

CÁLCULO DE COLECTORES POR REFRACCIÓN PARA BARRAS DE ILUMINACIÓN SOLAR.

Leandro Ferrón¹, Andrea Pattini², M. Ángel Lara³

Instituto de Ciencias Humanas Sociales y Ambientales (INCIHUSA). Unidad: Laboratorio de Ambiente Humano y Vivienda
CONICET - C.C.131 C.P. 5500 – Mendoza .Tel. 0261-4288797 – Fax 0261-4287370 e-mail: lferron@lab.cricyt.edu.ar
IFIR-CONICET-UNR. 27 de febrero 210 bis 2000, Rosario.

RESUMEN

En la categoría de Sistemas de Iluminación Natural encontramos las Barras de Iluminación Solar, consideradas como un híbrido entre la versatilidad de instalación de las Fibras Ópticas y el rendimiento lumínico de los Lumiductos Especulares. Manteniendo el carácter pasivo del sistema, los principales objetivos para el diseño de un colector los de alcanzar la mayor amplitud de y la simpleza en el proceso de fabricación. Se desarrolla una ecuación que permite calcular cuáles deben ser los ángulos de inclinación respecto de la normal que debe adoptar la superficie sobre la que incide un haz de luz. La graficación de los resultados obtenido en función de las altitudes solares máximas alcanzadas en los Solsticios da como resultado el perfil de una superficie de revolución que permitirá modelar la zona de captación del Sistema. Se presenta un software que aplica los conceptos desarrollados como herramienta de cálculo de colectores por refracción para barras de iluminación verticales

PALABRAS CLAVE: Sistemas de iluminación natural, Colección Pasiva, Software

INTRODUCCIÓN

En la actualidad, el desarrollo y la aplicación de distintos sistemas innovativos de iluminación natural (S.I.N.) destinados al aprovechamiento y control de la luz solar de cada región, es una alternativa viable como estrategia para la utilización de recursos renovables pudiendo generar importantes ahorros en el consumo de energía eléctrica reservada a la iluminación de locales. (Cárter, 2002; □mat□, et. Al., 2003)

En trabajos presentados anteriormente, se muestra una clasificación de S.I.N. desarrollados con el fin de obtener el mayor rendimiento bajo diferentes situaciones lumínicas exteriores o distintos efectos de iluminación interior (Institut für Licht und Bautechnik, 2000; Ferrón et. Al., 2005)

Para alcanzar los objetivos de perfomancia requeridos una de las posibles opciones es la utilización de Sistemas Tubulares de Transporte de Luz (Kischkoweit-Lopin, 2002) Dentro de ésta categoría de Sistemas de Iluminación Natural podemos encontrar las Barras de Iluminación Solar, cuya aplicación es de particular interés por ser consideradas por sus características de relación de aspecto y su alto rendimiento lumínico como un híbrido entre la versatilidad de instalación de los sistemas de Fibras Ópticas y el rendimiento lumínico de los Lumiductos Especulares.

Si consideramos que el transporte de luz en estos elementos se produce gracias al principio de reflexión total interna (TIR) adquiere especial relevancia el tipo de elemento colector utilizado para la captación de luz solar.

Manteniendo como premisa el carácter pasivo del sistema, los principales objetivos que debe perseguir el diseño de un colector adecuado son el de alcanzar la mayor amplitud de captación en función de la geometría solar correspondiente a la latitud y longitud geográficas y la simpleza en el proceso de fabricación, atendiendo en lo posible a las capacidades tecnológicas endógenas de la región oeste de la Republica Argentina.

Éste podrá estar basado en un tratamiento formal realizado sobre el material acrílico (PMMA) que perfeccione el área de colección en la boca de entrada de barras de luz de instalación vertical, refractando los haces incidentes hacia el interior de la barra, previendo que se encuentren comprendidos en el cono virtual delimitado por el ángulo crítico dentro del cual se produce el fenómeno de reflexión total interna, para este caso $42^{\circ}15'$ aproximadamente.

