y 40°) (Jutta Schade, 2002). Fibras de gran calidad tienen pequeños ángulos de aceptación, adicionalmente, es difícil integrar sistemas naturales y artificiales de luz dentro del mismas dispositivo de fibra óptica (Tsangrassoulis y et. al. 2005), con un significativa disminución de la eficiencia. Esto puede ser reducido si la luz es mezclada en la luminaria (Muhs, 2000; Tsangrassoulis y et. al. 2005). Para que la luz viaje por la fibra necesita ser altamente colimada y son necesarias luminarias especiales para la dispersión y distribución.

PMMA (Acrylic rods): son otra alternativa de tubos de luz, la ventaja de esta tecnología son sus diámetros pequeños (50 a 75 mm), comparados con los comerciales (200 a 400 mm) de longitud similar (1.2 a 1,6m). Debido a su ángulo de aceptación (44°) los PMMA no requieren de colectores. Tienen un potencial estético considerable ya que funciona como transportador y emisor a la vez. Las limitaciones de los PMMA es su falta de flexibilidad (como los tubos y codos), por lo tanto su aplicabilidad se reduce a pequeños edificios y la

consecuente dificultad de integración de iluminación natural y artificial dentro de un mismo sistema.

2.4 Métodos predictivos del transporte de luz

Jenkins y Munner (2003), emplearon herramienta informática (Lux Plot) como método para predecir de forma global el comportamiento del flujo luminoso, la iluminación interna es desplegada en pantalla como escala de colores y tonos (calculo simultaneo para cualquier numero de tubos y área interior), representada en el plano 2D (Figura 9).

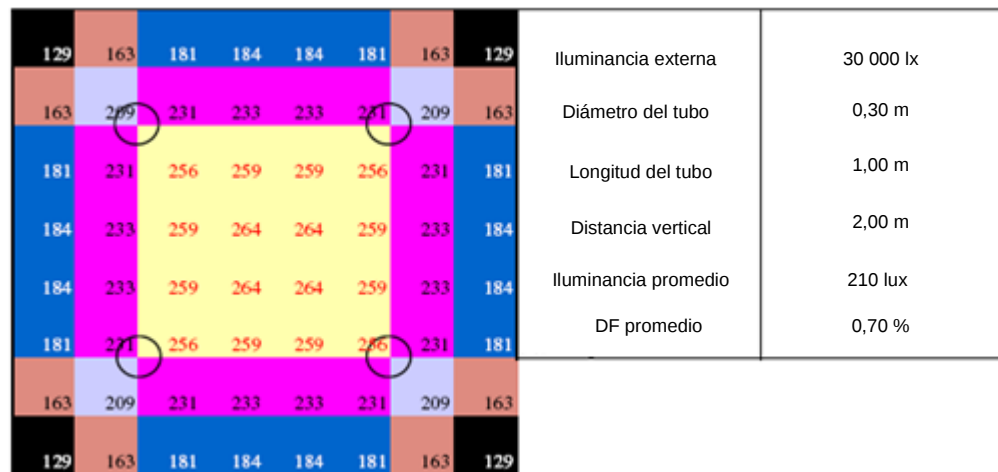


Figura 9. Ejemplo del empleo del luxplot para determinar la iluminación de un luminoducto para una cuarto de 4 x 4 m.

Las dimensiones de los ductos fueron: diámetro de 0.3 – 0.53 m y longitudes de 0.6 – 6 m. Por consiguiente esto cubre un amplio rango de radios; el parámetro radio es el cociente de la longitud y el diámetro del ducto. Estas mediciones permiten rangos de dobleces con ángulos desde 5° a 75°.

La salida como se menciona arriba, es en forma de un mapa de color, pero además se despliega información adicional: como el flujo luminoso total del

ducto, área iluminada promedio y el factor de luz natural (DF). En resumen, para el cálculo interno del flujo luminoso está dada por:

$$\phi = E_{ex} \tau \pi r^2 \quad (2.1)$$

Donde:

ϕ - flujo luminoso, lm;

E_{ex} – iluminancia exterior, $\text{lm} \cdot \text{m}^{-2}$;

τ - factor de transmisión total, %; y

r – radio de la sección transversal del luminoducto, m.

Otra expresión para calcular el flujo luminoso considera la relación entre la longitud y el diámetro:

$$\phi = 0,82 E_{ex} e^{-0,11A} \pi r^2 \quad (2.2)$$

Donde:

A – relación longitud – diámetro del luminoducto, adim.

El factor 0,82 relaciona la transmisión total desde el colector hasta el difusor, el coeficiente exponencial 0,11 es una medida de reflexión (y puede ser relacionada con la luz que se pierde en el ducto mismo), de hecho actualmente se considera que $1 - e^{-0,11}$ es la fracción de luz perdida por unidad de A , que es aplicable a este método y a otros tipos de ductos.

La iluminancia interna E_{in} , está dada por:

$$E_{in} = 0.494 \phi \frac{\cos^4 \theta}{V^2} \quad (2.3)$$

Donde:

V - distancia vertical del difusor hasta el punto de interés, m;

θ – ángulo entre la vertical del difusor y el línea central que intercepta el punto de interés, °; y

0.494 – coeficiente obtenido empíricamente.

Por cada codo, el factor χ es introducido para ductos rectos, y se determina:

$$\chi = e^{-0.0052\beta} \quad (2.4)$$

Donde:

β - es ángulo del codo, °.

Zhang y Munneer (2002), propusieron una técnica de predicción del comportamiento de la luz en luminoductos de 0,21, 0,33, 0,45 y 0.53 m, y variando la longitud entre 0.6 y 1.2 m. Mediante extrapolación se estima la iluminación de ductos incluidos dentro de estos rangos. Para medir los efectos se adicionaron secciones a 30° y codos por lo tanto obtuvieron dos modelos por separados.

La cantidad empleada para describir la disponibilidad de luz es el “factor de penetración de luz” (DPF), que es un análogo de Factor de luz (DF) usado para describir la proporción de luz entrante por una ventana comparada con la exterior. Mientras que DF está basado en la luz difusa, el DPF toma en cuenta la habilidad de la luz para expandirse de forma global.

El modelo de Zhang y Munner para ductos rectos calcula el DPF, como:

$$DPF = (62,5 - 17,2 k_t + 2,6 \alpha) \rho^{(136+4,3 A p+1,1 \cot \alpha-0,4 A p \cot \alpha)} R^2 \frac{\left(\frac{V}{D}\right)^{1.3}}{D^2} \quad (2.5)$$

Para ductos con codos:

$$DPF = (192,5 - 108,8 k_t + 0,3 \alpha) \rho^{(132,4+4,4 A p e+8,6 \cot \alpha-2,6 A p e \cot \alpha)} R^2 \left(1 - f_{loss}\right)^N \frac{\left(\frac{V}{D}\right)^{1.3}}{D^2} \quad (2.6)$$

Donde:

k_t - parámetro de claridad del cielo, adim;

α - altitud solar, °;

ρ – reflexión del tubo,%;

Ap - relación longitud – diámetro del luminoducto, adim;

Ape - relación longitud – diámetro del luminoducto con codos, adim;

R - diámetro del ducto, m;

f_{loss} -factor de pérdida de energía, adim ;

V – distancia vertical del desde el difusor al punto de interés, m;

N - número de codos a 30° ; y

D - distancia directa de un punto de interés desde luminoducto al difusor, m.

Carter (2002), de la Universidad de Liverpool, involucra estimaciones y mediciones de la cantidad total emitida por un luminoducto (e.g. flujo luminoso), y consideraciones de la distribución de la luz (intensidad de distribución).

Nuevamente consideró en su diseño constructivo ductos con diámetros de 0,33, 0,45 y 0.53 m y longitudes de 0,6 y 1.2 m. Los ductos involucrados son similares a los considerados en las investigaciones de Zhang y Munner (2002), pero diferentes a los de Jenkins y Munner (2003).

Una vez determinado el flujo luminoso, el propósito del método es asociarlo con la iluminación que hay interior de un espacio. Fundamentando el cálculo de

la distribución de la luz por medio de la Ley del Coseno cuarto, que es usado para la determinación punto a punto.

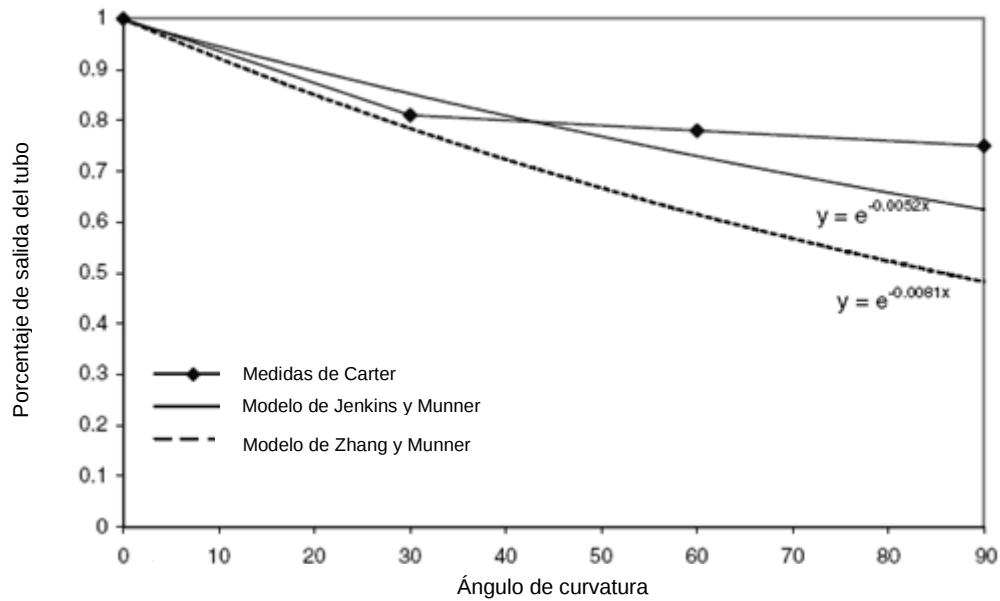


Figura 10. Curvas de comparación en la medición de luz por los métodos de Carter, Jenkins y Munner y Zhang y Munner.

Los efectos por la presencia de codos son también considerados y se aproximan a los obtenidos en el estudio de Jenkins y Munner (2004), para un ángulo de 60°. Sin embargo Carter (2002), sugiere pequeñas pérdidas para ángulos cercanos a 90° (figura 10).

Tsangrassoulis de la Universidad de Atenas (Jenkins y Munner, 2004), usando datos de transmitancia del ducto, difusor y colector, estima la Luminancia (L), como sigue:

$$L = \frac{(E_e)(\tau_e)}{\pi} \quad (2.7)$$

Donde:

E_e - iluminación alcanzada por el emisor, lx; y

(τ_e) - transmitancia del emisor, %.

Para determinar la iluminancia, E_o en un punto directamente por debajo del difusor, es determinado por:

$$E_o = \frac{\pi L r^2}{V^2 + r^2} \quad (2.8)$$

Donde:

V - distancia vertical desde el emisor hasta el punto de interés, m; y

r – radio del ducto, m.

Si el punto de interés no está justo abajo del emisor las distancias son expresadas en términos de la coordenada x , por lo que propone la siguiente expresión para su determinación:

$$E_x = 0,5\pi I_L \left(1 - \frac{F_1}{F_2}\right) \quad (2.9)$$

Donde: $F_1 = 1 + \frac{V^2}{x^2} - \frac{r^2}{x^2} \quad (2.9.1)$

$$F_2 = \sqrt{Z^2 - 4\left(\frac{r^2}{x^2}\right)^2} \quad (2.9.2)$$

$$Z = 1 + \frac{V^2 + r^2}{x^2} \quad (2.9.3)$$

2.5 Concentradores solares

La concentración geométrica de un sistema de concentración solar, está definido como el cociente entre la abertura de entrada y la de salida por:

$$C = \frac{A_e}{A_s} \quad (2.10)$$

Donde:

A_e es el área de la abertura de entrada, m^2 ; y

A_s es el área de la abertura de salida, m^2 .

Por otro lado, los concentradores pueden ser divididos en: concentradores de dos dimensiones (2D) (concentración a lo largo de una línea) y de tres dimensiones (3D) (concentración en un plano). Para este trabajo, se analizan considera estos concentradores (e.g. concentradores compuestos con perfiles parabólicos y/o cónicos), donde el comportamiento de la incidencia de los rayos obedece a un cambio en flujo en las tres direcciones del sistema de coordenadas (cosenos directores), y generalmente concentran los rayos solares en un lugar geométrico.

De acuerdo a las leyes de la termodinámica no es posible concentrar la luz de manera infinita, es decir, existe un límite superior C . Empleando el concepto de étendue y el principio de conservación de la misma. La étendue de un sistema óptico es una medida de la potencia transmitida a lo largo de una línea o de un flujo transferido. De la ecuación (2.2), donde e es el área de la abertura de entrada, n es el índice de refracción del medio sobre el cual atraviesa el flujo, y θ_{max} es el ángulo máximo con el cual el flujo incide sobre el sistema y entrar o golpear sobre la apertura de salida (Figura 11).

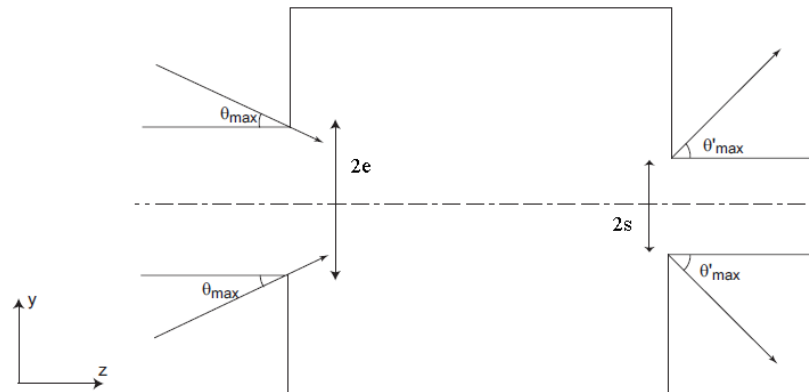


Figura 11. Modelo de un concentrador solar 2D, θ_{max} es el máximo ángulo de aceptación.

$$\acute{e}tendue = n^2 e^2 \theta_{max}^2 \quad (2.11)$$

Para un sistema 3D ideal, la étendue se conserva sobre cualquier punto a través del sistema (Winston y et. al. 2005), es decir, la étendue en la apertura de entrada es igual a la apertura de salida. La conservación de la étendue significa que el flujo transmitido a través del sistema es constante.

En   ptica, la posición de un rayo de luz es definida por tres coordenadas de posición a lo largo del mismo y por tres coordenadas de dirección (cosenos directores).

Entonces, estos cambios en el volumen de luz a la entrada del sistema, tiene que ser compensada por iguales cambios en la abertura de salida, con lo que resulta la ecuación 3, donde k_x y k_y son los cosenos directores de los rayos incidentes.

$$n_e^2 dx dy dk_x dk_y = n_s^2 dx' dy' dk'_x \quad (2.12)$$

El sistema de coordenadas de la abertura de salida puede ser escogida arbitrariamente sin afectar la conservación (Winston y et. al. 2005).

Ahora derivando la relación de concentración para el caso 2D donde los rayos no cambian en la dirección x, según la figura 11, el concentrador tiene una apertura de entrada $2e$ y una apertura de salida $2s$. El sistema es simétrico en la dirección de x y acepta luz en el intervalo de $-\theta_{max}$ a θ_{max} . La luz emitida a la salida en el intervalo $-\theta'_{max}$ a θ'_{max} . Por lo que k_y será igual a $k_y = \sin \theta$ y $dk_y = \cos \theta d\theta$. Considerando la propiedad conservativa de la étendue, queda definida como:

$$n_e \cos \theta d\theta dy = n_s \cos \theta' d\theta' dy' \quad (2.13)$$

Integrando,

$$\int_0^{2e} \int_{-\theta_{max}}^{\theta_{max}} n_e \cos \theta dy d\theta \quad (2.14)$$

Resultando, después de la integración:

$$4n_e e \sin \theta_{\max} = 4n_s s \sin \theta'_{\max} \quad (2.15)$$

Como la relación de concentración está definida como la razón entre las aperturas de entrada y salida, entonces reescribiendo tenemos:

$$C = \frac{e}{s} = \frac{n_s \sin \theta'_{\max}}{n_e \sin \theta_{\max}} \quad (2.16)$$

Esta expresión tiene un máximo cuando el ángulo de salida es igual a 90° , y la máxima concentración para un concentrador 2D es:

$$C = \frac{e}{s} = \frac{n_s}{n_e \sin \theta_{\max}} \quad (2.17)$$

Considerando el mismo modelo de la caja negra para un sistema 3D, con entrada A_e y salida A_s . El máximo ángulo de incidencia es un cono con ángulo $\theta_{\max}$. Los cosenos directores en este caso son:

$$k_x = \sin \theta \sin \varphi \quad (2.18)$$

$$k_y = \sin \theta \cos \varphi \quad (2.19)$$

Donde φ es el ángulo de rotación alrededor del eje z en el plano xy, y

$$dk_x dk_y = \cos \theta \sin \theta d\theta d\varphi \quad (2.20)$$

La cantidad conservativa étendue para el caso en 3D es:

$$n_e^2 \cos \theta \sin \theta dx dy d\theta d\varphi = n_s^2 \cos \theta' \sin \theta' dx' dy' d\theta' d\varphi' \quad (2.21)$$

Integrando esta expresión, obtenemos:

$$n_e^2 A_e \int_0^{2\pi} \int_0^{\theta_{\max}} \cos \theta \sin \theta d\theta d\varphi = n_s^2 A_s \int_0^{2\pi} \int_0^{\theta_{\max}} \cos \theta' \sin \theta' d\theta' d\varphi' \quad (2.22)$$

$$2\pi n_e^2 A_e \frac{\sin^2 \theta_{\max}}{2} = 2\pi n_s^2 A_s \frac{\sin^2 \theta'_{\max}}{2} \quad (2.23)$$

Entonces la ecuación 2.10 queda:

$$C = \frac{A_e}{A_s} = \frac{n_s^2 \sin^2 \theta'_{max}}{n_e^2 \sin^2 \theta_{max}} \quad (2.24)$$

Otra vez, la máxima concentración se da cuando el ángulo de salida es 90°, y la concentración para un sistema 3D es:

$$C = \left[\frac{n_s}{n_e \sin \theta_{max}} \right]^2 \quad (2.25)$$

En la práctica, es difícil obtener la máxima concentración, sin asumir pérdidas en alguna parte del sistema, debido a las imperfecciones por manufactura o pérdidas debido a materiales no ideales empleados en el sistema. Para la derivación teórica de la concentración máxima existen dos factores importantes de diseño a considerar: 1) el pequeño intervalo angular de aceptación, y 2) el ángulo de salida de todos los rayos a la salida debe ser superior a 90° para obtener una alta razón de concentración. Otra opción es hacer $n > 1$ dentro del sistema.

Considerando estas dificultades prácticas, entonces tenemos lo siguiente: si los rayos son trazados a través del sistema, la razón entre el número de rayos entrantes en la apertura de entrada y el número de rayos colectados en la apertura de salida la denominamos proporción de concentración óptica.

2.6 Diseño de concentradores solares. Método secuencial y Principio del rayo-límite.

Para el análisis y diseño del concentrador se empleará el método secuencial el principio de rayo-límite. Primero describimos un principio importante usado en el diseño de ideal concentrador, el principio del rayo-límite. Puede ser demostrado que si un rayo en el borde de la abertura, incidente con el ángulo de la aceptación extremo, se transporta al borde de la abertura de la salida, es

suficiente para transferir todos los rayos incidentes dentro del intervalo del ángulo de aceptación a la abertura de la salida (Winston y et. al. 2005). Es decir, que si esto es logrado habremos diseñado un concentrador ideal. Entonces, transportar luz en estos límites del espacio- fase de este volumen de control desde e a s es en este caso idéntico a transportar toda la luz dentro del $\pm\theta_{max}$ desde la abertura e a la abertura s desde θ_{max} representa el límite direccional espacial y el alcance de la abertura representa el límite de posición espacial.

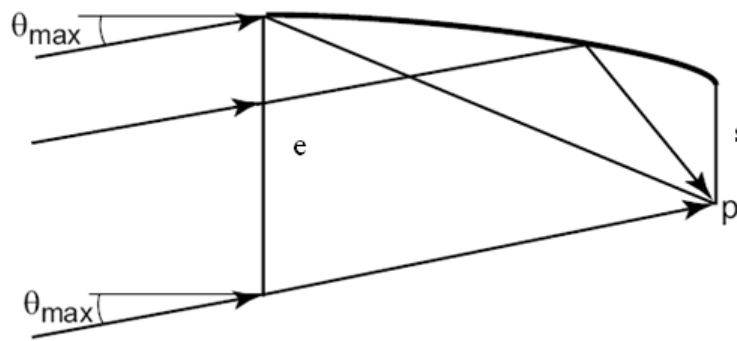


Figura 12. Concentrador con absorbedor plano. Todos los rayos incidentes con θ_{max} chocan y/o convergen en el punto p de la abertura de salida.

