

## **CARACTERÍSTICAS FOTOMETRICAS DE SISTEMAS DE ILUMINACION NATURAL ELEMENTOS COMPONENTES DE TRANSPORTE DE LUZ.**

**Leandro Ferrón<sup>1</sup>, Andrea Pattini<sup>2</sup>, M. Ángel Lara<sup>3</sup>.**

Instituto de Ciencias Humanas Sociales y Ambientales (INCIHUSA). Unidad: Laboratorio de Ambiente Humano y Vivenda  
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:** Entre las variables de las que depende la calidad de la iluminación en espacios interiores encontramos la caracterización lumínica del aporte de los sistemas de iluminación natural. Estas características fotométricas, especialmente en los sistemas innovativos, que captan la luz solar para trasportarla y finalmente emitirla en el recinto interior podrían presentar variaciones relacionadas a su diseño morfológico y a las propiedades de sus materiales. En el presente trabajo se expone la evaluación de tres tipologías de sistemas mediante el uso de un dispositivo para mediciones de distribución de intensidades luminosas. Los resultados obtenidos son comparados en función de las curvas polares y se establece una relación entre la morfología particular de cada sistema y su distribución fotométrica de intensidades característica.

**Palabras clave:** Sistemas innovativos de Iluminación natural, Cuerpo fotométrico.

### **INTRODUCCIÓN**

El impulso y promoción que recibe en la actualidad la utilización de energías sustentables no se corresponde en todos los casos con un adecuado nivel de desarrollo tecnológico, que pueda responder convenientemente a los requisitos concretos planteados por el empleo de diferentes tipos de energía. Debido a esto, encontramos en la Argentina en el ámbito del comercio, por un lado una escasa oferta de productos cuya fuente de alimentación sea íntegramente solar, y por otro, artefactos que no pueden dar cuenta de un comprobado rendimiento energético (Ferrón et al. 2005).

En el campo específico de la iluminación por medio del manejo de la luz natural, considerada una de las formas más eficientes de aprovechamiento energético, la oferta mencionada no excede la media docena de tipologías entre las que podemos mencionar sistemas de persianas, celosías, films adherentes, claraboyas y sistemas de lumiductos. Para el caso de estos últimos, su eventual aplicación sería de suma importancia si tomamos en cuenta que, desde la perspectiva de la arquitectura, los espacios modernos son concebidos a partir de lo que se denomina planta libre. Como resultado, las paredes interiores ya no corresponden a funciones estáticas, abriendo la posibilidad de desplazarlas libremente y facilitando la composición de ilimitadas divisiones sobre el espacio interior.

Los sistemas de lumiductos poseen las características más sobresalientes al momento de resolver la iluminación natural de estos espacios: pueden instalarse completamente independizados de las aberturas perimetrales, son flexibles para modificar configuraciones lumínicas sujetas a las divisiones interiores del espacio y generan una mínima intervención sobre la arquitectura durante su instalación.

No obstante esto, se trata ciertamente de los sistemas menos difundidos comercialmente. Una de las posibles causas a las que se debe que la implementación de estos sistemas no se haya difundido en los mercados es la falta de información en lo referido a la distribución de su flujo luminoso en el espacio. Si bien el rendimiento lumínico del aparato es un dato determinante al momento de su aplicación, es también difícil de determinar con precisión ya que depende siempre de la disponibilidad de luz exterior en la localidad donde se emplazará el edificio (Fig 1)

---

<sup>1</sup> Becario doctoral CONICET

<sup>2</sup> Investigadora Adjunta CONICET

<sup>3</sup> Investigador independiente CONICET

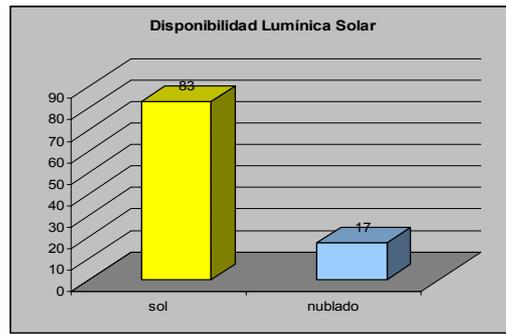


Figura 1- Recurso solar exterior: Porcentaje de días nublados y soleados en el año para Mendoza, Aeropuerto, 32° 53 41", Latitud Sur, 68 52" Longitud Oeste

Sin embargo, el gráfico de la fotometría de diferentes tipos de lumiductos puede trazarse más ajustadamente, mediante ensayos de medición de intensidades luminosas (Raitelli et al. 2004), facilitando luego la utilización de estos datos en procedimientos de cálculo lumínico o la evaluación de condiciones lumínicas sobre una superficie.

Este trabajo expone la caracterización fotométrica de tres tipologías de Lumiductos instalados en posición horizontal. Los modelos de diseño utilizados son dos sistemas de transporte de luz cuyo principio de funcionamiento es la Reflexión Total Interna (TIR), de material acrílico (PMMA) y un sistema de transmisión por reflexión especular conformado por un cilindro recubierto en su interior por film aluminizado (Mitchell et al. 2004). Las relaciones de aspecto (aspect ratio) de cada uno de los sistemas se representan esquemáticamente en la figura 2. Conceptualmente, la determinación del cuerpo fotométrico de la luz solar emitida por un Lumiducto debería permitirnos su modelado mediante la utilización de un elemento emisor en la salida del sistema, de forma análoga al modo en que una luminaria convencional compone el flujo luminoso de una lámpara artificial entregando una distribución lumínica específica. Los datos obtenidos serán de utilidad en el desarrollo elementos de emisión de altos niveles de eficiencia.