El presente trabajo muestra el desarrollo de una formula que permite calcular los ángulos de inclinación de las superficies acrílicas, necesarios para que los haces de luz que incidan a partir de los 0° de altitud sean refractados en un ángulo superior a al ángulo crítico determinado por la relación de índices de refracción de los materiales.

En una etapa posterior se podrá formular un software que permita que los datos obtenidos luego del cálculo determinen un perfil gráfico para la conformación de la superficie de colección óptima.

¹ Becario doctoral CONICET

² Investigadora Adjunta CONICET

³ Investigador independiente CONICET

DESARROLLO

Conformación

En referencia a la problemática expuesta, se vuelve necesario proponer en primer lugar, un cambio en el concepto de conformación de sistemas de transporte de luz (Evans, et. Al., 2002), y formular que las barras de luz, como sistema de iluminación natural, pueden poseer una *zona de colección* de luz (y por tanto otra *zona de emisión*), y no ya elementos que se adicionen como componentes anexos que cumplan con mayor eficiencia esas funciones específicas (Fig. 1) De este modo, el mismo elemento de material plástico que permite el transporte de luz, puede ser modelado formalmente en áreas individuales con el fin de alcanzar un rendimiento óptimo.



Figura 1: Diferentes conceptos para la conformación de sistemas de transporte de luz.

Reflexión Total Interna

El transporte de luz dentro del sistema se produce gracias al fenómeno de reflexión total interna, que puede observarse cuando un rayo de luz incide desde un medio transparente con mayor índice de refracción hacia uno con menor índice.

En esta relación, existe un ángulo con respecto a la perpendicular en el que el rayo se comporta rasante a la superficie del medio y es el que determina el llamado ángulo límite, a partir del cual, lo que se observa es que el haz de luz permanece dentro del material (Fig. 2)

Estos principios de Reflexión de la luz están definidos por la Ley de Snell, formulada de la siguiente manera:

$$\eta_a \cdot \text{Sen}\Phi_a = \eta_{\text{mat}} \cdot \text{Sen}\Phi_{\text{mat}}$$

Donde:

η_a : Índice de refracción del medio 1 (para nuestro caso, aire)

$\text{Sen}\Phi_a$: Seno del ángulo de incidencia del haz sobre el material

η_{mat} : Índice de refracción del medio 2 (en este caso, PMMA)

$\text{Sen}\Phi_{\text{mat}}$: Seno del ángulo refractado dentro del material

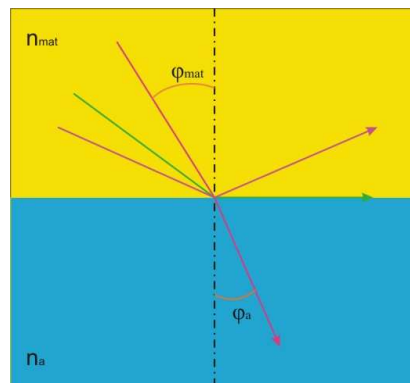


Figura 2: Haz de luz que permanece dentro del material a partir del ángulo crítico.

Geometría Solar

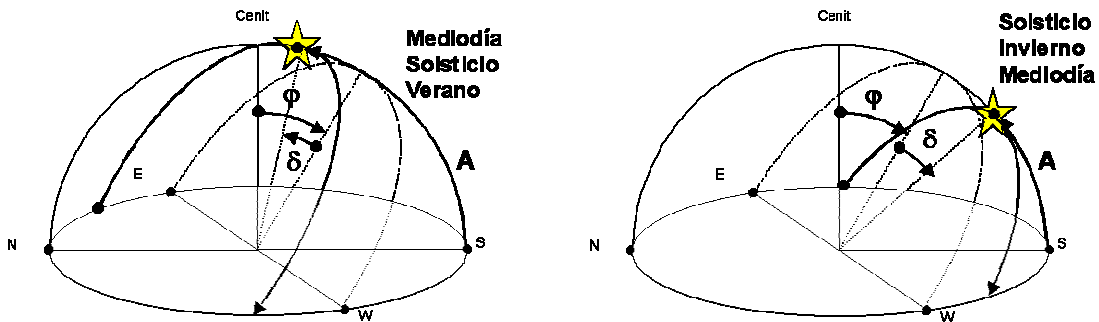
Durante el recorrido solar, el 21 de Marzo y 21 de Septiembre, se caracterizan porque al alcanzar el mediodía solar, el Azimut solar Z es igual a cero (Azimut z=0), y formando con el Cenit un ángulo igual a la Latitud j, de manera que se puede calcular la altura solar como A=90-j, con la particularidad de que los equinoccios son los únicos días que el recorrido diurno es de 12 horas exactas.