La base del método es el principio de Fermat que indica que la longitud de trayectoria óptica entre el objeto y la imagen, en una formación de la imagen en el sistema es igual para todos los rayos. Si se utilizan rayos, conseguimos el principio del borde-rayo.

Según la figura 12, la solución al problema usando el método secuencial en colocar una barra en la abertura, y θ_{max} es la inclinación horizontal, donde θ_{max} es el ángulo máximo para el cual el sistema aceptará rayos. Para realizar la secuencia se sujeta un anillo deslizable alrededor de la barra en un extremo, y se sujeta a la salida en el punto d .

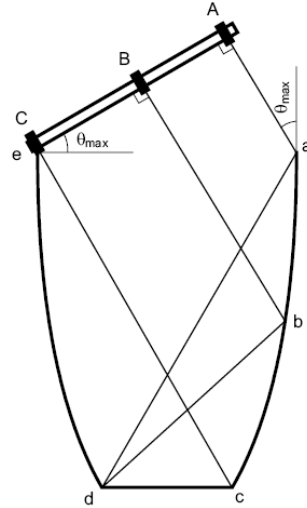


Figura 13. Método secuencial para la construcción de un concentrador ideal. El anillo del final de la secuencia es libre de moverse a lo largo de la barra AC.

Cuando el anillo se pone en el extremo de la secuencia en el punto A de la barra AC, la longitud debe ser tal la longitud Dad . La longitud de la secuencia ahora se fija y guardará esta longitud con el diseño del proceso conjunto. Una pluma ahora se coloca en a, que será el primer punto inicial del reflector. El anillo ahora se mueve desde A hasta B y el lápiz se mueve simultáneamente desde a hasta c en la figura 13, mientras va trazando la secuencia respetando que el ángulo entre la barra y la secuencia es de 90° . El lápiz entonces generará la forma del reflector. Cuando el anillo alcanza el punto C, la pluma estará en el punto c, la forma generada del concentrador es una parábola con su punto focal en d, y el eje óptico paralelo al Cc. El término óptico para este tipo de concentrador es CPC (Compound Parabolic Concentrator) o perfil Winston.

Aplicando el principio de Fermat de las longitudes de trayectoria óptica iguales de los rayos aceptados, entonces tenemos:

$$Cc + cd = ad + ea \sin \theta_{max} \quad (2.26)$$

De la figura, vemos que $Cc = ad$ y $cd = ea \sin \theta_{max}$, por lo razón de concentración es definida como el cociente de la apertura de entrada y la de salida.

$$C = \frac{ea}{cd} = \frac{ea}{ea \sin \theta_{max}} = \frac{1}{\sin \theta_{max}} \quad (2.27)$$

Con esto probamos que el nuevo concentrador es ideal.

2.7 Geometría óptica

Considerando un sistema óptico típico con una apertura de entrada A_1 y una apertura de salida A_2 , la luz entra al sistema dentro de un cono definido por $\pm\Theta_1$ y sale dentro de $\pm\Theta_2$ medidos con respecto al eje óptico (figura 14). La radiancia de la luz, L , es el flujo por unidad de ángulo sólido Ω , por unidad proyectada (Welford y Winston, 1989; Sizmann y et. a 1990; Siegel y Howell, 1981). El flujo incidente sobre la parte superior de una superficie lambertiana está dado por la integral de área de la radiancia y la proyección del ángulo sólido.

$$\Phi_1 = \int L_1 A_1 \cos\theta d\Omega = \int_0^{\theta_1} 2\pi L_1 A_1 \sin\theta \cos\theta d\theta = \pi L_1 A_1 \sin^2\theta_1 \quad (2.28)$$

Una expresión similar es obtenida para la apertura de salida con subíndices 2, la concentración C está dada por la proporción de iluminación sobre las aperturas de salida y entrada,

$$C \equiv \frac{\frac{\Phi_2}{A_2}}{\frac{\Phi_1}{A_1}} = \frac{L_2 \sin^2\theta_2}{L_1 \sin^2\theta_1} \quad (2.29)$$

En un sistema geométrico, la concentración es obtenida por la conservación del flujo a través del sistema, bajo la condición de $L_2 \leq L_1$. Esto significa que el área decrece, la divergencia o ángulo se incrementan para su compensación (Welford y Winston, 1989; Sizmann y et. al. 1990; Siegel y Howell, 1981).

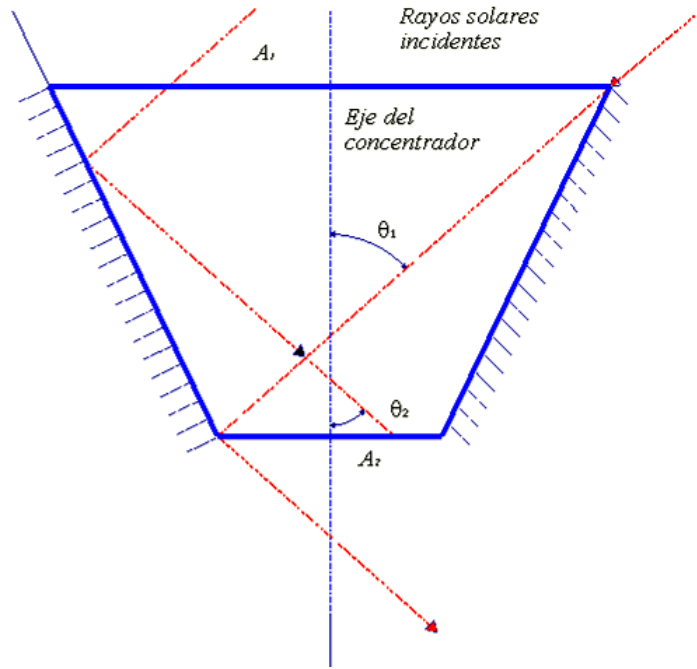


Figura 14. (Concentrador típico). Configuración típica de concentradores solares. La luz incide en el área de entrada A_1 con $\pm\theta_1$ y área de salida A_2 con $\pm\theta_2$

Esto puede ser visto como si el área fuera intercambiada para que el ángulo determine la concentración. La tasa de concentración geométrica máxima está dada por:

$$C \leq \frac{\sin^2 \theta_2}{\sin^2 \theta_1} = \frac{1}{\sin^2 \theta_1} \quad (2.30)$$

Donde el ángulo de salida normalmente es tomado de 90° . Las ecuaciones (4.2) y (4.3) son conocidas como las ecuaciones de transferencia para un flujo luminoso geométrico ideal, pudiendo ser derivadas utilizando espacio-fase, o étendue de la luz (Welford y Winston, 1989; Ries y et. al. 2004).

Si el concentrador es construido en un medio con índice de refracción n , y el plano de salida está inmerso en este medio es necesario modificar la ecuación del concentrador. El rayo extremo θ_1 es refractado a θ'_1 en el concentrador, donde $\sin \theta_1 = n \sin \theta'_1$, donde de la Ley de Snell. Para cuando el

concentrador cuya salida está inmersa en el ambiente con Θ_2 , cambia o no es refractada, la concentración está caracterizada por:

$$C \leq \frac{\sin^2 \theta_2}{\sin^2 \theta'_1} = \frac{n^2 \sin^2 \theta_2}{\sin^2 \theta_1} \quad (2.31)$$

Por conveniencia, la concentración está definida por un ángulo de incidencia externo máximo Θ_1 y un ángulo final de salida Θ_2 . Se deduce que $n^2 L_1 \geq L_2$ para un sistema pasivo. Esto significa que la travesía dentro de un medio con alto índice de refracción, la radiación está confinada a un pequeño ángulo sólido, y así tendríamos la radiancia máxima (Seigel y Howel, 1989; Born y Wolf, 1975). Para un sistema en 2D, donde la luz es reducida a una dirección, la concentración es la raíz cuadrada del valor en 3D.

Existen muchos sistemas de concentración formadores de imagen, como son los lentes fresnel y los reflectores parabólicos, cuya concentración obedece a la ecuación (4.4) para un factor $C \geq 4$ (Welford y Winston, 1989; Gleckman y et. al. 1989). Ambos son casos particulares, ya que transfieren parcialmente la imagen del sol a su salida y que el ángulo de salida es menor que 90° , con lo cual se obtienen los máximos flujos luminosos.

2.8 Resumen

De la revisión de literatura de sistemas de transporte de luz natural que han sido desarrollados, aplicados y estudiados a nivel mundial, que se emplean para iluminar espacios interiores de grandes edificaciones: Luminoductos, Lentes, Guías Prismáticas y Fibras Ópticas. Los investigadores se han enfocado a mejorar la eficiencia de los mismos en sus tres grandes componentes de estos sistemas (Colección, transporte y Emisión-Distribución). De esto, podemos deducir y verificar que surgen nuevos detalles susceptibles de estudio y aplicabilidad hacia otras áreas, por ejemplo la agropecuaria con la

finalidad de reducir costos en el consumo de energías no renovables y los del propio sistema de iluminación natural.

Detectamos por lo tanto, que el material empleado en la transportación de luz define el colector de luz requerido (concentrador solar en este estudio). Normalmente cualquier sistema de transporte de luz refiere mejores rendimientos cuando tienen un sistema de concentración y seguimiento del sol, con lo que se pueden emplear pequeños diámetros, pero con respectivos incremento de los costos del sistema, adicionalmente se requieren materiales altamente reflectivos sistemas de colimación.

Por otro lado, complejos colectores solares activos pueden aumentar el flujo luminoso al interior del luminoducto, con lo cual se puede reducir el número de luminoductos a emplear para iluminar determinada área, adicionalmente el problema de software para el correcto funcionamiento de las partes móviles, instalación y mantenimiento, lo que conlleva un incremento en los costos de operación y la probabilidad de que el sistema falle es alta. Para evitar esto, exploramos otra posibilidad, la de emplear un sistema de colección pasivo (concentrador solar) acoplado a un sistema de transporte de luz natural (luminoducto). Es decir, que los sistemas pasivos requieren de menos mantenimiento y funcionan por largo tiempo, haciéndolos definitivamente más funcionales para ser empleados en los diferentes instalaciones (oficinas, centros educativos, agropecuarias, etc.). Por lo que el uso de un sistema como el propuesto representa una solución funcional y barata.

Por otro lado, otro factor importante que influencia directamente los sistemas de transporte de luz natural es la componente directa del sol. El rendimiento de estos sistemas se ve reducido cuando únicamente la componente difusa de la luz está presente (cielo nublado).

Para contrarrestar esta limitante el diseño propuesto mejorará la iluminación ya que integra un concentrador solar con perfil troncocónico para coleccionar,

redireccionar e introducir los rayos solares al interior del luminoducto y finalmente hacia el espacio a iluminar.

Como resultado final de esta revisión, determinamos que aun se requiere más estudios en el transporte de luz para mejorar su rendimiento de acuerdo a las necesidades lumínicas de los seres vivos alojados en las instalaciones, por lo que esta investigación se centro en el diseño de la sección de colección de luz.

CAPITULO III. DISEÑO Y CÁLCULO DEL CONCENTRADOR

3.1 Definiciones y teoría

Un concentrador solar nos permite lograr la concentración límite termodinámica, considerando la propiedad de las superficies cónicas (parábola), todos los rayos paralelos al eje de la parábola son reflejados en el foco, (figura 15).

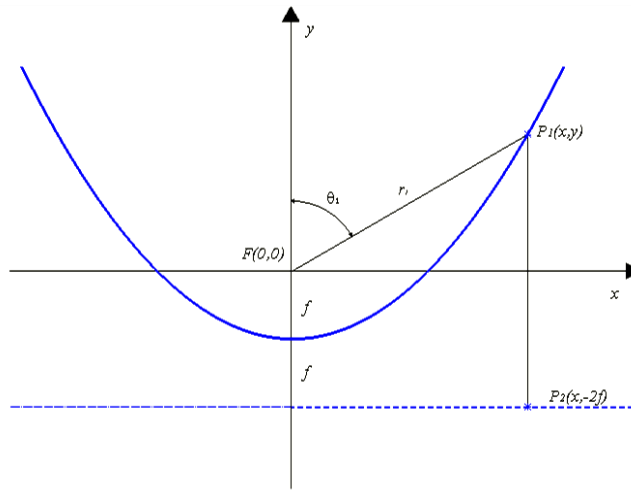


Figura 15. Parábola base

Por definición la parábola, su excentricidad es igual a 1 por lo que:

$\overline{FP_1} = \overline{P_1P_2}$, por lo que de la figura 10, tenemos:

$$\sqrt{(x-0)^2 + (y-0)^2} = \sqrt{(x-x)^2 + (y+2f)^2} \quad (3.1)$$

$$x^2 - 4fy - 4f^2 = 0 \quad (3.2)$$

Empleando coordenadas polares:

$$x = r_1 \sin \theta_1 \quad (3.3)$$

$$y = r_1 \cos \theta_1 \quad (3.4)$$

Entonces, la ecuación paramétrica queda:

$$r_1^2 \sin^2 \theta_1 - 4f r_1 \cos \theta_1 - 4f^2 = 0 \quad (3.5)$$

Resolviendo para r_1 , la ecuación en coordenadas polares de una parábola queda definida por:

$$r_1 = \frac{2f}{1 - \cos \theta_1} \quad (3.6)$$

Para conocer el ángulo de entrada máxima del concentrador en el cual todos los rayos paralelos sean reflejados, se realiza una rotación θ_2 del segmento de la parte derecha de la parábola base (curva O-P₁) (figura 16). Entonces $\theta = \theta_1 - \theta_2$.

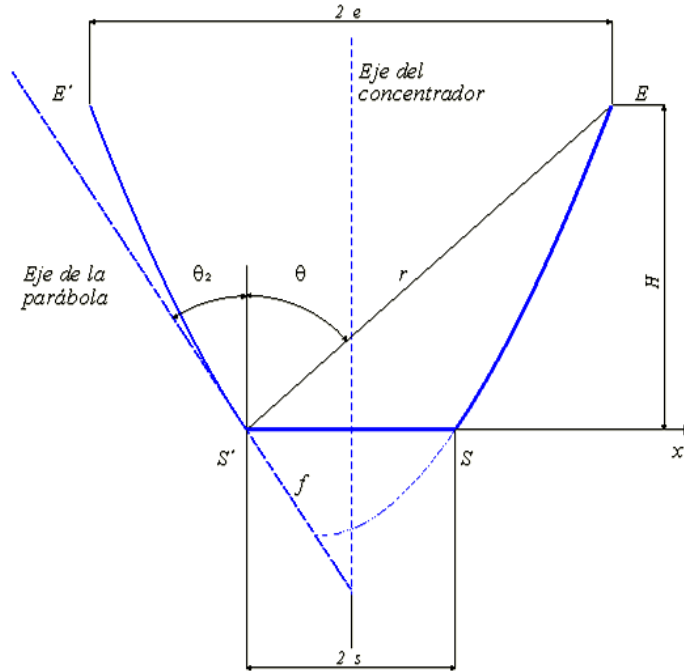


Figura 16. Parámetros del concentrador

Abordando las características principales de un concentrador como son: diámetro de entrada (2e), diámetro de salida (2s), y la longitud (H), por lo cual a partir de las ecuaciones de la parábola.

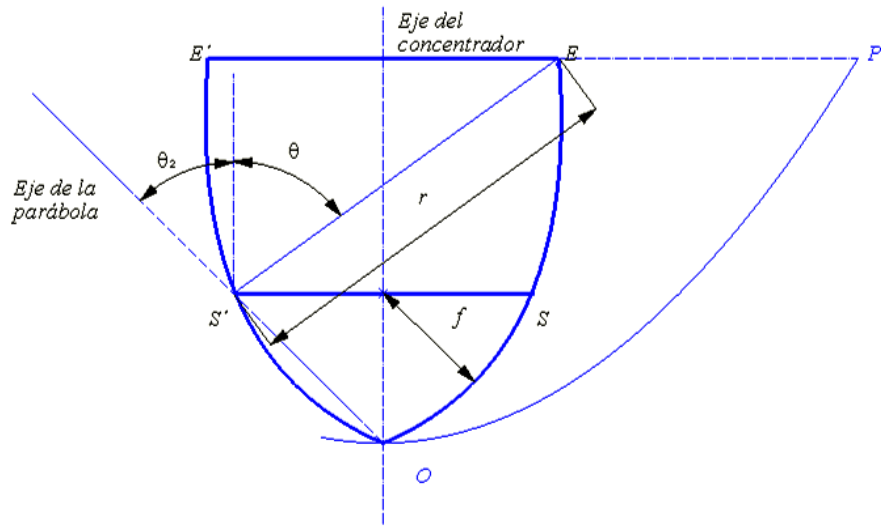


Figura 17. Contorno del perfil base concentrador

Entonces de la figura 17 se puede expresar el diámetro de salida como sigue:

$$\overline{SS'} = r_{\theta=\pi/2} = \frac{2f}{1-\cos(\theta_2+\frac{\pi}{2})} = 2s \quad (3.7)$$

Por lo que el valor del foco será:

$$f = s(1 + \sin \theta_2) \quad (3.8)$$

Para el diámetro de entrada:

$$\overline{EE'} \sin \theta_2 = r_{\theta=\theta_2} \sin \theta_2 = \sin \theta_2 \left(\frac{2f}{1-\cos(\theta_2+\theta_2)} \right) = e + s \quad (3.9)$$

Sustituyendo f:

$$e + s = \frac{s(1+\sin \theta_2)}{\sin \theta_2} \quad (3.10)$$

Finalmente se obtiene:

$$e = \frac{s}{\sin \theta_2} \quad (3.11)$$

Para determinar la altura, se hace un razonamiento similar al diámetro de entrada, entonces, tenemos:

$$H = \overline{ES'} \cos \theta_2 = r_{\theta=\theta_2} \cos \theta_2 = \cos \theta_2 \left(\frac{2f}{1 - \cos(\theta_2 + \theta_2)} \right) = \cos \theta_2 \left(\frac{s + s \sin \theta_2}{\sin^2 \theta_2} \right) \quad (3.12)$$

Por lo que finalmente H, queda:

$$H = \left(\frac{s}{\sin \theta_2} + s \right) \cot \theta_2 = (e + s) \cot \theta_2 \quad (3.13)$$

3.2 Concentrador solar cónico

Considerando otro perfil para concentración de energía solar que es el que se emplea en esta investigación, con la idea de explorar y realizar mejoras a los diseños comerciales y hacer adaptaciones para que sean utilizados en el interior de instalaciones a donde no es posible que la luz solar penetre de manera natural.

Uno de los primeros sistemas concentradores 3D usado para colección de luz fue de tipo cónico (Williamson, 1952). La figura 18 muestra la sección transversal de un concentrador cónico.

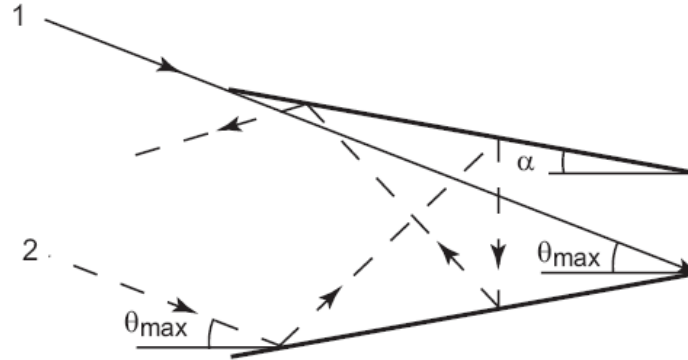


Figura 18. Sección transversal de un concentrador cónico. Algunos de los rayos incidentes con θ_{max} son regresados en lugar de salir por la abertura de salida.

El diseño cónico es sencillo, está formado por dos espejos montados en un ángulo α y revolucionado sobre su eje de simetría. Esto permite que la manufactura del concentrador sea simple, la longitud del concentrador está determinada por el rayo incidente 1 con θ_{max} , golpean en la abertura de salida (ver la figura 18). Como puede verse algunos rayos (e.g. rayo 2) son reflectados hacia el exterior del sistema. Claramente un concentrador cónico y/o con perfil V no son ideales ya que desecha cierta cantidad de la luz en la abertura de entrada, pero si se modifica la forma de los reflectores cambiada para que el sistema acepte el rayo 2 y rayos oblicuos, se acercaría a la concentración ideal. Esto lleva al desarrollo del concentrador parabólico compuesto que fue discutido en secciones anteriores.

En base a los principios de la óptica no formadora de imágenes (Welford y Winston, 1989), el concentrador con perfil cónico (antecesor del Winston), es un dispositivo desarrollado usando el principio de rayo-límite que mejora los valores de concentración, desde la idea de óptica. Por lo que las consideraciones y ecuaciones desarrolladas en la sección anterior son válidas para este tipo de perfil.

El principio de rayo-extremo limite se refiere, al último en ser aceptado por el concentrador y que podría formar la iluminancia en el borde de apertura de salida, con un determinado ángulo de aceptación. La idea fundamental de este perfil es que acepte y emita un rayo en una sola reflexión, entonces el semiángulo β (figura 19) obedece a la siguiente ecuación (3.14) para θ el ángulo de incidencia del rayo, en radianes:

$$2\beta = \left(\frac{\pi}{2}\right) - \theta \quad (3.14)$$

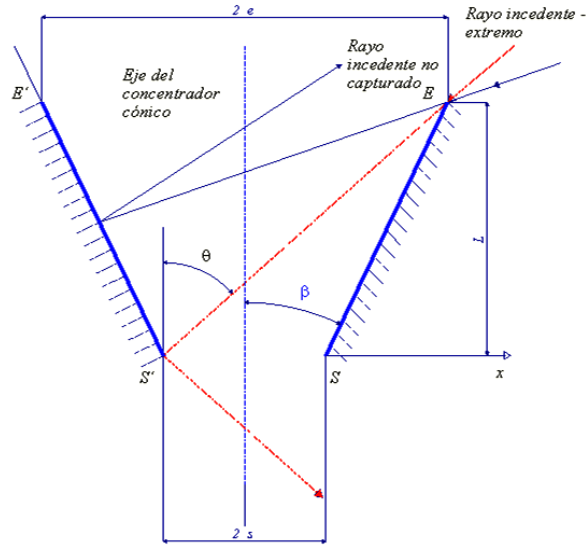


Figura 19. Perfil de un concentrador cónico
Considerando las dimensiones del domo y del difusor, β está dada:

$$\beta = \tan^{-1} \left(\frac{e-s}{L} \right) \quad (3.15)$$

Donde:

e - radio del domo, m;

s - radio del difusor, m; y

L - altura, m.

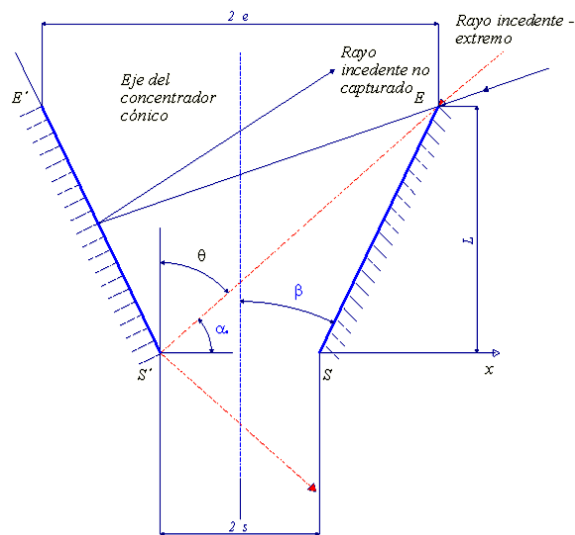


Figura 20. Ángulo solar del rayo extremo saliente (α_s) del concentrador cónico por la apertura de salida.

Por simple geometría (figura 20):

$$\alpha_s = \tan^{-1} \frac{L}{e+s} \quad (3.16)$$

3.3 Diseño del concentrador

3.3.1 Metodología de diseño

Empleando coordenadas polares para el diseño del concentrador en 2D (para el caso 3D se crea por la rotación del anterior sobre el eje de simetría). La familia de perfiles son generados por integración de la ecuación diferencial que caracteriza la reflexión de los rayos. Aplicando Ley de Snell para reflexión especular para una curva, está dada por:

$$\frac{dR}{d\varphi} = R \tan \alpha \quad (3.17)$$

Donde:

(R, φ) representan un punto sobre una curva; y

α es el ángulo del rayo desde el origen de un sistema de coordenadas normal a la curva.

El diseño del concentrador depende totalmente de la variable α . En la figura 21 se muestra el comportamiento de un rayo reflectado, considerando la óptica no formadora de imagen, entonces es necesario definir un origen y encontrar α (R, φ) que satisfaga el principio de rayo-límite o rayo-último, respetando el conjunto de restricciones de diseño para el concentrador y encontrar la máxima concentración para una iluminancia dada.

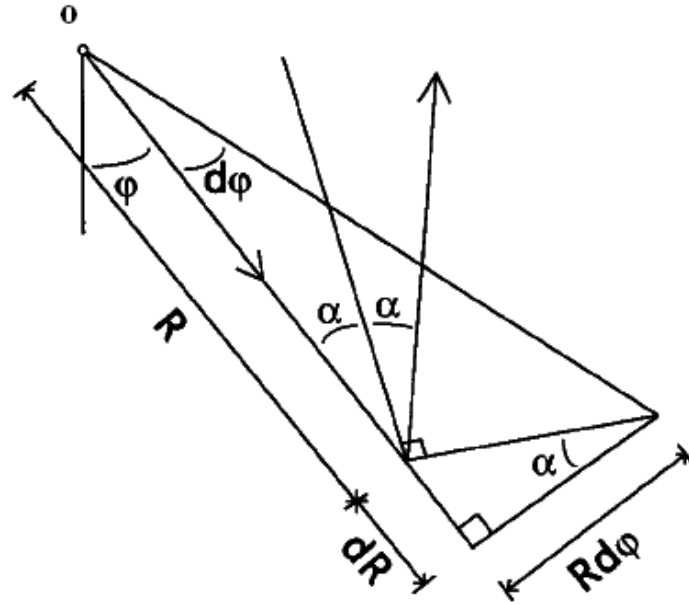


Figura 21. Reflexión de un rayo sobre una superficie en coordenadas polares.

La figura 22 muestra el perfil 2D de un concentrador y los parámetros de diseño.

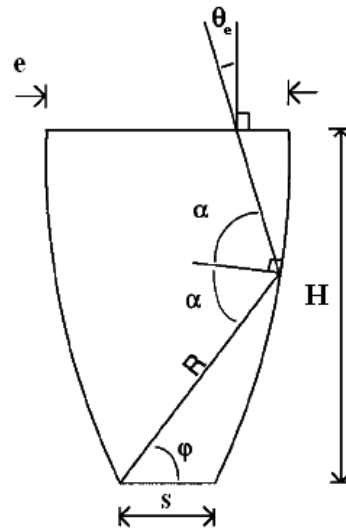


Figura 22. Parametros de diseño del concentrador para $\varphi > \frac{\pi}{2} - \theta_s$.

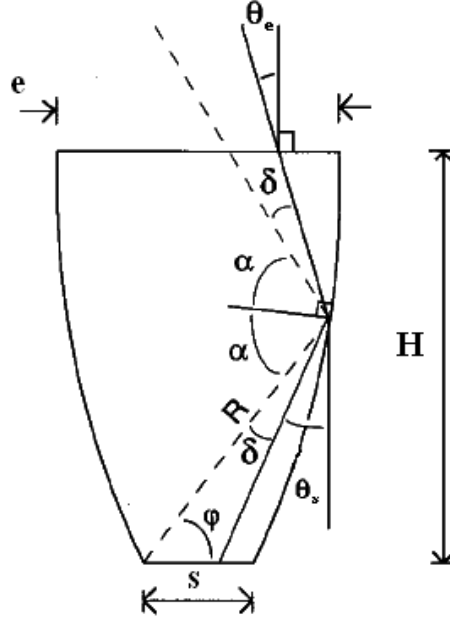


Figura 23. Parametros de diseño del concentrador para $\varphi \leq \frac{\pi}{2} - \theta_s$.

De la figura 23 se tiene que $\theta_e(R, \varphi)$, es el ángulo de los rayos con respecto al eje de simetría del concentrador, chocan sobre la pared interna del concentrador en el punto (R, φ) . Estandarizando, $\theta_e(R, \varphi)$ es constante para todo R, φ . Considerando que todos los rayos que choquen sobre la pared interna del concentrador no sean regresados, esto determinará el ángulo máximo. Aunque esto parece trivial, es potencialmente difícil por el complejo patrón de distribución de radiancia. Entonces, geoméricamente θ_e y α estan relacionadas por la siguiente ecuación:

$$\alpha = \frac{\pi}{4} + \frac{\varphi - \theta_e(R, \varphi)}{2} \quad si \quad \theta_s > \frac{\pi}{2} - \varphi \quad (3.18)$$

Las ecuaciones (3.18) y (3.20) no son solucionables analíticamente a menos que θ_e sea constante. Cuando se anexa la restricción $\theta_s < \frac{\pi}{2}$, no siempre los rayos son reflejados sobre la abertura de salida. Para $\theta_s \leq \frac{\pi}{2} - \varphi$, los rayos no son reflectados atraves del origen de referencia y encontrar α es muy difícil. El diseño con estas rectricciones se muestra en la figura 23, entonces para garantizar que los rayos salgan a un θ_s , introducimos un angulo auxiliar (δ)

que pasa por el borde de abertura de salida, con esto nos ayuda a diseñar correctamente la localización del rayo-extremo (último).

$$\delta = \frac{\pi}{2} - \varphi - \theta_s \quad (3.19)$$

Haciendo, $\delta + \theta_e$, será el ángulo con el que el rayo choca sobre la salida, con lo cual se determina el valor de θ_s , finalmente la ecuación para α , queda:

$$\alpha = \varphi + \frac{\theta_s - \theta_e(R, \varphi)}{2} \quad \text{si} \quad \theta_s \leq \frac{\pi}{2} - \varphi \quad (3.20)$$

Generalmente, si se conoce θ_e , integrando esta ecuación se genera una línea recta.

Esto no es posible, para la mayoría de los casos, para determinar analíticamente la altura H y tamaño de la abertura s de la salida, si se asume que la distribución de la entrada es conocida, es decir, fijar e . La concentración generalmente no puede conocerse, pues no se conoce la zona de colección, lo que da lugar a la concentración menos que ideal.

Para obtener la concentración óptima que debe lograr el diseño del concentrador se encuentra numéricamente. Cuando se varía la concentración e/s , la integración se hace a partir del borde de la salida. Empleando la técnica de la bisección, computacionalmente integrando se puede encontrar la curva a utilizar que pasa a través de ambos bordes de la entrada y de la salida. Si H es fijada, generalmente habrá pérdidas en la concentración.

Para la solución analítica del caso $\theta_e < \theta_s$ del concentrador, combinando las ecuaciones 3.17 y 3.20, y luego integrando con respecto a $R(\varphi)$, en el intervalo $\frac{\pi}{2} - \varphi > \theta_s$,

$$\ln \left[\frac{R(\varphi)}{s} \right] = \int_0^\varphi d\varphi' \tan \left(\varphi' + \frac{\theta_s - \theta_e}{2} \right) \quad (3.21)$$

Si se conoce θ_e y θ_s , la ecuación tiene solución analítica para $R(\varphi)$,

$$R(\varphi) = s \frac{\cos\left(\frac{\theta_s - \theta_e}{2}\right)}{\cos\left(\varphi + \frac{\theta_s - \theta_e}{2}\right)} \quad (3.22)$$

La cual es una línea recta cuya dirección corresponde para $\varphi = \frac{\pi}{2} - \frac{\theta_s - \theta_e}{2}$.

Para el caso de $\theta_s \leq \frac{\pi}{2} - \varphi$, combinando 3.17 y 3.20, tenemos:

$$\ln \left[\frac{R(\varphi)}{R\left(\frac{\pi}{2} - \theta_s\right)} \right] = \int_{\frac{\pi}{2} - \theta_s}^{\varphi} d\varphi' \tan \left(\frac{\pi}{4} + \frac{\varphi' - \theta_e}{2} \right) \quad (3.23)$$

Desarrollando y simplificando, tenemos:

$$R(\varphi) = R\left(\frac{\pi}{2} - \theta_s\right) \frac{\cos^2 \left[\frac{\pi}{2} - \left(\frac{\theta_s - \theta_e}{2} \right) \right]}{\cos^2 \left[\frac{\pi}{2} - \left(\frac{\varphi - \theta_e}{2} \right) \right]} \quad (3.24)$$

El cual es una parábola con dirección del eje que corresponde con $\varphi = \frac{\pi}{2} + \theta_e$ y $\varphi = \frac{\pi}{2} - \theta_e$ como punto final de la curva que define la H del concentrador ideal. Finalmente la curva en coordenadas polares con origen cambiado de lugar sobre la línea de la salida está dado por $[R(\varphi) \cos \varphi - \frac{s}{2}, R(\varphi) \sin \varphi]$, con lo que se obtiene la nueva dimensión e .

3.3.2 Cálculo de aceptación máxima (θ_{max})

Con e y s iniciales del concentrador solar prototipo, figura 24:

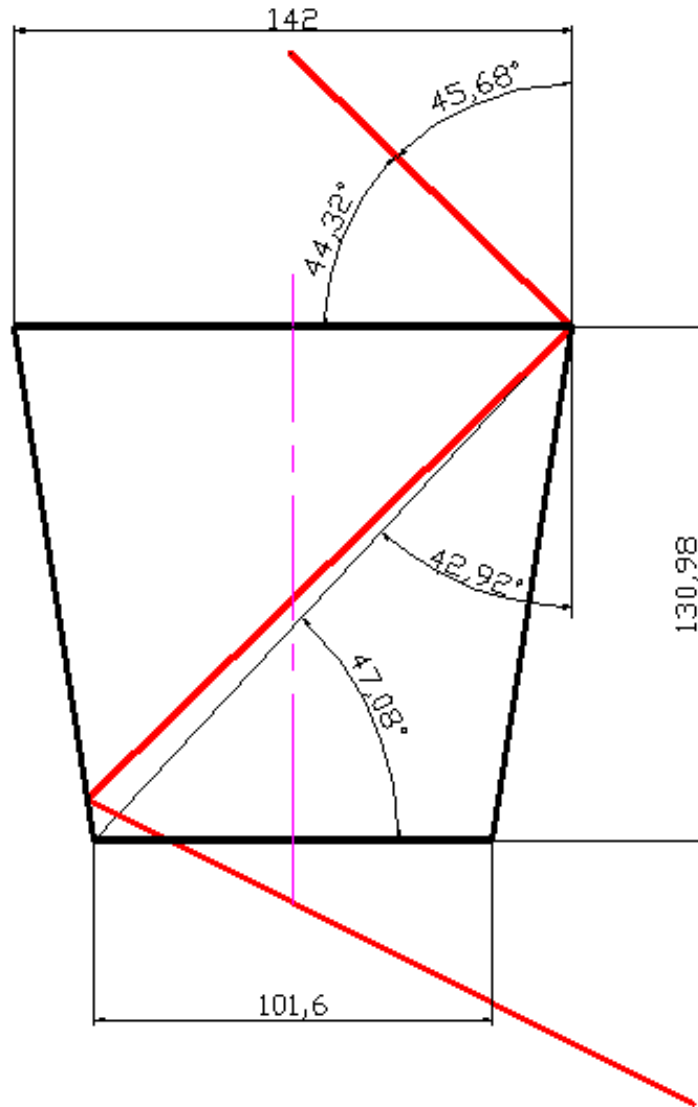


Figura 24. Ángulo de aceptación máximo

Entonces:

$$\theta_{max} = \sin^{-1} \frac{s}{e} = 45,68^\circ \quad (3.25)$$

3.3.3 Cálculo de la concentración geométrica (C_{geo})

Con las dimensiones del prototipo se calcula la concentración geométrica, los valores se muestran en la tabla siguiente:

Tabla 3. Valores de cálculo para la concentración geométrica del prototipo					
$2e$ [m]	$2s$ [m]	A_e [m ²]	A_s [m ²]	C_{geo} en 2D	C_{geo} en 3D
0.142	0.101	0.016	0.008	1.9	3.8

3.3.4 Cálculo de la étendue

Considerando $\theta_{max} = 45.68^\circ$, la étendue en la abertura de entrada del prototipo es:

$$etendue = 0.0113 \text{ m}^2$$

Como la étendue es una cantidad conservativa y geométrica, esta debe ser la misma en la abertura de salida, siendo $\theta_2 = 77.54^\circ$ entonces la étendue en la abertura de salida queda:

$$etendue = 0.011 \text{ m}^2$$

Para que la étendue sea igual se requiere que $\theta_2 = 79.85^\circ$.

3.3.5 Cálculo de la concentración óptica (C_{opt})

Considerando $\theta_{max} = 45.68^\circ$ para el prototipo, la concentración óptica teórica se muestra en la tabla 4.

Tabla 4. Valores de cálculo de la concentración óptica del prototipo.						
A_e [m ²]	A_s [m ²]	n_e	n_s	θ_{max} [rad]	C_{opt} (2D)	C_{opt} (3D)
0.016	0.008	1	1	0.77	1.4	2

Es importante notar que la concentración óptica del prototipo no es ideal, aunque esta sea superior a la calculada por la relación de la ecuación $C = \frac{e}{s}$,

cuyos resultados fueron 1.39 (2D) y 1.95 (3D).Entonces es necesario encontrar las dimensiones ideales para el concentrador solar.

3.3.6 Cálculo del concentrador ideal $R(\varphi)$

Del gráfico de la figura 24, en rojo, se tiene un rayo solar que choca en el borde extremo de la abertura de entrada del concentrador solar con $\theta_{max} = 45.68^\circ$, se tiene que φ es:

$$\varphi = \tan^{-1} \frac{130.98}{121.8} = 47.08^\circ$$

Y el ángulo α , es:

$$\alpha = 45.7^\circ$$

Finalmente, evaluando $R(\varphi)$:

$$R(\varphi) = 101.6 \frac{\cos\left(\frac{45.68^\circ - 45.68^\circ}{2}\right)}{\cos\left(47.08^\circ + \frac{45.68^\circ - 45.68^\circ}{2}\right)} = 149.197$$

El nuevo origen cambiado de lugar sobre la línea de la salida está dado por $[R(\varphi) \cos \varphi - \frac{s}{2}, R(\varphi) \sin \varphi]$, entonces, las coordenadas (50.8, 109.2), indican la altura a la cual hay que cortar el concentrador prototipo para obtener un nuevo concentrador que sea ideal.

Con lo que las dimensiones del nuevo concentrador son:

Tabla 5. Dimensiones del concentrador ideal

2e [m]	2s [m]	H[m]	A_e [m ²]	A_s [m ²]	C_{opt} (2D)	C_{opt} (3D)
0.135	0.101	0.109	0.014	0.008	1.39	1.95

Con un ángulo de aceptación:

$$\theta_{max} = \sin^{-1} \frac{s}{e} = 48.66^\circ$$

El nuevo ángulo de aceptación del concentrador permitió aumentar las horas de colección de luz solar y la disminución las dimensiones de la abertura de entrada y la altura, como se muestra en la tabla 5 y figura 32.

3.3.7 Calculo de horas de captación del concentrador

Para determinar el número de horas que el concentrador captará luz solar, se considera: la trayectoria elíptica del sol que describe sobre el círculo de abertura del concentrador, la declinación de la tierra según la época del año.

Introduciendo un ángulo de fase ϕ para la elipse solar, donde $\phi = 2\pi = 360^\circ$ correspondiente a las 24 horas del día, se encuentra la intersección del círculo formado por la abertura de entrada del concentrador y la elipse solar:

$$\tan \phi = \frac{\sin \theta_{max}}{T} \quad (3.25)$$

Donde:

$$T = \frac{\pi}{2} - \alpha ; y$$

α es la inclinación de la tierra con respecto a la normal de su órbita (plano elíptico).

Entonces, el número de horas de luz de día aceptadas está dada por:

$$Numero\ de\ horas = \frac{24}{\pi} \tan^{-1} \frac{\sin \theta_{max}}{\cos T} \quad (3.26)$$

La tabla 6 se aproxima el número de horas de captación de luz solar a lo largo del año para el concentrador con un factor de concentración 1.33 y ángulo de aceptación $\theta_{max} = 48.66^\circ$.

Tabla 6. Número de horas de captación de luz natural durante el año.

Época del año	T	$\tan \emptyset$	$\emptyset$	Horas de captación
Equinoccios	0°	0.64	32.78°	4.37
Solsticios	23.5°	0.68	34.45°	4.59

CAPÍTULO V. MATERIALES Y MÉTODOS

5.1 Antecedentes

En el presente capítulo se describe: la metodología para el diseño del concentrador solar con perfil cónico para uso en iluminación natural; cálculo del nivel de iluminancia logrado; de las mediciones realizadas bajo condiciones de cielo abierto, para determinar la cantidad de luz natural concentrada que fue transportada, así como los materiales empleados durante el proceso de desarrollo del presente trabajo de investigación.