Solsticios:

El recorrido solar del 21 de Diciembre (Solsticio de Verano) se caracteriza porque, cuando el astro se halla sobre el Norte al mediodía solar, se forma con el Cenit un ángulo igual a la Latitud j más la declinación (d = + 23,5°), de manera que se puede calcular la altura solar como A=90-j+23,5° (Fig. 3). El recorrido solar diurno es un arco de círculo paralelo al recorrido equinoccial, que al estar mas levantado sobre el horizonte provoca que el día dure más de 12 horas.

Para el 21 de Junio (Solsticio de Invierno) por el contrario, el recorrido solar se caracteriza porque la hora 12:00 solar, el ángulo formado con el Cenit es igual a la Latitud j menos la declinación (d = - 23,5°), de manera que se puede calcular la altura solar como A=90-j-23,5° (Fig. 4)

Los recorridos solares diurnos pueden simplificarse como arcos de círculo perfectos, cuyo eje coincide con el de la tierra, recorriendo 360° en 24 horas, correspondiendo a cada hora un ángulo horario w =15°.



Figuras 3 y 4: Diagrama del recorrido solar durante los Solsticios de Verano e Invierno.

MODELO ANALÍTICO

Considerando los elementos inherentes al posible cálculo de una zona de colección para barras de luz, generada por medio del moldeo del acrílico y que contemple la necesidad de optimizar la refracción de los haces incidentes de modo que se trasporten en el material dentro de un ángulo crítico, comenzaremos determinando para la dupla acrílico-aire, cuál es el valor de dicho ángulo. Entonces:

$$\theta_{mat} = \arcsen \eta_a / \eta_{mat}$$

Donde:

Donde:

θ_{mat} : Ángulo crítico (en este caso, para la dupla aire-PMMA)

η_a : Índice de refracción del aire

η_{mat} : Índice de refracción del material (en este caso, acrílico)

Habiendo determinado que éste es el ángulo en el que se produce la refracción sobre el límite de interfaz entre las superficies de índices de refracción η_a y η_{mat} , y retomando la ley de Snell:

$$\eta_a \cdot \text{Sen}\phi_a = \eta_{mat} \cdot \text{Sen}\phi_{mat}$$

Sustituimos

$$\eta_a \cdot \text{Sen}\phi_a = \eta_{mat} \cdot \text{Sen } \theta_{mat}$$

Luego

$$\eta_a \cdot \text{Sen}\phi_a = \eta_{mat} \cdot \text{Sen} \left(\arcsen \eta_a / \eta_{mat} \right)$$

$$\eta_a \cdot \text{Sen}\phi_a = \eta_{mat} \cdot \left(\eta_a / \eta_{mat} \right)$$

$$\eta_a \cdot \text{Sen}\phi_a = \eta_a$$

$$\begin{aligned} \text{Sen}\Phi_a &= \eta_a / \eta_a \\ \text{Sen}\Phi_a &= 1 \end{aligned} \quad \text{Ecuación 1}$$

A continuación sumamos las ecuaciones relacionadas a la altitud solar Φ_{\max} , que nos permitirán deducir cuáles serán las inclinaciones que la superficie del material debe adoptar para que la desviación del rayo refractado respecto de la normal se aproxime al ángulo crítico. De este modo:

$$\Phi_{\max} = 90 - \text{lat} \pm 23,5$$

Entonces:

$$\Phi_a = \Phi_{\max} + \gamma \quad \text{Ecuación 2}$$

Donde:

Φ_a : Angulo de incidencia del haz de luz sobre la superficie del material.

Φ_{\max} : Angulo de la altura solar máxima alcanzada en los solsticios de invierno y verano, según corresponda.