El desafío, por lo tanto, estuvo en desarrollar un dispositivo capaz captar, transportar y difundir la luz natural al interior de edificios manteniendo la comodidad visual, ambiental y nivel iluminancia requerido por los seres vivos. En particular se logro transportar luz y minimizar el espacio que ocupan los sistemas de transporte de luz natural actuales (luminoductos).

5.2 Descripción de la metodología

Existen estudios a nivel mundial que han investigado el empleo de sistemas pasivos (luminoductos rectos) para iluminación natural de espacios interiores donde la luz solar no llega de manera natural. Fundamentalmente, se han centrado en el efecto que tiene la longitud y el diámetro sobre los niveles de iluminación, pero aun no se han empleado concentradores solares acoplados a esta tecnologia. Entonces el presente trabajo se centro en lograr reducir las dimensiones del sistema de transporte de luz natural e incrementar los niveles de iluminación aplicando la tecnologia de los concentradores solares que han sido utilizados para incremento de calor. Por otro lado, se logra la consecuente

disminución de costos e instalación en espacios reducidos y/o difíciles de acceder.

Para la investigación se procedió usando dos procedimientos experimentales; pruebas al prototipo y experimentación real. En el método de prueba de prototipo, cada prototipo se muestra y describe conceptualmente en la sección anterior. Entonces la disposición para la prueba del prototipo se demuestra y las pruebas se realizan para verificar la hipótesis. En el procedimiento experimental completo, el proceso de la construcción de cada prototipo seleccionado se describe y muestra en las figuras 26, 27, 28, 29 y 30. Se realizaron las pruebas y mediciones para el prototipo a escala y real para verificar la hipótesis.

La evaluación de la eficacia óptica del sistema (Concentrador-luminoducto) fue realizada con pruebas al prototipo a escala y experimentación real. Para la experimentación del prototipo se realizó en **19° 3' latitud norte y 100° 2' longitud oeste** en la localidad de Temascaltepec, Estado de México, Para experimentación real "in-situ" se empleó una instalación agropecuaria ubicada en **16° 22' latitud norte y 94° 12' longitud oeste** en la localidad de Tapanatepec, Oaxaca, en la cual fue instalado el sistema para su evaluación experimental. Por lo tanto, la prueba del modelo de escala y la experimentación completa fueron aplicadas como métodos de evaluación.

5.3 Diseño del Concentrador

El concentrador fue diseñado bajo la metodología propuesta por (Shigley y Mischke, 2002) con las estrategias siguientes:

- Diseño del perfil (curvatura geométrica) del concentrador empleando la trayectoria del rayo luminoso.
- Reducción del número de reflexiones desde el plano superior de la cavidad del concentrador hacia la parte inferior.

Los detalles de diseño de detalle se muestran en el capítulo 4.

Las configuraciones de sistemas fueron diseñados e instaladas para probar (figuras 25, 26, 27 y 28). Todos los sistemas son pasivos de modo que puedan adaptar fácilmente cualquier espacio existente de cualquier instalación. Las estrategias se derivan con respecto a los ángulos de aceptación en función de las aberturas de entrada y de salida, así como de la ubicación solar. El diseño y la evaluación fueron hechos para un ángulo de aceptación del concentrador igual a 45.68° .

5.4 Sistemas de prueba

Se planteo cuatro configuraciones del sistema para pruebas experimentales y medir la iluminancia lograda al interior del espacio objeto de prueba:

- a) Construcción, instalación y medición de la configuración 0 del sistema. Recolección de datos para condiciones de cielo abierto.

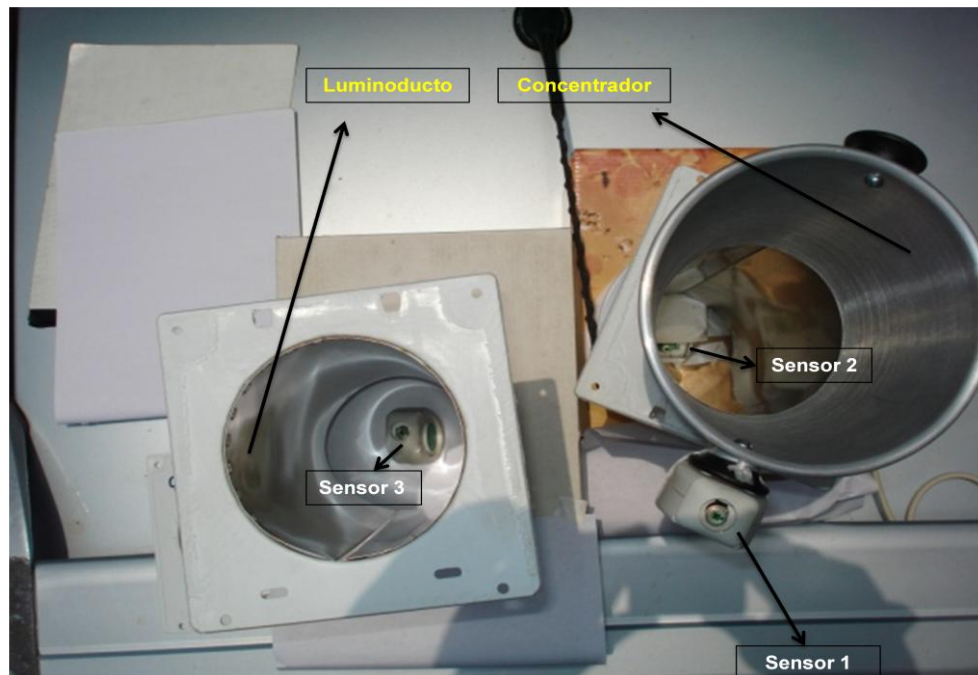


Figura 25. Concentrador, Luminoducto y sensores de luz (configuración 0)

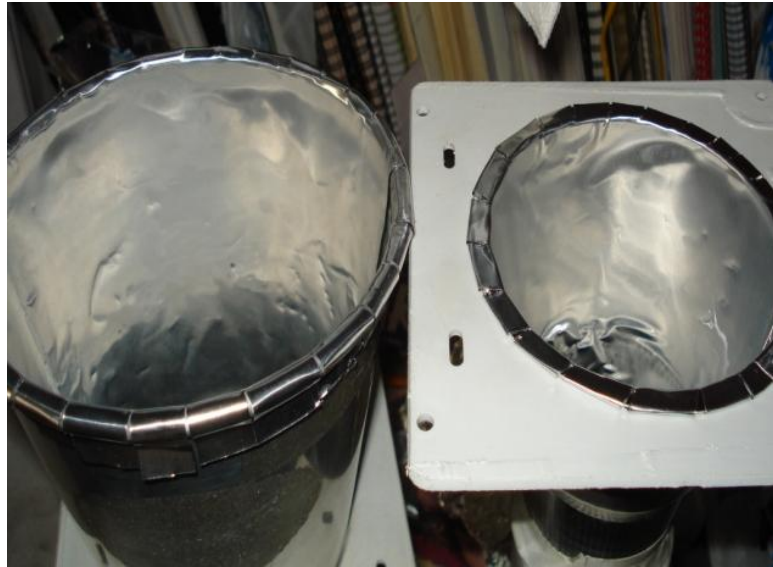


Figura 26. Prototipos: Concentradores Solares.

- b) Construcción, instalación y medición de la configuración 1 del sistema.
Recolección de datos para condiciones de cielo abierto.



Figura 27. Configuración 1: Luminoducto con concentrador y sin concentrador. Longitud de 280 mm y 101.6 mm de diámetro.

- c) Construcción, instalación y medición de la configuración 2 del sistema.
Recolección de datos para condiciones de cielo abierto.



Figura 28. Configuración 2: 2 Luminoductos con concentrador y sin concentrador. Longitud de 560 mm y 101.6 mm de diámetro.

- d) Construcción, instalación y medición de la configuración 3 del sistema.
Recolección de datos para condiciones de cielo abierto.



Figura 29. Configuración 3: 2 Luminoducto con concentrador y sin concentrador con inclinación del sistema 45°. Longitud de 280 mm y 101.6 mm de diámetro por cada luminoducto.

5.5 Pruebas modelo real

De acuerdo con los resultados discutidos en el capítulo siguiente. Se instaló el concentrador en la parte superior de una bodega agropecuaria (Figura 38), sistema que fue seleccionado y utilizado para el análisis completo. La disposición experimental del sistema de prueba fue instalada en un espacio con dimensiones de 4 m de ancho, 5 m de largo, y 3 m altura.

El sistema de concentración y transporte luz natural fue instalado en el espacio experimental, con sensores de luz. El sensor 1 fue colocado sobre el concentrador a la altura de la abertura de salida y el sensor 2 fue ubicado del nivel de la abertura de salida (detalles en sección de materiales), para medir la iluminancia externa recibida directamente por el sistema y la iluminancia lograda al interior del espacio objeto de la prueba.

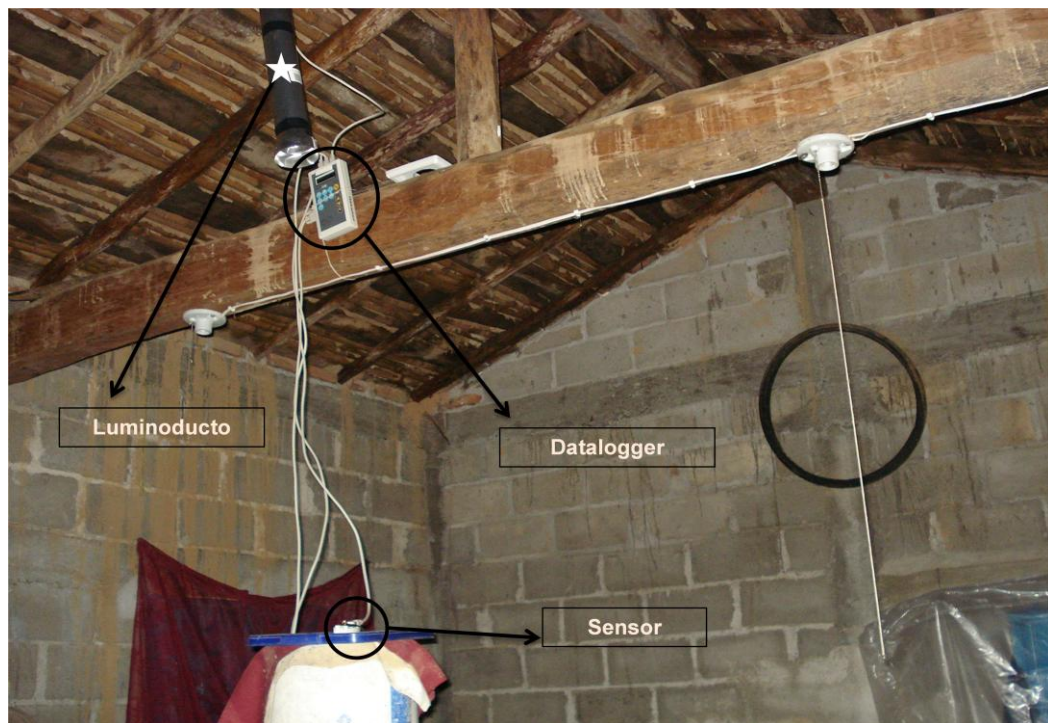


Figura 30. Instalación del sistema en la bodega.

5.6 Análisis de resultados de la experimentación del modelo real

Los resultados de la experimentación del modelo real se detallan en el capítulo de resultados y discusión, se empleo Matlab, Excel y DB-Lab para la medición, recolección y análisis de los datos.

5.7 Materiales

A continuación se enlistan los materiales empleados en la evaluación del modelo a escala para estimar el rendimiento del concentrador diseñado y del sistema en su conjunto (luminoducto y concentrador), figura 31:

2 Multilog Data logger DB526, tres entradas/salidas.

Tres sensores de luz (0-130 klx), DB-Lab.

Cables de comunicación RS-232.

Cables de comunicación HL-340.

Software DB-Lab.

Batería de 9 V.

Lap top.

Concentradores solares cónicos.

6 luminoductos de diámetro 101.6 mm (85% de reflexión) y 280 mm de largo, marca deflecto.

4 Codos 4 x 90°, marca deflecto.

Películas de aluminio (85% de reflexión), marca Rodin de 0.004 mm.

Nivel de mano

Flexómetro

Calibrador vernier marca Mitutoyo.

Micrómetro de interiores tipo tubular, marca Mitutoyo.

Cámara fotográfica Sony DSC-W55.



Figura 31. Instrumentación y Metrología utilizada en la presente investigación.

5.7.1 Sensores de luz

La salida de voltaje de los sensores obedece a un comportamiento lineal de acuerdo a la ecuación:

$$Y = AX + B$$

Donde: por lo que la calibración y los cambios del mismo

Y – salida del sensor (rango de nivel de voltaje desde 0 a 5 V), V;

X – entrada del sensor, V;

A – ganancia del sensor, adim; y

B – compensación del sensor, adim.

La calibración se realizó de forma automática con el software en el menú recolector y por calibración de fábrica.

5.7.2 Datos técnicos de los sensores de luz

Rango dinámico de medición: 0-130 kLux.

Sensibilidad: 120 Lux.

Rango espectral: luz visible 380-780 nm.

Ancho de banda: 100 Hz.

CAPÍTULO VI. RESULTADOS

6.1 Dimensiones del concentrador

La figura 32 muestra los concentradores de prueba del sistema de transporte de luz natural, para la iluminación de una bodega agropecuaria, del lado derecho se puede observar que el rayo solar (rojo) con ángulo de incidencia $\theta_e = 45.68^\circ$ tiene que reflectarse en 2 ocasiones para lograr chocar con el objetivo uno en el borde del concentrador y 2 en la pared interna del mismo, entonces los rayos con ángulos de entrada que choquen por arriba del punto 2 no entraran al sistema, contrario a esto, los que estén por debajo de este punto si logran alcanzar el objetivo con una sola reflexión, esto se puede observar en el concentrador de lado izquierdo en la figura 32. Esto permitió la reducción de las dimensiones iniciales del concentrador e y H .

La tabla 7 muestra las dimensiones y parámetros de diseño del concentrador solar troncocónico ideal. La concentración geométrica es 1.7 la cual es menor en comparación con 1.9 del prototipo y la óptica 1.3 para el caso 2D, esta última se recalculó de tal forma que el concentrador fuera ideal, esto se logro con el aumento del ángulo de aceptación del concentrador 45.68° a 48.66° lo que permitió que los rayos solares que inciden sobre el borde de la abertura de entrada con una sola reflexión choquen en el objetivo que en este caso es la abertura de salida. Entonces el concentrador capta rayos solares con ángulos de entrada que van desde 9° a 48° con respecto a la vertical. Las dimensiones de la abertura de entrada y la altura disminuyeron con respecto a las del prototipo inicial, pero se conservo el valor de concentración óptica, con lo que el concentrador solar troncocónico diseñado es ideal.

Tabla 7. Parámetros de diseño del concentrador ideal

s (mm)	e (mm)	H (mm)	α (rad)	θ_e (rad)	θ_s (rad)	C (2D)	C(3D)
101.6	135.3	109.2	0.75	0.84	0.84	1.7	3.1

Por otro lado, el número de horas de captación de luz solar del concentrador diseñado en el solsticio fueron de 4.47 horas para el concentrador inicial y de 4.59 para el concentrador ideal y para el equinoccio de 4.24 horas y 4.37 horas respectivamente. El número de horas de captación es prácticamente independiente de la época del año y depende únicamente del ángulo de aceptación.

Se noto que al reducir el ángulo de aceptación, el factor de concentración se incrementa y el número de horas de luz solar tiende a disminuir (Tabla 8). Este comportamiento permite adecuar la captación de energía solar a un conjunto de requerimientos y esquemas dados.

Si se emplea un concentrador con la finalidad de producir calor como hasta la actualidad se ha hecho, es preferible ángulos de aceptación pequeños, pero en el caso tratado por esta investigación se prefirieron ángulos de aceptación grandes ya que la finalidad fue captar, transportar y difundir luz solar para aplicaciones en iluminación natural.

Tabla 8. Factores de concentración para concentradores con ángulos de aceptación entre 15° y 90°.

θ_{max} [°]	ϕ [°]	Factor de concentración	Horas de captación
90	39.6	1	5.2
75	39.0	1	5.2
60	37.1	1.1	4.9
45	33.3	1.4	4.4
30	26.5	2	3.5
15	15.3	3.8	2

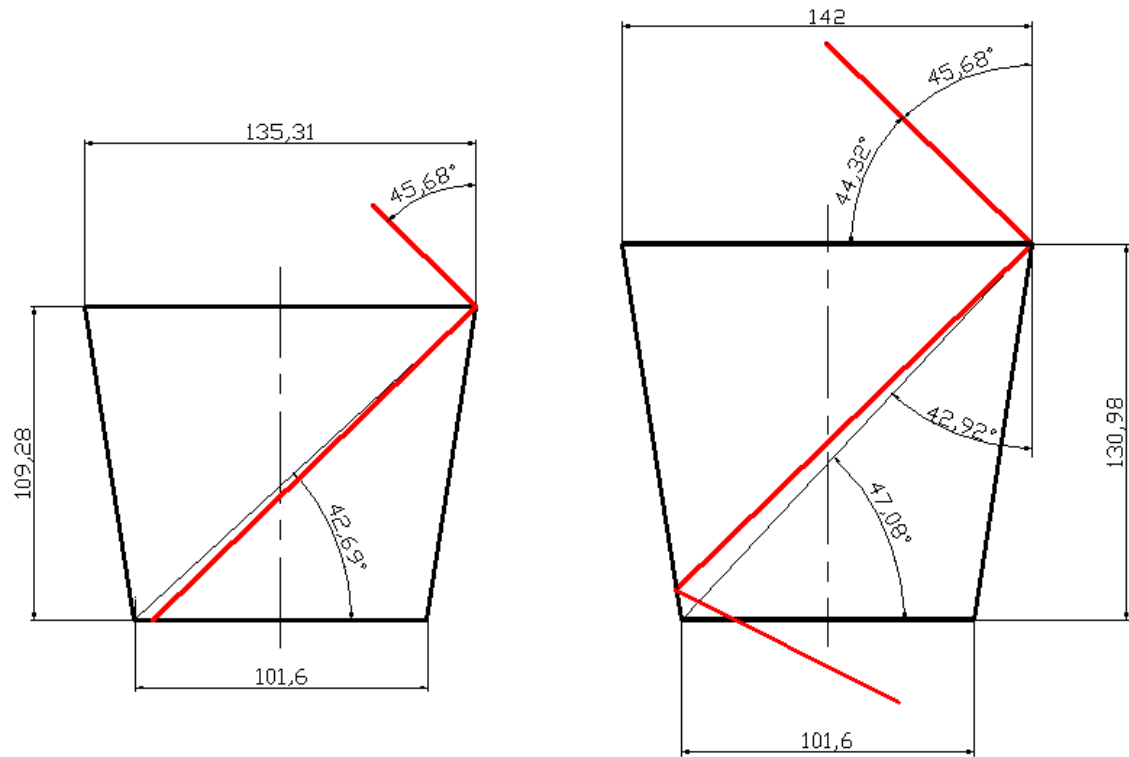


Figura 32. Concentrador 2D. Concentrador ideal (izquierda), concentrador prototipo (derecha).

En la figura 33 se muestra las trayectorias que toman los rayos luminosos que incidan sobre la abertura de entrada del sistema. Es necesario considerar el ángulo de inclinación del concentrador y sustraerlo del ángulo de aceptación máxima. En rojo se muestra la trayectoria de un rayo con ángulo de entrada superior al de aceptación que aunque incide sobre el sistema e inicialmente entra, al final no logran chocar con el objetivo (salida), por otro lado rayos con ángulos de entrada (amarillo) menores (37.4°) al de aceptación considerando la inclinación del concentrador logran el objetivo después de una reflexión a una altura de 21 mm, los rayos (azul) que chocan por debajo de los 21 mm con respecto a la abertura de entrada entran directamente al luminoducto con un ángulo de salida igual a 72° .

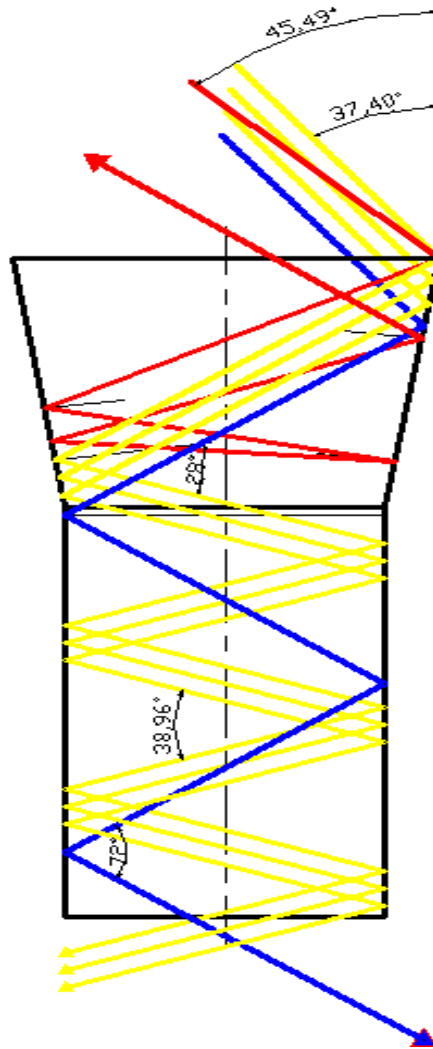


Figura 33. Trayectorias de los rayos según ángulo de entrada, θ_e

6.2 Mediciones de iluminancia del concentrador

En el gráfico de la figura 34 se muestra el comportamiento del concentrador diseñado. Se muestra el periodo para el cual el concentrador cónico desarrollo su máximo rendimiento, es decir, la iluminancia del concentrador es superior a la iluminancia externa y el concentrador desarrollo las máximas concentraciones de luz natural.

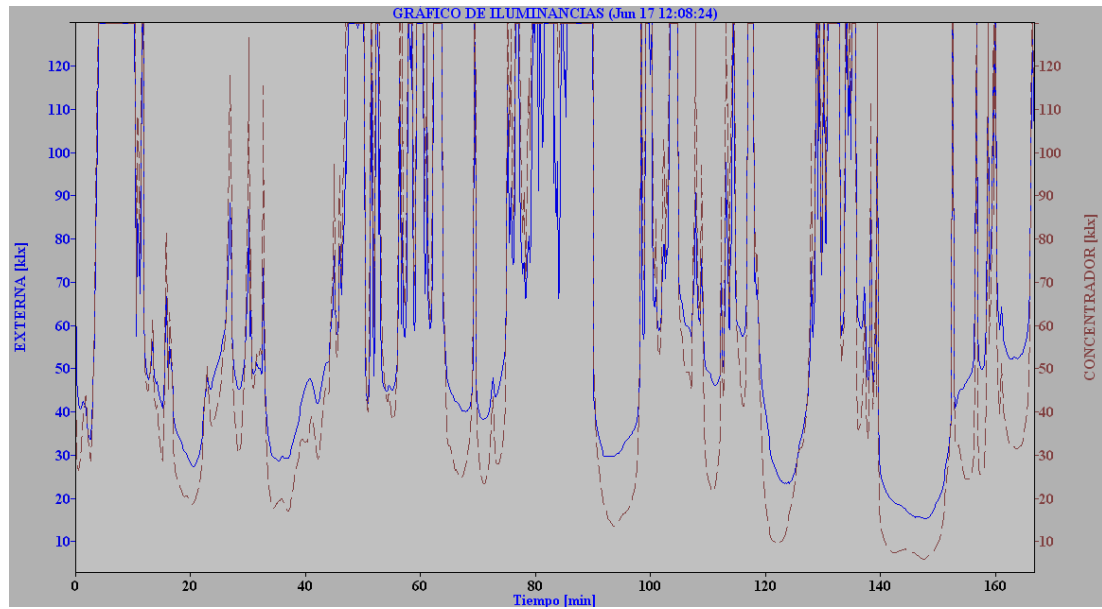


Figura 34. Iluminancia incidente sobre el sistema de transporte de luz natural bajo condiciones de cielo abierto.

En la gráfica de la figura 35 se muestra en detalle el instante para el cual el concentrador ideal alcanza su máxima concentración $C_{m\acute{a}x} = 3.2$ (minuto 84).

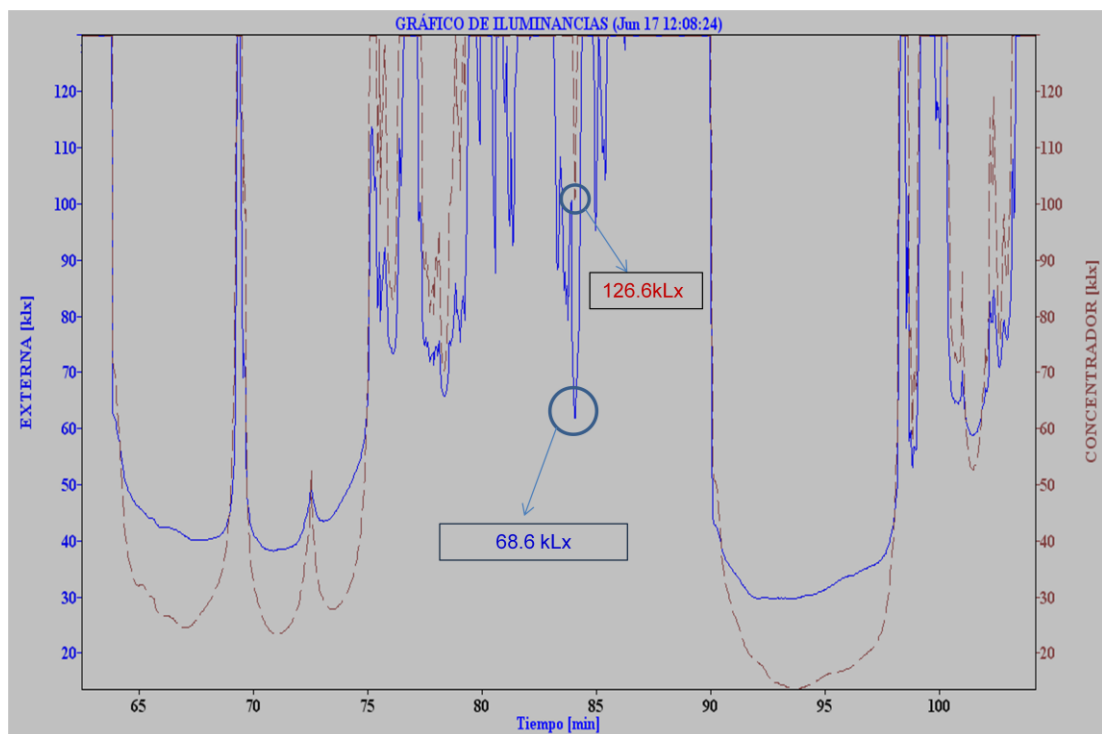


Figura 35. Iluminancias para $C_{m\acute{a}x} = 3.2$.

En la gráfica de la figura 36 se muestra la distribución de los niveles de iluminación que se obtiene al colocar el concentrador sobre área de una bodega agropecuaria de dimensiones 4 m de ancho, 5m de largo y una altura de 3 m para la concentración máxima ($C_{m\acute{a}x} = 3.2$).

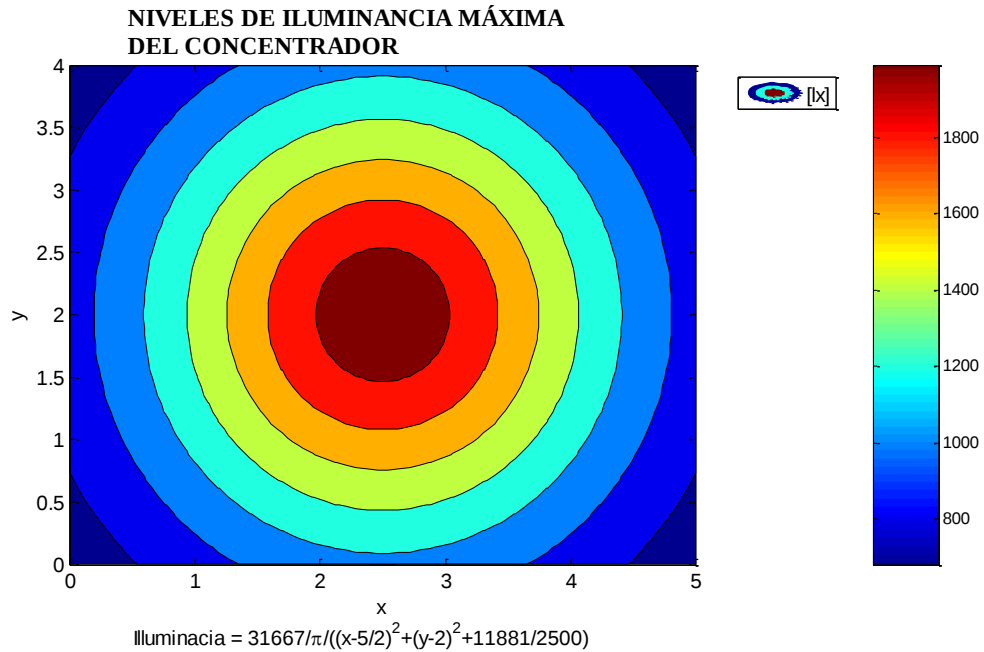


Figura 36. Nivel de iluminancia máxima a la altura del plano de trabajo a 0.82 m. (Jun. 17, 13:32h).

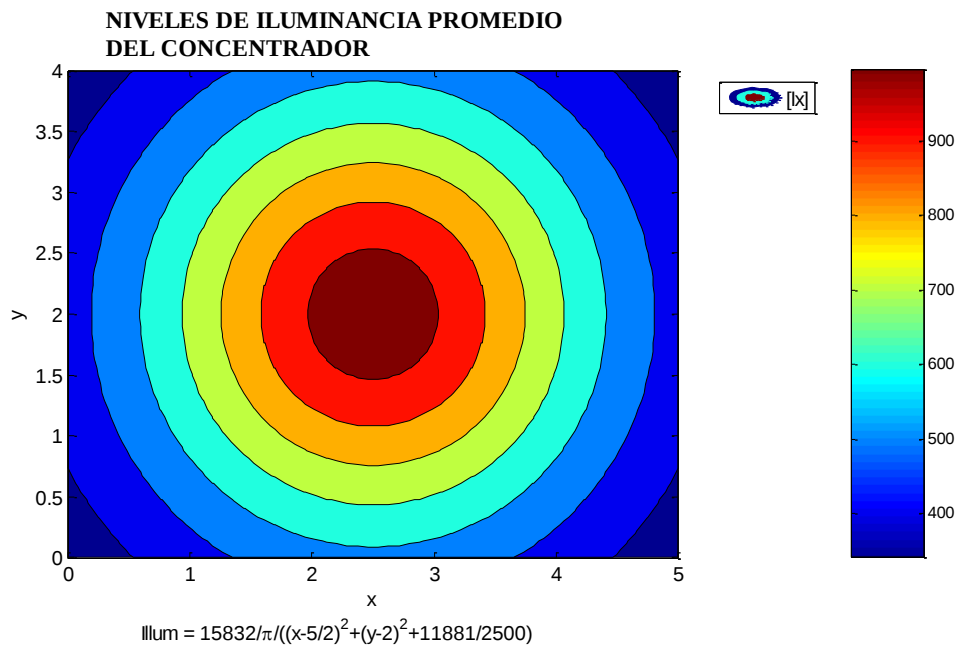


Figura 37. Nivel de iluminancia promedio a la altura del plano de trabajo 0.82 m. (Jun. 17).

En la gráfica de la figura 37 se muestra la distribución de los niveles de iluminación que se obtiene al colocar el concentrador sobre la parte superior de un bodega agropecuaria con dimensiones 4 m de ancho, 5m de largo y una altura de 3 m. para la concentración promedio ($C_{prom} = 1.5$).

Analizando el gráfico 35 que muestra el rendimiento del concentrador cónico cuyas dimensiones se muestran en la tabla 7. Según la metodología planteada se evaluó el comportamiento del mismo bajo condiciones con cielo abierto para conocer la concentración de iluminación natural logrado y verificar que cumpliera con los parámetros de diseño considerados. Fueron medidas la iluminancia exterior que incide sobre la abertura de entrada del concentrador y la iluminancia en la abertura de salida del concentrador.

Los valores para el instante en que el concentrador alcanzó la máxima concentración fueron: la iluminancia exterior incidente sobre la abertura de entrada (e) del concentrador fue igual a 68.6 kLx y de 126.6 kLx sobre la abertura de salida (s) (Figura 35).

Los valores promedios logrado por el concentrador fueron: la iluminancia exterior incidente sobre la abertura de entrada (e) del concentrador fue igual a 66.169 kLx y de 63.328 kLx sobre la abertura de salida (s).

Las áreas consideradas según diámetros de abertura de entrada y de salida del concentrador ideal (A_e y A_s) fueron 0.014 m² y 0.008m² respectivamente.

Con los parámetros de diseño y las mediciones realizadas se encontró que la máxima concentración (C), esta medición fue alcanzada a las 13 horas 32 minutos, el 17 de Junio, en la localidad de Temascaltepec, Estado de México.

La C medida que logró el concentrador prototipo (3D) fue $C_{máx} = 3.6$, la cual si se compara con la concentración teórica (C_{teo}) calculada $C_{teo} = 3.8$, presenta una

diferencia no significativa y se aproxima al valor teórico calculado. La concentración promedio lograda durante el periodo de medición (2h 50 min) fue $C_{prom} = 1.6$, lo que representa un rendimiento promedio de 44.65%.

La C medida que logró el concentrador ideal (3D) fue $C_{m\acute{a}x} = 3.5$, la cual si se compara con la concentración teórica (C_{teo}) calculada $C_{teo} = 3.1$, es superior. La concentración promedio lograda durante la prueba fue $C_{prom} = 1.5$, lo que representa un rendimiento promedio de 48%, a pesar de que la concentración promedio es menor con respecto a la del prototipo.

La gráfica de la figura 37 modela los niveles de iluminación en obtenidos sobre el área de una bodega agropecuaria (5m de ancho x 4m de largo y 3m de altura), para el instante donde se registra $C_{m\acute{a}x}$, se tiene que la iluminancia en el centro de área es 1118.9 Lx y en las esquinas de 534.7 Lx. Considerando $C_{prom} = 1.7$ de la figura 37, tenemos 544.7 Lx para en centro del área y 267.3 Lx para las esquinas de la misma. Por el tipo de actividad desarrollada en el interior de la bodega que no requiere altos niveles de iluminación (<500 lx), por lo que los obtenidos son suficientes, aun en las partes más alejadas de la fuente de iluminación (concentrador).

Concluyendo acerca del rendimiento desarrollado por el concentrador diseñado y evaluado, queda demostrado que es factible utilizar sistemas pasivos de concentración y que éstos son adecuados para coleccionar y transportar luz hacia el interior de edificios donde los seres vivos desarrollan sus actividades y sobre todo lograr un ahorro en el consumo de energía proveniente de fuentes no renovables.

6.3 Iluminación de una bodega agropecuaria

Como se mencionó en secciones anteriores, se empleo el concentrador diseñado para iluminar el plano de trabajo situado a 0.82 m de una bodega

agropecuaria (figura 38) de dimensiones 4m de ancho y 5m de largo la altura fue de 3m.

Se considero la iluminancia promedio y se modeló empleando matlab la distribución de la iluminación al interior de la bodega (figura 39), la vista real se muestra en la figura 38b y 40.

En la figura 40 se muestra el instrumentode adquisicon de datos, la vista real de la iluminancia lograda al interior de la bodega proyectada sobre la pared y la ubicación del sensor a la altura del plano de trabajo.



a. Vista luminoducto-difusor interior de la bodega agropecuaria



b. Nivel de iluminación real obtenida al interior de la bodega.



c. Vista exterior de techo



d. Vista exterior de la bodega

Figura 38. Iluminación de una bodega agropecuaria

La gráfica de la figura 39 muestra los niveles de iluminancia máxima medida a la salida del concentrador instalado sobre el techo de la bodega objeto de

estudio. Los valores de iluminancia superan los 100 klx sobre el borde de la abertura de salida, es decir, el area central del techo de la bodega, en la esquinas las esquinas se logro una iluminancia aproximada igual 5 klx. Los niveles de iluminancia sobre le plano de trabajo al ainerior de la bodega se discuten en la siguiente sección.

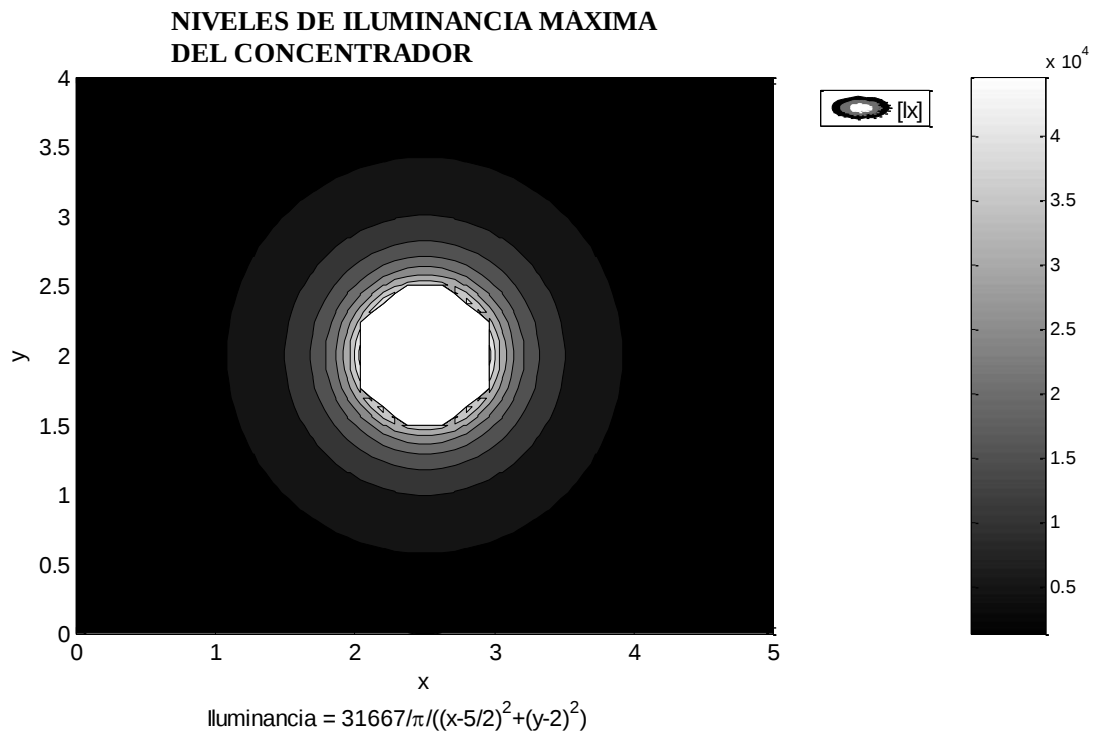


Figura 39. Niveles de iluminancia del sistema



Figura 40. Nivel de iluminancia real del sistema

6.4 Comportamiento del sistema con concentración y sin concentración configuración 1

Los parámetros de diseño de los luminoducto empleados son: diámetro de 101,6 mm y 280 mm de largo. Se muestra en rojo la iluminancia exterior registrada que incidió sobre los sistemas de colección y transporte de luz natural, en azul se observa la iluminancia lograda por el luminoducto con el concentrador y en verde la iluminancia obtenida por el luminoducto sin concentrador.