γ : Angulo de inclinación de la superficie sobre la que incide el rayo respecto de la normal.

Reemplazando la ecuación 1 en la ecuación 2:

$$\begin{aligned} \text{Sen}(\Phi_{\max} + \gamma) &= 1 \\ \Phi_{\max} + \gamma &= \arcsen 1 = 90^\circ \\ \gamma &= 90^\circ - \Phi_{\max} \end{aligned} \quad \text{Ecuación 3}$$

Determinamos mediante este razonamiento que el ángulo γ de inclinación que debe adquirir la superficie del material (Fig. 5) sobre la que incide el haz de luz respecto de la normal es igual a la diferencia ente 90° y el ángulo de altura máxima que alcanza el sol en los solsticios de Verano e Invierno, en función de la latitud en la que se emplace el Sistema de Iluminación Natural.

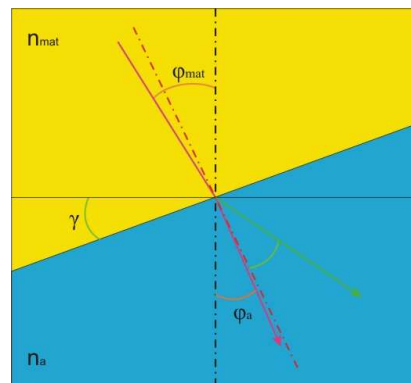


Figura 5: Ángulo γ de inclinación, que debe adquirir la superficie del material para que el rayo incidente Φ_a se refracte sobre el limite de la interfaz de las superficies.

APLICACIÓN

Gracias a la formulación de la Ecuación 3 en el razonamiento que hemos seguido, se hizo posible el desarrollo de un software (ColOp®) que permite construir un perfil gráfico que responde a los valores en ángulo obtenidos para cada altura solar, desde la altitud 0° , coincidente con el amanecer en todos los casos, hasta la altura máxima que pueda alcanzar el sol según la latitud geográfica, valor que alcanza su cumbre a los 113° ($\Phi_{\max} = 90 - \text{lat} + 23,5$) sobre la línea del Ecuador (Figura 6)

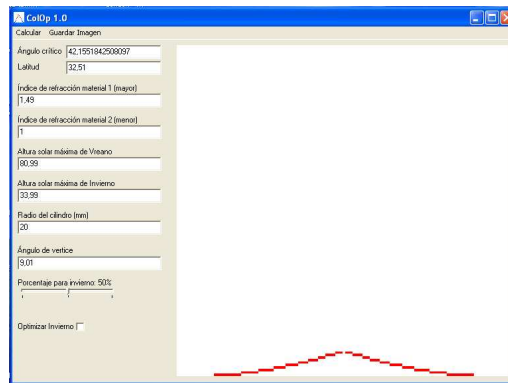


Figura 6: Interfaz del Software ColOp, y ejemplo del output del perfil grafico obtenido para el diseño de un colector por refracción correspondiente a los 33°32”.

Este programa permite ingresar los datos correspondientes al valor de la Latitud del lugar donde se emplazará la Barra Lumínica, los datos de los índices de refracción de los medios transparentes y el diámetro de la sección cilíndrica de la barra, expresado en milímetros.

Los resultados arrojados por el programa son; el cálculo del ángulo crítico para la reflexión total interna, la altura solar máxima alcanzada en los solsticios de verano e invierno, el valor en grados del ángulo que conforma el vértice superior del perfil y el perfil gráfico que corresponde a la superficie de revolución necesario para una colección optima (Fig. 7)