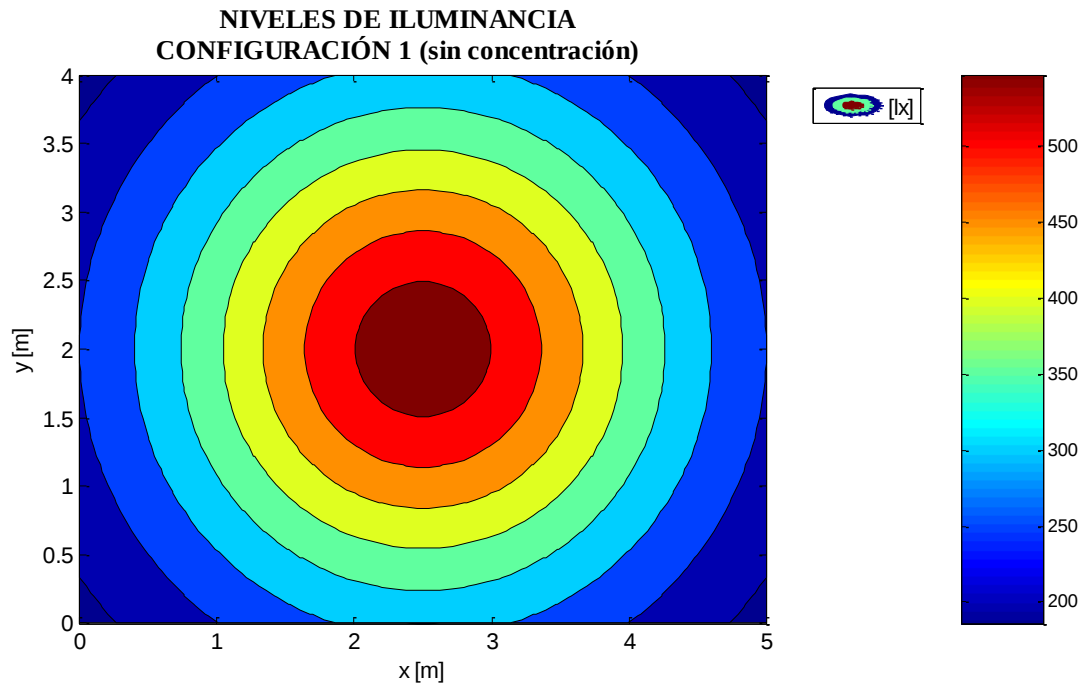


Figura 41. Iluminancia promedio sobre el plano de trabajo del sistema

En la gráfica de la figura 41 se muestran los niveles de iluminación logrados por un luminoducto sin concentración de luz natural de dimensiones antes citadas (configuración 1).

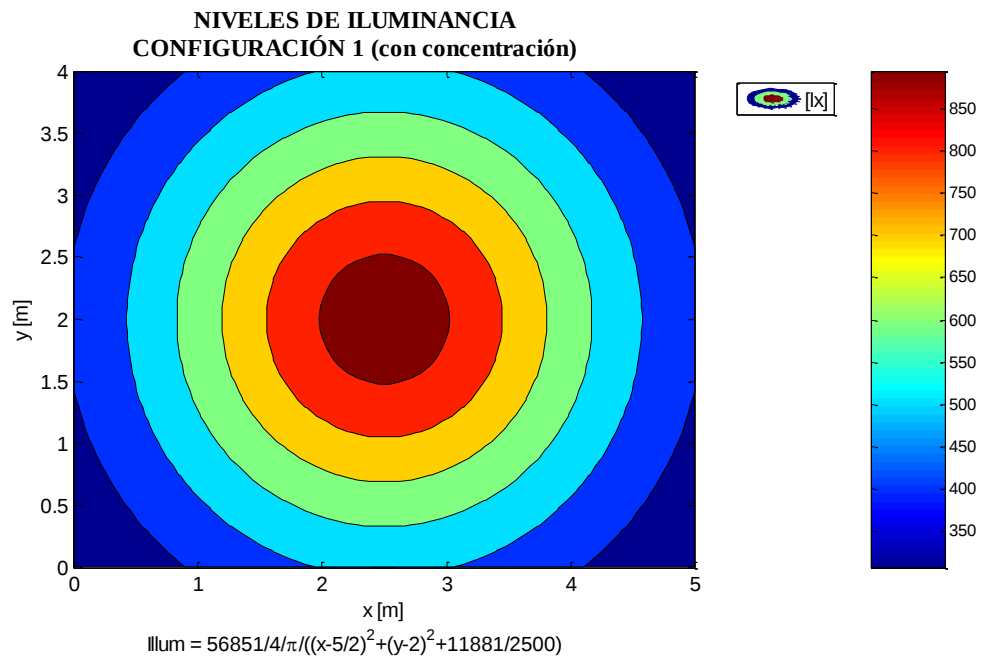


Figura 42. Iluminancia promedio sobre el plano de trabajo del sistema

En la gráfica de la figura 42 se muestran los niveles de iluminación logrados por un luminoducto con concentración de luz natural de dimensiones antes citadas (configuración 1).

Analizando los resultados medidos sobre el rendimiento del sistema (Concentrador-Luminoducto), según la configuración 1 (ver metodología), en la cual se acopla el concentrador a un luminoducto y otro sin concentrador.

Las iluminancias promedio: 80.5 klx, 56.8 klx y 34.5 klx, iluminancia exterior, con concentración y sin concentración respectivamente.

Con respecto a la iluminancia incidente total sobre el sistema, se observó que el sistema sin concentración solo transporta el 42.87 % y un 70.61% para el sistema con concentración, esto representa un incremento del 23.73 % (22.3 klx) en la iluminancia hacia el interior del sistema, con los resultados obtenidos se observa que si existe un incremento significativo en los niveles de iluminación entre el sistema que emplea y el que no concentración de luz natural para su posterior transporte.

En la gráfica de la figura 41 se modela la distribución de los niveles de iluminación obtenidos para el área de una bodega agropecuaria en unidades de iluminancia. En la parte derecha se muestra en color la escala de niveles de iluminación para cada punto del área sujeta a iluminar. Los valores de iluminancia promedio para el luminoducto sin concentrador, 300 lx en el centro y 140 lx en las esquinas. Los valores de iluminancia promedio para el luminoducto con concentrador, 502 lx en el centro y 240 lx en las esquinas.

Finalmente, concluyendo se observó una diferencia superior de 202 lx sobre el plano de trabajo del sistema que emplea concentrador con respecto al que no tiene concentrador.

6.5 Rendimiento del sistema con concentración y sin concentración configuración 2

En la gráfica de la figura 43 se muestra la colección de luz natural bajo condiciones cielo abierto del sistema bajo la segunda configuración, en la cual se empleo 2 Luminoductos recto de 280 mm de largo, diámetro de 101.6 mm los cuales fueron monitoreados para conocer la colección y transporte de luz natural del sistema.

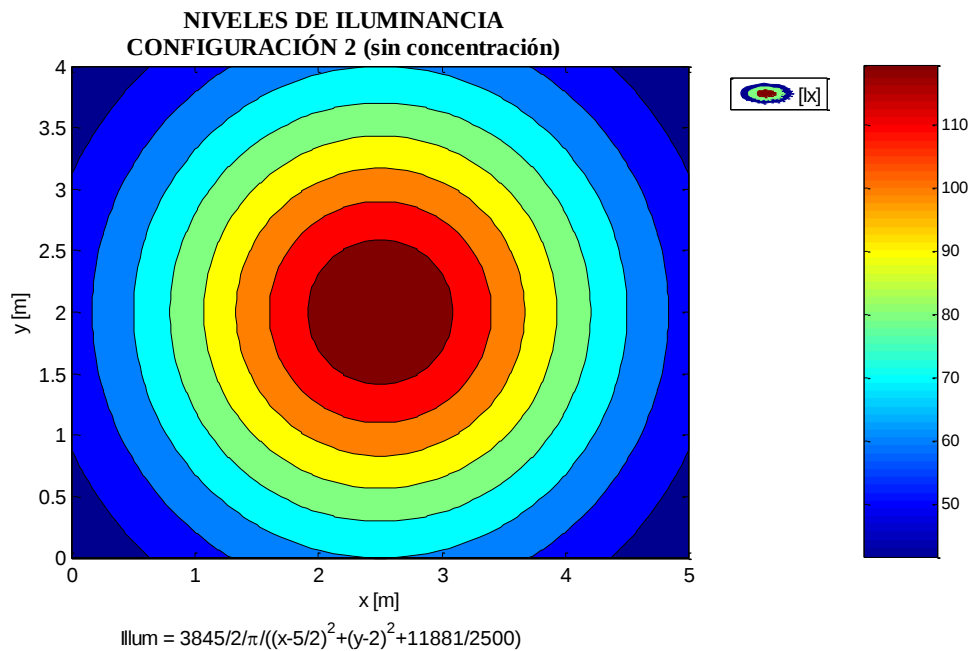


Figura 43. Iluminancia promedio sobre el plano de trabajo del sistema

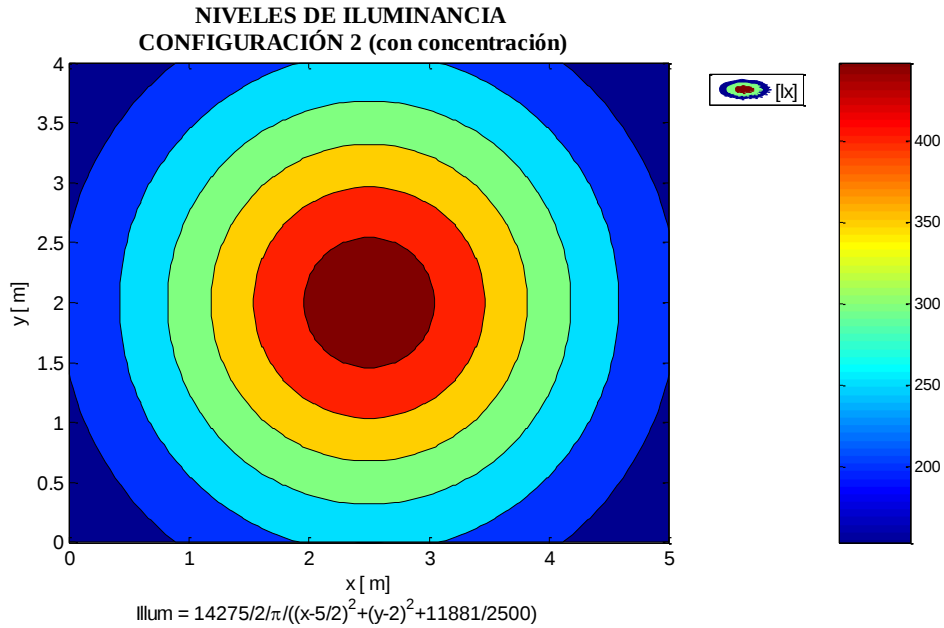


Figura 44. Iluminancia promedio sobre el plano de trabajo del sistema

Analizando los resultados medidos sobre el rendimiento del sistema (Concentrador-Luminoducto), según la configuración 2 (ver metodología), en la cual se acopla el concentrador a un luminoducto y otro sin concentrador.

Se registraron iluminancias promedio: 108,2 kLx, 28,5 kLx y 7,6 kLx, iluminancia exterior, con concentración y sin concentración respectivamente.

Con respecto a la iluminancia incidente total sobre el sistema, se observó que el sistema sin concentración solo transporta el 7,1 % y un 26,38% para el sistema con concentración, esto representa un incremento del 19,63 % (20,860 kLx) en la iluminancia hacia el interior del sistema, con los resultados obtenidos se observa que si existe un incremento significativo en los niveles de iluminación entre el sistema que emplea y el que no concentración de luz natural para su posterior transporte. Por otro lado el incremento en la distancia de transporte de la luz trae como consecuencia una disminución de los niveles de iluminación sobre el plano de trabajo (figura 43).

En la gráfica de la figura 44 se modela la distribución de los niveles de iluminación obtenidos para el área de una bodega agropecuaria en unidades de iluminancia. En la parte derecha se muestra en color la escala de niveles de iluminación para cada punto del área sujeta a iluminar. Los valores de iluminancia promedio para el luminoducto sin concentrador, 67.5 lx en el centro y 2.673 lx en las esquinas. Los valores de iluminancia promedio para el luminoducto con concentrador, 252 lx en el centro y 120.3 lx en las esquinas.

Finalmente, concluyendo se observó una diferencia superior de 184 Lx sobre el plano de trabajo del sistema que emplea concentrador con respecto al que no tiene concentrador. Comparando con respecto a la configuración 1 se observó una disminución a pesar de que la iluminancia externa promedio es superior para la configuración, esto debido al incremento en la distancia de transporte.

6.6 Rendimiento del sistema con concentración y sin concentración configuración 3

Comportamiento del sistema (Concentrador-luminoducto) a la luz natural bajo condiciones cielo abierto. 2 Luminoductos recto de 280 mm de largo, diámetro de 101.6 mm y ángulo de inclinación $\alpha = 45^\circ$.

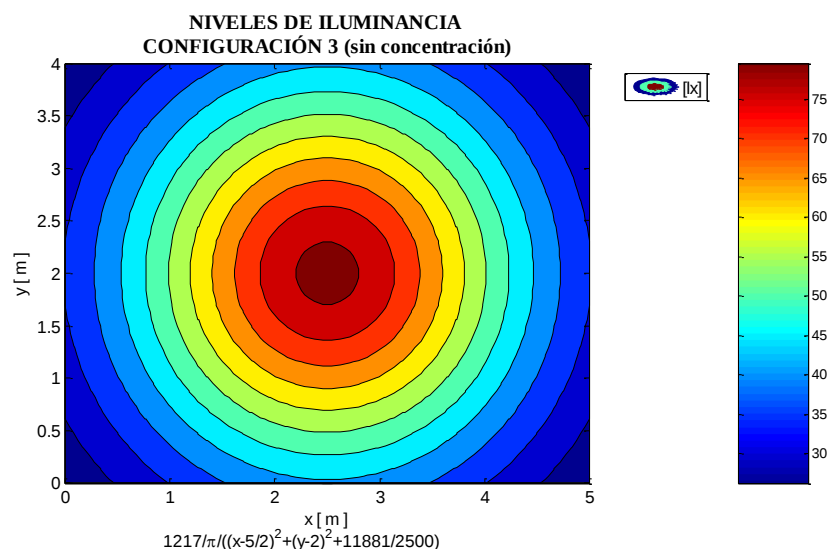


Figura 45. Iluminancia promedio sobre el plano de trabajo del sistema

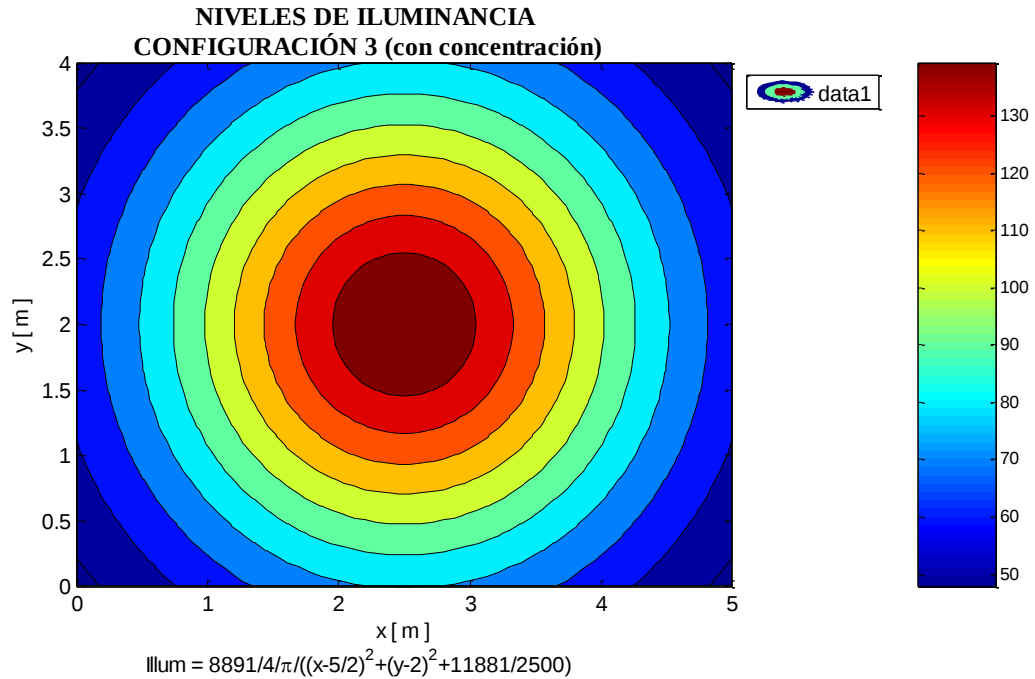


Figura 46. Iluminancia promedio sobre el plano de trabajo del sistema

Analizando los resultados medidos sobre el rendimiento del sistema (Concentrador-Luminoducto), según la configuración 3 (ver metodología), en la cual se acopla el concentrador a un luminoducto y otro sin concentrador, adicionalmente el sistema se inclino a 45°.

Se registraron iluminancias promedio: 64.1 klx, 8.8 klx y 4.8 klx, iluminancia exterior, con concentración y sin concentración respectivamente, figuras 45 y 46.

Con respecto a la iluminancia incidente total sobre el sistema, se observó que el sistema sin concentración solo transporta el 7.58 % y un 13.85% para el sistema con concentración, esto representa un incremento del 6.26 % (4 klx) en la iluminancia hacia el interior del sistema, con los resultados obtenidos se observa que aun existe un incremento, pero muy pequeño en comparación con la configuración 1 y 2 , esto a consecuencia de la inclinación del sistema y de las condiciones de cielo medianamente nublado con lo que los valores de iluminancia son bajos en comparación con las otras configuraciones.

Los valores de iluminancia promedio para el luminoducto sin concentrador, 42.9 lx en el centro y 20.050 lx en las esquinas. Los valores de iluminancia promedio para el luminoducto con concentrador, 78.608 lx en el centro y 36.608 lx en las esquinas.

Finalmente, concluyendo se observó una diferencia superior de 35.6 lx sobre el plano de trabajo del sistema que emplea concentrador con respecto al que no tiene concentrador. Comparando con respecto a la configuración 2 se observó una disminución considerable que es atribuible a la iluminancia externa promedio bajas y a la inclinación del sistema. Respecto de estos resultados sería importante explorar otros valores de inclinación e incrementar las áreas de colección para satisfacer los niveles mínimos de iluminación requeridos para desarrollo de tareas que requieren de 500 lx.

6.7 Parámetros calculados y medidos durante el experimento

En la tabla 9 se muestra los parámetros de diseño de cada configuración empleada durante el experimento, es importante hacer notar que los días de muestreo son diferentes, de ahí el hecho de que los valores de iluminancia presentados sean diferentes. Con la ecuación 2.29 se calculan los factores de concentración para cada configuración.

Tabla 9. Resumen de parámetros calculados y medidos durante el experimento

	Concentrador	Luminoducto Sin concentrador	Luminoducto con concentrador	2 Luminoducto Sin concentrador	2 Luminoducto con concentrador
Iluminancia Exterior [lx]	66170	80508	80508	108200	108200
Iluminancia interior a la salida [lx]	63328	34520	56850	16320	70100
Factor A (L/e) [adm]	0.8	5	5	11	11
Flujo luminoso [lm]	506	276	454	130	560
Iluminancia sobre el plano de trabajo [lx]	1000	600	900	120	500
Factor de concentración promedio diario[adm]	1.53	0.7	1.13	0.13	0.48

6.8 Costos y rentabilidad

En la tabla 10 se muestran los costos estimados de producción para el sistema de transporte de luz natural con la configuración C+L

Tabla 10. Costo de producción estimada

Insumos	Costo (pesos mexicanos)
Concentrador	2 500.00
Luminoducto	250.00
Accesorios (codos, elementos de sujeción, etc.)	250.00
Instalación	1 000.00
Impermeabilización y sellado	1 000.00
Total	5 000.00

Si se utiliza de energía eléctrica para la iluminación de la bodega agropecuaria, se necesitaría un foco incandescente de 100W que estaría encendido 9 hrs/día, con lo que se obtendría un flujo luminoso 1600 lúmenes (Tabla 11). Comparando con los resultados obtenidos al emplear sistemas de iluminación natural ajustando las dimensiones del sistema para igualar el flujo luminoso requerido, se tendría un ahorro anual de \$985.

Tabla 11. Análisis de consumo de energía eléctrica para la bodega agropecuaria

Cantidad	Elemento	Watts	Hrs/día	Total Watts hr/día	Precio unitario por kWh (\$)	Costo anual total (\$)
1	Foco	100	9	900	3	985

Fuente: <http://www.lowes.com/lowes/lkn?action=howTo&p=BuyGuide/LightBulbBG.html>

CONCLUSIONES

A lo largo del presente trabajo se citan varias publicaciones de investigadores en el área de iluminación natural, los cuales incorporan diferentes estrategias para usar e incorporar iluminación natural en el diseño de edificios de acuerdo a las necesidades de sus ocupantes, con la idea clara de mejorar la salud, incrementar la productividad y las ganancias para ser competitivos, así como la disminución en el consumo de energía no renovables. Las conclusiones del presente estudio son las siguientes:

Emplear concentradores de luz natural acoplados a la tecnología de los luminoductos es una solución factible para proveer y mejorar la iluminación de espacios interiores de edificios.

Acoplar un concentrador de luz natural con perfil cónico a luminoducto, mejora la eficiencia e incrementa la tasa de iluminación. Los aspectos críticos que determinan la concentración de luz natural es el ángulo de aceptación del concentrador, que fue de $45,68^\circ$ para este estudio. Además de la orientación y reflectividad de la superficie del concentrador y del luminoducto

Los valores para el instante en que el concentrador alcanzo la máxima concentración fueron: iluminancia exterior incidente sobre la abertura de entrada (e) del concentrador fue igual a 68,6 klx y de 126,6 klx sobre la abertura de salida (s).

Los valores promedios logrado por el concentrador fueron: la iluminancia exterior incidente sobre la abertura de entrada (e) fue igual a 66,1 klx y de 63,3 klx sobre la abertura de salida (s).

La C medida que logro el concentrador prototipo (3D) fue $C_{m\acute{a}x} = 3,6$, la cual si la comparamos con la concentración teórica (C_{teo}) calculada $C_{teo} = 3,8$, presenta una diferencia no significativa y se aproxima al valor teórico calculado, es decir, el concentrador desarrolló un rendimiento del 94%. La concentración promedio

diaria fue $C_{prom} = 1,7$, lo que representa un rendimiento promedio de 44,65% con respecto a la calculada.

Esta investigación ha demostrado que el empleo de un concentrador de luz natural acoplado a luminoductos puede incrementar la iluminancia de interiores, lo cual tiene un potencial en la reducción del consumo de energía eléctrica.

Usando el sistema de iluminación natural pasivo es capaz de mejorar la iluminación en interiores, los valores obtenidos son suficientes para la iluminación ambiental (300-500 lux).

Concluyendo acerca del rendimiento desarrollado por el concentrador diseñado y evaluado, queda demostrado que es factible utilizar sistemas pasivos de concentración y que estos son adecuados para coleccionar y transportar luz hacia el interior de edificios donde los seres vivos desarrollan sus actividades y sobre todo lograr un ahorro en el consumo de energía proveniente de fuentes no renovables.

Finalmente, sería importante el seguimiento del presente trabajo, considerando los problemas tecnológicos, costos, funcionamiento y calidad de luz antes de seleccionar cualquier sistema incluido el objetivo del presente.

Direcciones futuras probables de esta investigación.

Empleo de otros concentradores con la tecnología de luminoductos para transportar la luz a mayores distancias (e.g. sistemas activos).

Modelos matemáticos pueden desarrollarse con los valores medidos de la disponibilidad de luz natural diaria del sistema para el control de un sistema seguidor de sol para adaptarse a este sistema y mejorar su rendimiento.

Estudios psicológicos y fisiológicos de seres vivos que defina el mejor beneficio al exponerlos a la luz natural.

Estudios económicos para determinar la relación beneficio- costo relativo al emplear sistemas pasivos versus activos para ahorro de energía y análisis del ciclo de vida de los seres vivos.

LITERATURA CITADA

1. Aizemberg, J. B. (1997 b). Principal New Hollow Light Guide System "Heliobus" for Daylighting and Artificial Lighting of Central Zones of Multi Storey Z. *Light & Engineering / Svetotekhnika* .
2. Aizemberg, J. B., Bukhman, G. B., Korobko, A. A., & Pyatigorsky, V. M. (2003). Long Hollow Light Guides: State-of-the-art. *Light & Engineering / Svetotekhnika* , 11, 47-58.
3. Aizenberg, J. B. (2000). From the History of Hollow Light Guides and Their Efficient Applications. *Light & Engineering* , 8, 35-48.
4. ALANOD (2005) Miro-Silver for Light-Pipe Applications. www.alanod.co.uk/alanod_uk.html
5. Ayers, M. J., & Carter, D. J. (1995). Remote Source Electric Lighting Systems: A Review. *Lighting Research Technology* , 27, 1-15.
6. Begemann, S. H., Van den Beld, G. J., & Tenner, A. D. (1997). Daylighting Artificial Light and People in an Office Environment, Overview of Visual and Biological Responses. *International Journal of Industrial Ergonomics* , 20, pág. 3.
7. Bennett, D., & Eijadi, D. (1980). Solar Optics: Projecting light into Buildings. *AIA Journal* , 69, págs. 72-74.
8. Bodart, M., & De Herde, A. (2002). Global Energy Savings in Offices Buildings by the Use of Daylighting. 34, págs. 421-431. Canada: Research Council Canada. Energy and Buildings.
9. Born, M., & Wolf, E. (1975). Principles of Optics. New Physical Optic Notebook. *Pergamon Press* .
10. Boyce, P., & Cuttle, C. (1998). Effect of Correlated Colour Temperature on the Perception of Interiors and Colour Discrimination Index. *Lighting Research & Technology* , 22, 19-36.

11. Callow, J. M., & Shao, L. (2003). Air-Clad Optical Rod Daylighting System. *Lighting Research & Technology* , 35, 31-38.
12. Canziani, R., Peron, F., & Rossi, G. (2004). Daylight and Energy Performances of a New Type of Light Pipe. *Energy and Buildings* , 36, 1163-1176.
13. Carter, D. J. (2001). The Design of Passive Solar Light Pipes Systems. *School of Architecture University of Liverpool* .
14. Carter, D. J. (2002). The Measured and Predicted Performance of Passive Solar Light-Pipe Systems. *Lighting Research and Technology* , 34, 39-52.
15. CIBSE. (Septiembre de 2003). *Building Journal* .
16. CIE. (1970). Technical Report. Daylight. *International Commission on Illumination* .
17. CIE, C. I. (1978). *Light as a True Visual Quantity: Principles of Measurement*. París: CIE.
18. CIE, C. I. (1993). *Method of Measuring and Specifying Colour Rendering Properties of Light Sources*. Vienna: CIE.
19. Davis, D.E. (1978). Social Behavior in a Laboratory Environment. In: National Research Council Institute of Laboratory Animal Resources. Laboratory Animal Housing. Washington, DC: *National Academy of Sciences*, 44-64.
20. Edmonds, I. R., Reppel, J., & Jardine, P. (1997 a). Extractors and Emitters for Light Distribution from Hollow Light Guides. *Lighting Research and Technology* , 29, 23-32.
21. Electro-optics (1980), *Handbook*.
22. García Hansen, V. (2006). Innovative Daylighting Systems for Deep-Plan Commercial Buildings. *School of Design Queensland University of Technology*. PhD.

23. Gleckman, P., O'Gallagher, J., & Winston, R. (1989). Concentration of Sunlight to Solar Surface Levels Using Nonimaging Optics. *Nature* , 339, 198.
24. Goulding, J. R., Lewis, O., & Steemers, T. C. (1994). *Energy in Architecture. The European Passive Solar Handbook. B.T.* London: Batsford Limited for the Commission of the European Communities.
25. Jenkins, D., & Muneer, T. (2003). Modelling Light-Pipe Performances. A Natural Daylighting Solution. *Building and Environment* , 38, 965-972.
26. Jenkins, D., & Munner, T. (2004). Light-Pipe Prediction Methods. Applied Energy. *Building and Environment* , 79, 77-86.
27. Jutta Schade, E. A. (2002). *Daylighting by Optical Fiber*. Lulea: Engineering-Division of Water Resources Engineering. Lulea University of Technology.
28. Mc Sheehy, T. (1983) Overview of the State-of-the-Art in Environmental Monitoring. In: Melby, E.C. Jr. and Balk, M.W., eds. The Importance of Laboratory Animal Genetics, Health, and the Environment in Biomedical Research. Toronto, Ont.: *Academic Press*, 161-182.
29. Mohammed, A. M., & Carter, D. (2006). Tubular Guidance Systems for Daylighting: Achieved and Predicted Installation Performances. *Elsevier Science* , 83 (7), 774-788.
30. Monodraught. (2005). Sunpipes. Natural Daylight where Windows Can't Reach. *Sunpipe* .
31. Monodraught. (2007). Windcatcher. Natural Ventilation Systems. *Sunpipe* .
32. Muhs, J. D. (2000). *Design and Analysis of Hybrid Solar Lighting and Full-Spectrum Solar Energy Systems*. Madison: Proceedings of American Solar Energy. "Solar 2000 Conference".

33. Oakley, G., Riffat, S. B., & Shao, L. (2000). Daylighting Performance of Lightpipes. *Solar Energy* , 69, 89-98.
34. Ries, H., Leike, I., & Muschaweck, J. (2004). Optimized Additive Mixing of Colored Light-Emitting Diode Sources. *Society of Photo-Optical Instrumentation Engineers* , 43 (7), 1531-1536.
35. Rosemann, A., & Kaase, H. (2005). Lightpipe Applications for Daylighting Systems. *Solar Energy* , 78, 772-780.
36. Shao, L., Elmualim, A. A., & Yohannes, I. (1998). Mirror Lightpipes: Daylighting Performance in Real Buildings. *Lighting Research and Technology* , 30, 37-40.
37. Shigley, J. E., & Mischke, C. R. (2002). *Diseño en Ingeniería Mecánica* (Sexta ed.). México: McGraw-Hill/Interamericana Editores, S.A de C.V.
38. Siegel, R., & Howell, J. R. (1981). *Thermal Radiation Heat Transfer*. New York: Hemisphere Publishing Corporation.
39. Sizmann, R., Winter, C. J., & Vant-Hull, L. L. (1990). *Solar Power Plants*. Berlín: Springer Verlag.
40. Skydome (2005). New Generation Skylight. www.skydome.com.au.
41. Solatube (2005a) Daylighting for Everyday Living. www.solatube.com/downloads/Catalog_SinglesPgs.pdf
42. Solatube (2005b) The New Improved Solatube. www.nwnaturallighting.com/solatube-spectrallightinfinity.html
43. Tsangrassoulis, A., Doulos, L., Santamouris, M., Fontoynt, M., Maamari, F., Wilson, M., y otros. (2005). On the Energy Efficiency of a Prototype Hybrid Daylighting System. *Solar Energy* , 79, 56-64.
44. Welford, W. T., & Winston, R. (1989). *High Collection Nonimaging Optics*. New York: Academic Press.

45. Whitehead, L. A. (1994). Brief History of Illumination with Hollow Light Guides. *Energy and Building* .
46. Whitehead, L. A., Brown, D. N., & Nodwell, R. A. (1984). A New Device for Distributing Concentrated Sunlight in Building Interiors. *Energy and Building* , 6, 119-125.
47. Winston, R., Miñano, J. C., Benítez, P., Shatz, N., & Bortz, J. C. (2005). Nonimaging Optics. *Elsevier Academic Press* .
48. Zastrow, Z., & Wittmer, V. (1986). Daylighting with Mirror Pipes and with Fluorescent Planar Concentrators. *International Society for Optical Engine* , 692, 227-234.
49. Zhang, X., & Munner, T. (2000). Mathematical Model for the Performance of Light Pipes. *Lighting Research and Technology* , 32, 141-146.
50. Zhang, X., Munner, T., & Kubie, J. (2002). A Design Guide for Performance Assessment of Solar Light-Pipes. *Lighting Research Technology* , 34, 149-169.

ANEXOS

Anexo 1. Cantidades fotométricas, unidades y estándares. Símbolos, nombres y unidades

En la tabla 12 se muestran las cantidades básicas fotométricas, definición, unidades y símbolos.

Tabla 12. Unidades y cantidades fotométricas

Cantidad	Símbolo	Ecuación	Unidades (SI)	Símbolo (SI)
Energía luminosa (cantidad de luz)	Q, Q_v	$Q_v = \int K(\lambda) V(\lambda) d\lambda$ Cuando $K(\lambda) = 683$ eficacia luminosa	Lumen.second (talbot)	lm.s
Densidad luminosa	W, W_v	$w = \frac{\partial Q}{\partial V}$	Lumen.second por metro cúbico	lm.s.m ⁻³
Flujo luminoso	F, F_v	$\Phi = \frac{\partial Q}{\partial t}$	lumen	lm
Densidad de flujo luminoso en una superficie				
Exitancia luminosa (antes emitancia luminosa)	M, M_v	$M = \frac{\partial \Phi}{\partial A}$	Lumen por metro cuadrado	lm.m ²
Iluminancia (antes iluminación)	E, E_v	$E = \frac{\partial \Phi}{\partial A}$	Lux (lumen por metro cuadrado)	lx
Intensidad luminosa (antes candela)	I, I_v	$I = \frac{\partial \Phi}{\partial \omega}$ (ω =ángulo sólido radiado desde una fuente de luz)	Candela (lumen por estereoradián)	cd
Luminancia (antes brillo fotométrico)	L, L_v	$L = \frac{\partial^2 \Phi}{\partial \omega \partial A \cos \theta}$ $= \frac{\partial I}{\partial A \cos \theta}$ (θ =ángulo entre la línea de visión y la normal para la superficie de emisión considerada)	Nit (candela por metro cuadrado o lumen por estereorradián y metro cuadrado)	nt
Eficacia luminosa	K	$K = \frac{\Phi_v}{\Phi_e}$	Lumen por watt	lm.W ⁻¹
Eficacia espectro luminoso	$K(\lambda)$	$K(\lambda) = \frac{\Phi_v \lambda}{\Phi_e \lambda}$	Lumen por watt	lm.W ⁻¹
Eficiencia luminosa	$V(\lambda)$	$V = \frac{K(\lambda)}{K(\lambda_{max})}$ $K(\lambda_{max})$ =máximo valor de la función $K(\lambda)$	(numérico)	

Considerando que las cantidades radiométricas Φ_e , M_e , I_e , L_e , y E_e tienen significado a través de los enteros del espectro electromagnético, sus contrapartes fotométricas Φ_v , M_v , I_v , L_v , y E_v son significativas solamente en la parte visible del espectro ($0,38\mu\text{m} < \lambda < 0,77\mu\text{m}$).

NOTA: los símbolos para cantidades fotométricas son las mismas que para sus correspondientes en cantidades radiométricas. Cuando es necesario diferenciar entre ambas se utiliza el subíndice **v** para indicar cantidades fotométricas y **e** para cantidades radiométricas, e.g. Q_v y Q_e .

Estándares fotométricos

La candela

El **estándar candela** ha sido redefinido como la **nueva candela** o **candela (cd)**. Una candela es la intensidad luminosa de 1/60 de 1 cm^2 del área proyectada por un cuerpo radiante negro operando a la temperatura de solidificación del platino (2045°K). La candela emite un lumen por estereorradián (1 lm. sr^{-1}).

Note que la intensidad luminosa emanada de una fuente con una distribución espectral que difiere de la candela podría ser evaluado utilizando un sensor con una respuesta espectral relativa idéntica al estándar de la visión fotópica.

El lumen

El **lumen (lm)** está definida en términos de la candela. El flujo luminoso por estereorradián desde una fuente cuya intensidad luminosa es de 1 candela, de 1 lumen.

Iluminancia, exitancia luminosa y luminancia

Una representación esquemática de las relaciones de unidades fotométricas comúnmente empleadas se muestra en la figura 47.

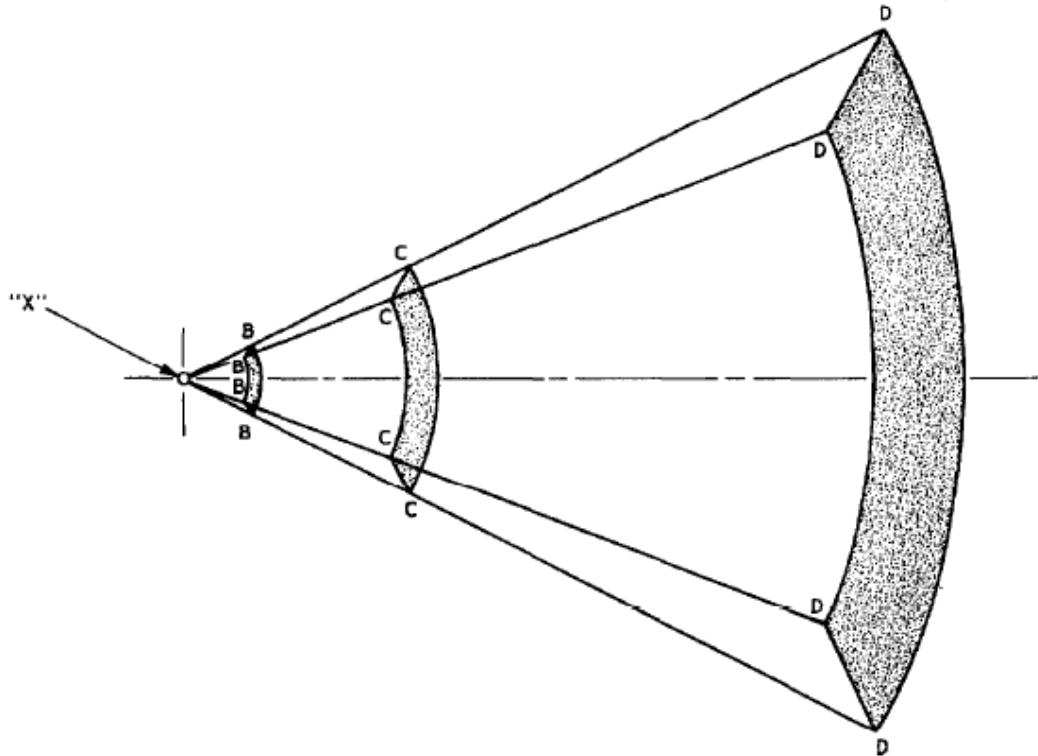


Figura 47. Representación esquemática de varias unidades fotométricas (cortesía de la oficina nacional de estándares)

X representa la fuente, tiene una intensidad lineal de una candela. El ángulo sólido mostrado representa un estereorradián.

Punto “X” a cualquier punto “B” es de 1 cm; la superficie representada por “BBBB” es de 1 cm^2 .

Punto “X” a cualquier punto “C” es de 1 ft; la superficie representada por “CCCC” es de 1 ft^2 .

Punto “X” a cualquier punto “D” es de 1 m; la superficie representada por “DDDD” es de 1 m^2 .

Unidades de iluminancia

La **iluminancia**, $E = \frac{d\Phi}{dA}$, es llamada algunas veces iluminación. (Note la diferencia que dA presenta, en la definición para E es la diferencial de área que recibe el flujo $d\Phi$; en la definición para M (exitancia luminosa) es la diferencial de área que emite el flujo $d\Phi$. El lux (unidad del SI) es la unidad de iluminancia resultante del flujo de 1 lumen al caer sobre una superficie representada por “DDDD” desde “X” =1 candela.

El **pie-candela** es la unidad de iluminancia resultante del flujo de 1 lumen al caer sobre una superficie representada por “CCCC” desde “X”=1 candela. El **fotón** es la unidad de iluminancia resultante del flujo de 1 lumen al caer sobre una superficie representada por “BBBB” desde “X”=1 candela.

Tabla 13. Factores de conversión para el lux, el pie-candela y el fotón

		Lux (lx)	Pie-candela (fc)	Fotón (ph)
1 lux (lm.m ⁻²) (lx)	=	1	0,0929	1 x 10 ⁻⁴
1 pie-candela (lm.ft ⁻²) = (fc)		10,764	1	0,001076
1 fotón (lm.cm ⁻²) (ph)	=	1 x 10 ⁴	929	1

Unidades de la exitancia luminosa

La expresión $M = \frac{d\Phi}{dA}$, muestra la salida del flujo luminoso por unidad de área.

Se aplica para cuerpos luminiscentes o reflectivos.

En referencia a la figura 47 y asumiendo que el 100% del flujo luminoso “X” (1 candela en todas direcciones) es reflectado en las superficies representadas por “DDDD”, “CCCC” o “BBBB”, entonces tenemos que:

1. “DDDD” tendrá una exitancia de 1 lumen/ metro².
2. “CCCC” tendrá una exitancia de 1 lumen / pie².
3. “BBBB” tendrá una exitancia de 1 lumen/ centímetro².

La tabla 14 muestra los factores de conversión utilizados comúnmente para cantidades de exitancia luminosa.

Tabla 14. Factores de conversión utilizados en cantidades de exitancia luminosa

	lm.m^{-2}	lm.ft^{-2}	lm.cm^{-2}
$1 \text{ lm.m}^{-2} =$	1	0,0929	1×10^{-4}
$1 \text{ lm.ft}^{-2} =$	10,764	1	0,001076
$1 \text{ lm.cm}^{-2} =$	1×10^{-4}	929	1

Unidades de luminancia (Anteriormente llamada brillo)

La expresión $L = \frac{dI}{dA} \cos \theta$, es la intensidad luminosa proyectada sobre el área normal de la línea de observación. Haciendo referencia a la figura 47 y asumiendo que el 100% de flujo luminoso desde “X” (1 candela en todas direcciones) es reflejado de forma perfectamente difusa (ley de Lambert) por la superficie representada por “DDDD”, o “BBBB”, entonces:

1. “DDDD” tendrá una luminancia direccionalmente uniforme de 1 apostilb o $\left(\frac{1}{\pi}\right)$ candela / m^2 , que es $\left(\frac{1}{\pi}\right)$ nit (SI).
2. “CCCC” tendrá una luminancia direccionalmente uniforme de 1 footlambert o $\left(\frac{1}{\pi}\right)$ candela / ft^2 .
3. “BBBB” tendrá una luminancia direccionalmente uniforme de 1 lambert o $\left(\frac{1}{\pi}\right)$ candela / cm^2 , que es $\left(\frac{1}{\pi}\right)$ stilb.