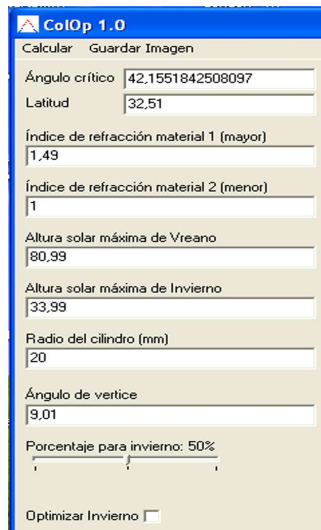
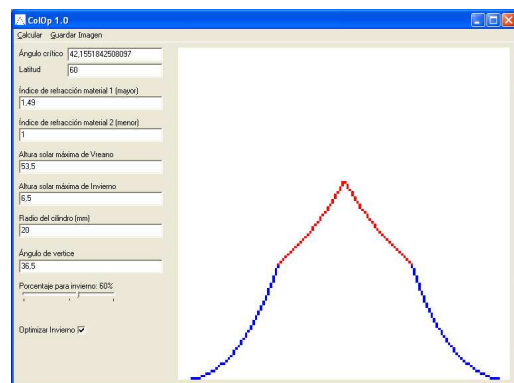
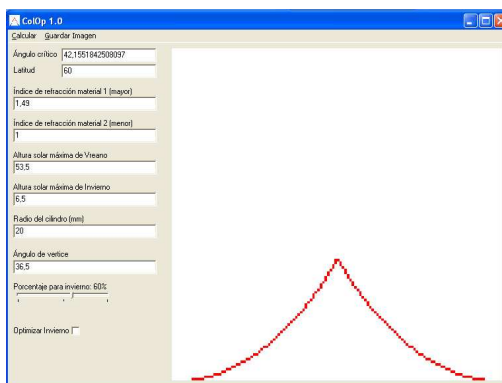


Figura 7: Detalle de los Ítems arrojados por el Programa ColOp.

El programa posee además, una función que permite obtener una curva optimizada para el funcionamiento del colector en altitudes solares invernales, previendo de esta manera, en la época del año en que la radiación visible es mas débil, potenciar la captación a partir del diseño del colector. Esta opción tiene asignados valores de optimización estándar, pero permite además, mediante un deslizador, generar optimizaciones personalizadas de acuerdo a las necesidades del usuario (Fig. 8 y 9)



Figuras 8 y 9: Perfiles obtenidos para una latitud de 60°. Figura 8: perfil estándar, Figura 9: perfil optimizado que prioriza en un 60% la colección en época invernal.

CONCLUSIONES

Los cálculos desarrollados muestran que, utilizando el concepto de refracción de la radiación visible, es posible generar una zona de captación pasiva para los sistemas de iluminación natural por Barras de PMMA.

Estos sistemas funcionan gracias al principio físico de reflexión total interna, lo que permitió inferir que modificando la inclinación de la superficie sobre la que inciden los haces de luz sería posible diseñar una zona de colección pasiva de amplio rango de captación solar.

Habiendo calculado el valor de los ángulos mediante la formulación de ecuaciones específicas, se desarrolló un software que permite, comenzando con el ingreso de datos simples, obtener el perfil gráfico de la superficie óptima de captación, que será la base para modelar la zona colectora del sistema.

REFERENCIAS

Cárter, D., 2002 "The measured and predicted performance of passive solar light pipe systems". Lighting Resesarch and technol.,

Evans JM, Fernandez Xifra MV, 2002 "Sistemas innovativos para el direccionamiento de luz natural. Películas holográficas y lumiductos" AVERMA

Ferrón, L.; Pattini, A. y Lara, M., 2005 "Disponibilidad comercial de sistemas de transporte de luz natural", AVERMA.

Institut für Licht und Bautechnik FH Köln, 2000 "Systematic zu Tageslichtsystemen" Fachhochschule Köln, Colônia,.

Pattini A., Mitchell J., Ferrón L, 2003 "Diseño de lumiductos de bajo costo para vivienda Bioclimática Unifamiliar". AVERMA, Vol 7, N°1

ABSTRACT:

In the category of Natural Illumination Systems we can find the Light-illuminating rods, considered like a hybrid between the versatility of installation of Fiber Optics and the light performance of Light-Pipes. Maintaining the passive character of the system, the main objectives to design a collector was to reach the greater collection amplitude and the easier manufacture process. An equation was developed to calculate which must be the inclination angle so that the surface which affects a light beam. The graphic of the results obtained is based on the solar altitudes and gives like result a profile of a revolution surface that will allow to model the zone of collection of the System. A software applies the developed concepts as tool of calculation of collectors by refraction for Light-illuminating rods.