El factor π en esta expresión resulta de la integración del flujo por unidad de área y el ángulo sólido desde un emisor Lambertiano sobre un ángulo sólido de 2π estereoradianes. Así:

$$M = \int_0^{2\pi} (L \cos \theta) 2\pi \sin \theta d\theta = \pi L$$

Cuando M es la exitancia en lm.m^{-2} y L es la luminancia en $\text{lm.sr}^{-1}.\text{m}^{-2}$.

Tabla 15. Factores de conversión comúnmente utilizadas para las unidades de luminancia

	nit (nt)	stilb (sb)	apostilb (asb)	lambert (L)	mililambert (mL)	footlambert (fL)	candela por pie cuadrado (cd.ft⁻²)
1 nit (cd.m ⁻² o 1 m.sr ⁻¹ .m ⁻²) (nt)	1	1 x 10 ⁻⁴	3.1416	3.1416 x 10 ⁻⁴	0.31416	0.2919	0.0929
1 stilb (cd.m ⁻²) (sb)	1 x 10 ⁻⁴	1	3.1416 x 10 ⁻⁴	3.1416	3141.6	2919	929
1 apostilb (π ⁻¹ .cd.m ⁻²) (asb)	0.3183	3.183 x 10 ⁻⁵	1	1 x 10 ⁻⁴	0.1	0.0929	0.02957
1 lambert (π ⁻¹ .cd.cm ⁻²) (L)	3183	0.3183	1 x 10 ⁻⁴	1	1000	929	295.7
1 mililambert (mL)	3.183	3.183 x 10 ⁻⁴	10	0.001	1	0.929	0.2957
1 footlambert (π ⁻¹ .cd.ft ⁻²) (fL)	3.426	3.426 x 10 ⁻⁴	10.764	0.0010764	1.0764	1	0.3183
1 candela por pie cuadrado (cd.ft ⁻²)	10.764	0.0010764	33.82	0.003382	3.382	3.1416	1

Fuentes de radiación

El sol

La irradiancia del sol E justo afuera de la atmósfera terrestre es:

= 1390 W.m^{-2} distancia promedio de la tierra al sol.

= 1438 W.m^{-2} en el perihelio (3 de enero 1965).

= 1345 W.m^{-2} en el afelio (3 de julio 1965).

En términos de E_λ la irradiancia espectral del sol fuera de la atmósfera es:

$$E = \int_0^\infty E_\lambda d\lambda \quad (1)$$

La figura 48 muestra E_λ para la distancia promedio de la tierra al sol y también demuestra un efecto promedio de la atenuación y absorción atmosférica a nivel del mar con el sol en el zenith.

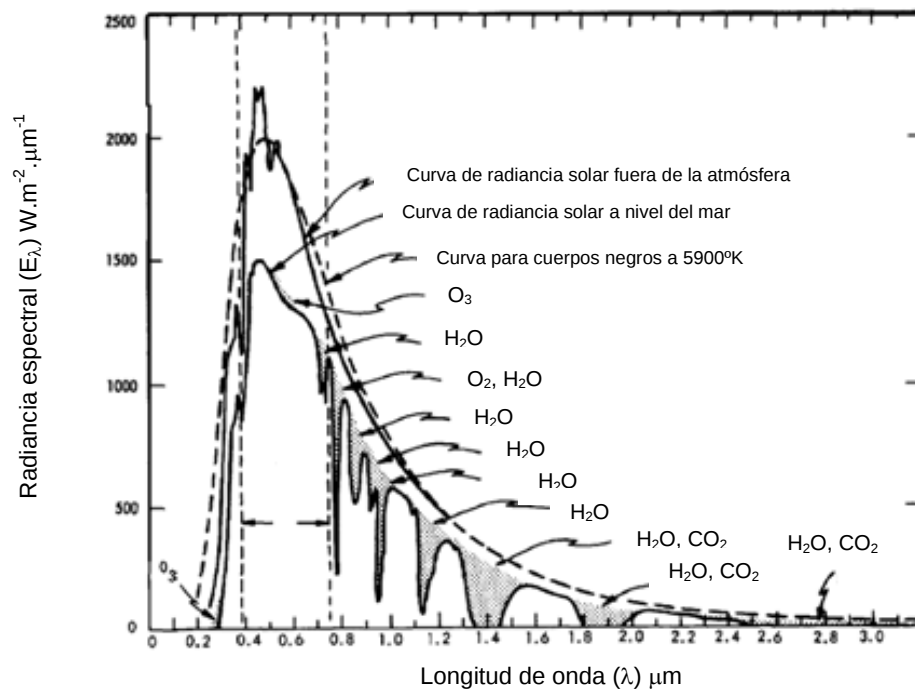


Figura 48. Radiancia espectral E_λ del sol promediada en la distancia de la tierra al sol. Las áreas sombreadas indican la absorción a nivel del mar debido a los componentes de la atmósfera

Una exhaustiva serie de medidas de iluminancia solar en la superficie de la tierra realizada por D.R.E. Brown (p. 165), indican una iluminancia sobre una superficie horizontal, a nivel del mar, con el sol en el zenith y “comparativamente” con un cielo claro de:

$$E = 1.24 \times 10^5 \text{ lux (lm.m}^{-2}\text{)} \quad (2)$$

Se puede notar que en la ecuación 1, la variación máxima de este promedio es causado por los cambios anuales de la distancia de la tierra al sol, y es menor a $\pm 3.5\%$. La irradiancia solar sobre la superficie de la tierra depende del ángulo de altitud del sol sobre el horizonte, de la altitud del observador sobre el nivel del mar y de la cantidad de polvo, neblina y nubes en el cielo. La tabla 16 resume los resultados obtenidos por Brown para varios ángulos del sol sobre el horizonte.

Tabla 16. Niveles de iluminancia en la superficie de la tierra debido al sol

Ángulo real de la altitud (centro del sol) grados	Iluminancia sobre una superficie horizontal E Lux(lm.m ⁻²)	Observaciones
-18	6.51×10^{-4}	Un límite más bajo del crepúsculo astronómico.
-12	8.31×10^{-3}	Un límite más bajo del crepúsculo náutico.
-6	3.40	Un límite más bajo del crepúsculo civil.
-5	10.8	
-0.8	453	Amanecer u Ocaso
0	732	
5	4760	
10	1.09×10^4	
15	1.86×10^4	
20	2.73×10^4	
25	3.67×10^4	
30	4.70×10^4	
35	5.70×10^4	
40	6.67×10^4	
45	7.59×10^4	
50	8.50×10^4	
55	9.40×10^4	
60	10.2×10^4	
65	10.8×10^4	
70	11.3×10^4	
75	11.7×10^4	
80	12.0×10^4	
85	12.2×10^4	
90	12.4×10^4	

El cielo

En un día claro, cerca de un quinto de la iluminación total E en la superficie de la tierra es del cielo, es decir, de la luz del sol dispersada por la atmósfera terrestre. La tabla 17, muestra algunos niveles de iluminancia para un cielo de día y de noche bajo diversas condiciones.

Tabla 17. Iluminancia natural

Condición del cielo	Niveles aproximados de iluminancia lux (lm.m^{-2})
Luz solar directa	$1 - 1.3 \times 10^5$
Luz natural total (no directa del sol)	$1 - 2 \times 10^4$
Día nublado	10^3
Día muy oscuro	10^2
Crepúsculo	10
Crepúsculo profundo	1
Luna llena	10^{-1}
Luna creciente	10^{-2}
Cielo nocturno claro	10^{-3}
Cielo nocturno nublado	10^{-4}

La tabla 18 muestra los valores aproximados de la luminancia L del cielo cerca del horizonte bajo diferentes condiciones. El concepto de luminancia aplicado al cielo puede no ser fácilmente evidente con respecto a la localización del área implicada por m^2 o del ápice del ángulo sólido implicado para el uso de la candela. Esta dificultad podría ser resuelta considerando el método utilizado para medir la luminancia del cielo.

Tabla 18. Valores aproximados de luminancia del cielo cercano al horizonte bajo diferentes condiciones

Condiciones del cielo	Valores aproximados de luminancia nit(cd.m^{-2})
Día claro*	10^4
Día nublado	10^3
Día nublado muy espeso	10^2
Puesta del sol, día nublado	10
¼ de hora antes de la puesta del sol. Día claro	1
½ hora antes de la puesta del sol. Día claro	10^{-1}
Claro de luna brillante	10^{-2}
Cielo nocturno claro	10^{-3}
Cielo nocturno nublado	10^{-4}

*La superficie sobre la neblina o las nubes también puede tener este valor.

Asuma un fotómetro, el cual mide iluminancia en la tierra. Restringimos el fotómetro a una abertura conveniente tal que en un punto, en su área sensible, pueda ser un ángulo sólido (ω) relativamente pequeño. Considere un área de cielo A_s localizado a una distancia S del observador, tal que el ángulo sólido $\omega = \frac{A_s}{S^2}$. Si la luminancia del cielo es L nits (cd.m^{-2}), la intensidad luminosa total del área A_s es $A_s \cdot L$ y la iluminancia del punto de observación en un plano normal a la línea de visión es: $E = \frac{A_s L}{S^2} = L\omega$. Así $L = \frac{E}{\omega}$. Porque el ángulo sólido es medido del punto de observación, la distancia del cielo no se requiere; solamente son necesarios las medidas para E y ω .

En un día claro el color de la temperatura del cielo es aproximadamente de 20,000 a 25,000°K. La intensidad de la dispersión de la luz del cielo varía inversamente con la cuarta potencia, cuando la medida de las partículas en la atmósfera causantes de la dispersión está en el orden de la magnitud de la onda de luz. Porque las ondas cortas corresponden a los colores azul y violeta, éstas se dispersan más que las ondas largas de la luz roja, el color del cielo es predominantemente azul. En la figura 49 se muestra la distribución espectral del cielo claro y de un cuerpo negro a 25,000°K.

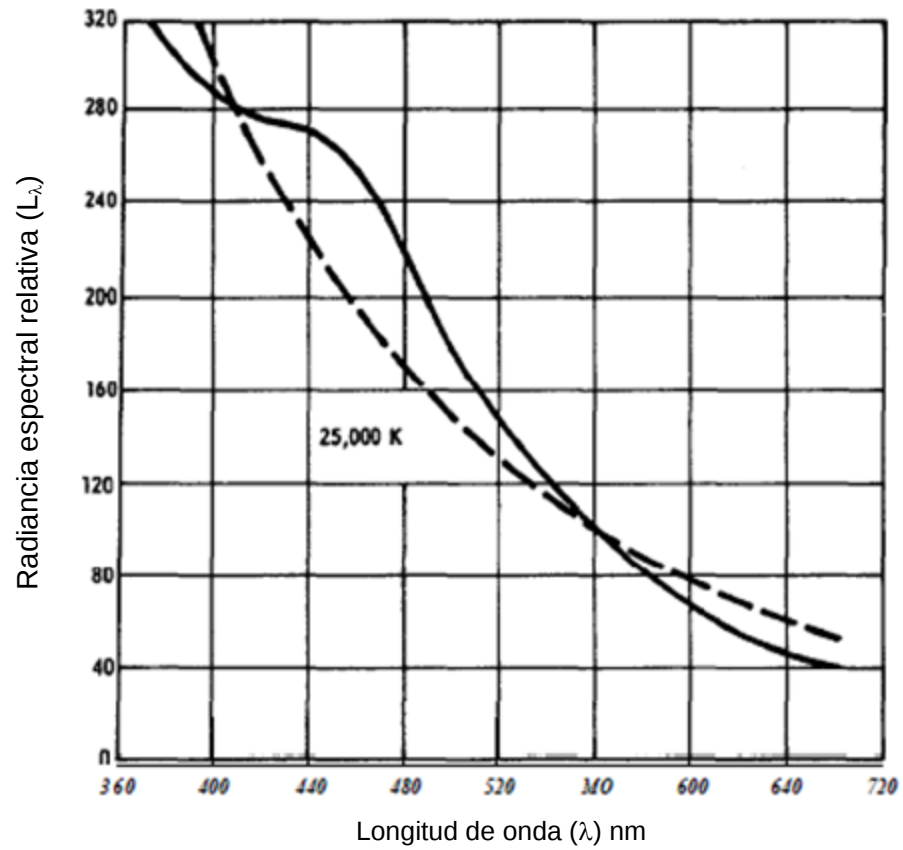


Figura 49. Distribución espectral de la luz del cielo en un día claro. La curva a línea discontinua muestra la distribución espectral de la radiación de un cuerpo negro a 25,000°K

Anexo 2. Tabla 19. Resumen de ecuaciones para diseño de un CPC

CPC		θ_e/θ_s	
n=1	n≠1	n=1	n≠1
$f = s(1 + \sin\theta_e)$	$f_n = s\left(1 + \frac{\sin\theta'_e}{n}\right)$	$f = s(\sin\theta_s + \sin\theta_e)$	$f_n = \frac{s(\sin\theta'_s + \sin\theta'_e)}{n}$
$e = \frac{s}{\sin\theta_e}$	$s = \frac{ns}{\sin\theta'_e}$	$e = \frac{s}{\sin\theta_e}$	$e = \frac{ns}{\sin\theta'_e}$
$H = \frac{(e + s)}{2} \cot\theta_e$	$H_n = \frac{fn\sqrt{1 - \frac{\sin^2\theta'_e}{n^2}}}{\sin^2\theta'_e}$	$H = \frac{(e + s')}{2} \cot\theta_e$	$H_n = \frac{fn\sqrt{1 - \frac{\sin^2\theta'_e}{n^2}}}{\sin^2\theta'_e}$
$b = \frac{-(L \sin \theta_e \cos \theta_e + 2f \sin \theta_e) \pm 2\sqrt{f^2 + Lf \cos \theta_e}}{\cos^2 \theta_e} - s$ $0 \leq L \leq H$		$r = \begin{cases} L \tan \left[\frac{1}{2}(\theta_s - \theta_e) \right] + s & L_c \leq L \leq H \\ \frac{-(L \sin \theta_e \cos \theta_e + 2f \sin \theta_e) \pm 2\sqrt{f^2 + Lf \cos \theta_e}}{\cos^2 \theta_e} - s & 0 \leq L \leq L_c \end{cases}$	
Empleando b directamente	Utilizar b para: $\sin\theta_e = \left(\frac{\sin\theta'_e}{n}\right)$ $\sin\theta_s = \left(\frac{\sin\theta'_s}{n}\right)$ $f = f_n$	Empleando r directamente	Utilizar r para: $\sin\theta_e = \left(\frac{\sin\theta'_e}{n}\right)$ $\sin\theta_s = \left(\frac{\sin\theta'_s}{n}\right)$ $f = f_n$

Anexo 3. Tablas de Sistemas de Luz

Tabla 20. Sistemas con pantallas (luz difusa)

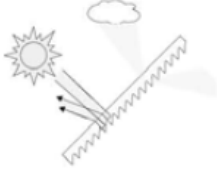
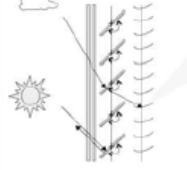
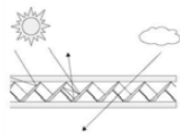
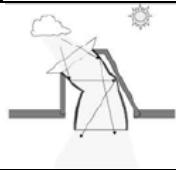
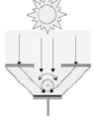
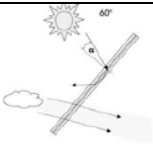
Sistema	Esquema	Tipo de clima	Elementos
Paneles prismáticos		Todos los climas	Ventanas verticales y tragaluces
Ventanas venecianas y prismas		Climas Templados	Ventanas verticales
Paneles de vidrio con protección solar		Climas templados	Tragaluces, cubiertas, techos
Apertura zenital anidólica		Climas templados	Tragaluces
Sistema de pantallas selectivo direccional (holographic optical element, HOE)		Todos los climas	Ventanas verticales, tragaluces, cubiertas, techos
Sistema de pantallas transparentes basados en reflexión total (HOE)		Climas templados	Ventanas verticales, tragaluces, cubiertas, techos

Tabla 21. Sistemas con pantalla (luz directa)

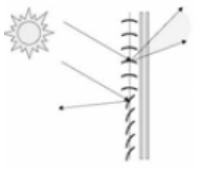
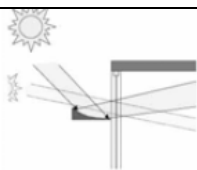
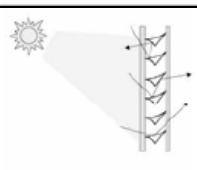
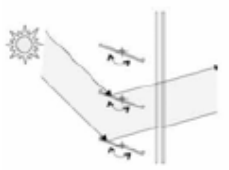
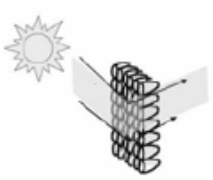
Sistema	Esquema	Tipo de clima	Elementos
Pantalla deflectora de luz		Climas cálidos y cielos soleados	Ventanas verticales superiores al nivel de los ojos
Lumbreras y persianas		Todos los climas	Ventanas verticales
Estantes redireccionadores de luz		Todos los climas	Ventanas verticales
Perfiles reflectivos con cubierta aluminizada (okasolar)		Climas templados	Ventanas verticales y tragaluces
Domos con paneles cortados a láser (LCPs)		Climas cálidos, cielos soleados, latitudes bajas	Tragaluces
Láminas inclinables		Climas templados	Ventanas verticales
Persianas solares anidólicas		Todos los climas	Ventanas verticales

Tabla 22. Sistemas conductores de luz difusa (sin pantalla)

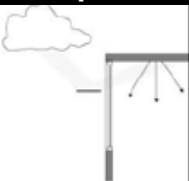
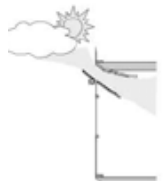
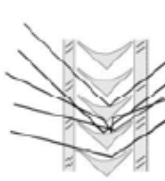
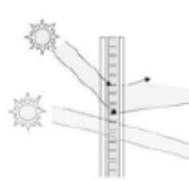
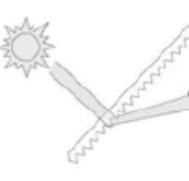
Sistema	Esquema	Tipo de clima	Elementos
Estantes de luz		Climas templados, cielos nublados	Ventanas verticales
Sistema integrado anadólico		Climas templados	Ventanas verticales
Techo anidólico		Climas templados, cielos nublados	Ventanas verticales sobre fachada
Sistema pescado		Climas templados	Ventanas verticales
Elementos conductores de luz zenith con HOEs		Climas templados, cielos nublados	Ventanas verticales (principalmente en patios), tragaluces
Paneles cortados a láser		Todos los climas	Ventanas verticales, tragaluces
Páneles prismáticos		Todos los climas	Ventanas verticales, tragaluces

Tabla 23. Sistemas conductores de luz directa, sistemas difusores de luz
(sin pantalla)

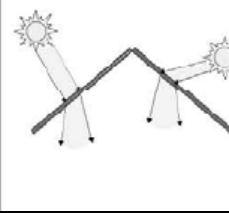
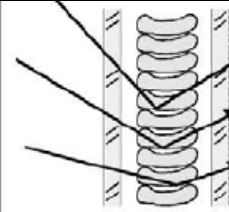
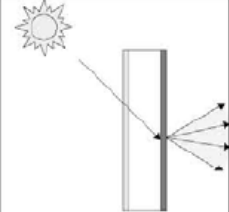
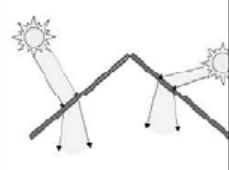
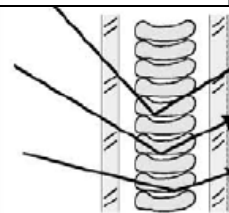
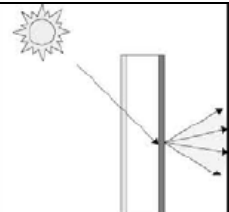
Sistema	Esquema	Tipo de clima	Elementos
HOEs en el domo		Todos los climas	Tragaluces
Cubiertas orientadas al sol		Todos los climas	Ventanas verticales, tragaluces
HOEs		Todos los climas	Ventanas verticales, tragaluces

Tabla 24. Sistemas de transporte de luz (sin pantalla)

Sistema	Esquema	Tipo de clima	Elementos
HOEs en el domo		Todos los climas	Tragaluces
Cubiertas orientadas al sol		Todos los climas	Ventanas verticales, tragaluces
HOEs		Todos los climas	Ventanas verticales, tragaluces