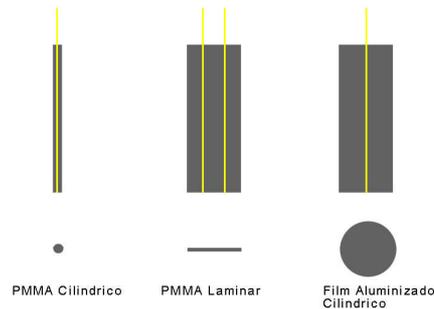


Figura 2. Aspect Ratio de los tres modelos ensayados: Barra acrílica, Lámina acrílica y Ducto aluminizado en su interior.

## MATERIAL Y MÉTODO

Se diseñó un dispositivo de medición que permitiera la instalación de los sistemas a evaluar y su adecuada orientación respecto de la geometría solar de la región. Este box de ensayos luminotécnicos pertenece al LAHV, y está ubicado en terrenos del CRICYT, Mendoza. Sus dimensiones son aproximadamente de 3x3x3mts y está montado sobre una plataforma móvil que le permite un giro de 360° sin obstrucciones a su alrededor (Fig 3)



Figura 3. Vista exterior del dispositivo de ensayos, ubicado en el predio del CRICYT, en su estado inicial.

Sobre su lateral abierto se colocó un panel de cierre con dos aberturas centrales concéntricas, una de 900mm x 900mm que contiene otra de 300mm x 300mm, ambas de apertura independiente y rebatible. Los sistemas de lumiductos ensayados se montaron sobre un anexo estructural estanco a la luz (Fig 4).

Para evitar reflexiones de luz durante las mediciones, se revistieron todas las superficies internas (piso, muros y techo) de color negro mate, controlando que no hubiese infiltraciones de luz a través de las uniones de los paneles entre sí y asegurándonos que la única fuente de luz a registrar solo ingrese por la ventana



Figura 4. Vista exterior del dispositivo con los S.I.N., Ducto aluminizado y Barra acrílica respectivamente.

En su interior, mediante la ubicación de sensores distribuidos en dos semiplanos C, que giran alrededor de un eje horizontal que pasa por el centro fotométrico de la fuente, se determinaron siete Radiovectores Intensidad ubicados de manera equidistante sobre el perímetro de un casquete esférico cada 15° (Fig. 5). Este dispositivo de ensayos permite, además de evaluar los resultados para este caso particular, realizar evaluaciones fotométricas de distintas tipologías de sistemas de iluminación natural. (Pattini et al, 2001)

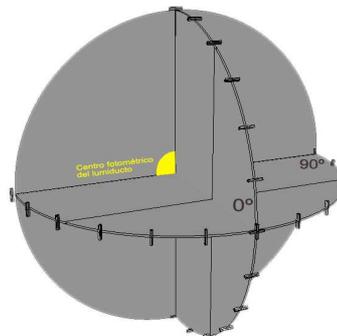


Figura 5: Esquema del sistema de semiplanos C, centro fotométrico de la fuente y radiovectores Intensidad ubicados equidistantes un casquete esférico cada 15°

### Equipamiento fotométrico

La distribución de luminancias en el interior del dispositivo se determinó mediante un radiómetro marca LI-COR 189, con sensor fotométrico LI-210 SB. Las mediciones se realizaron sobre 7 puntos equidistantes entre sí, ubicados en el perímetro de dos semiplanos correspondientes a 0° y 90°, a intervalos de tiempo de 15seg. entre cada punto.

Como control, un sensor registraba la iluminación exterior horizontal, con el fin de sondear que no se existan modificaciones significativas de la fuente luminosa (+5%) durante las mediciones; si esto ocurría la medición se iniciaba de nuevo.

Los datos obtenidos se afectaron por la Ley de la Inversa de los Cuadrados para calcular la intensidad luminosa en función del ángulo  $\gamma$  (Diagrama 1), y se procesaron luego mediante el software *Photometric Toolbox*, herramienta que integra los valores registrados y genera el esquema del cuerpo luminoso de la fuente, arrojando los resultados en un archivo de formato \*.ies, que permitiría luego su utilización en cálculos y análisis por computadora (Sociedad de Energía e Iluminación de Norteamérica – IESNA).

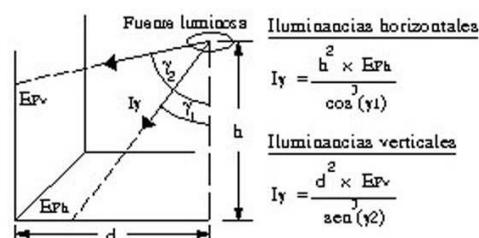


Diagrama 1: Ley de la inversa de los cuadrados aplicada a la medición de iluminancias directas en puntos definidos por el ángulo de elevación  $\gamma$ .

Los tres sistemas evaluados durante el experimento poseen una dimensión patrón de 1000mm de longitud, diferenciándose entre sí por el tipo de material que los compone o por la variación en las proporciones de los sistemas conformados por el mismo material. Por una parte, dos de los lumiductos son de material acrílico transparente de índice de refracción  $n = 1,49$ . Para el caso de la tipología *barra* su configuración corresponde a la de un cilindro de 25mm de sección, diferenciándose de la tipología *Lamina* por su relación de aspecto, ya que las medidas ésta última son 400mm x 4mm de sección. Para ambos casos todas sus superficies se encuentran pulidas. Esto genera que entre caras paralelas se produzca el transporte de luz por medio del fenómeno de TIR y que, en la zona de intersección de caras perpendiculares, los haces se dispersen al exterior del material (Figs 6 y 7)

Respecto de la tipología *Tubo*, cambia el principio de transporte utilizado, tratándose en este caso de la reflexión especular generada por un film aluminizado, con un nivel de reflectancia de 0.9. La sección del conductor es en este caso de 100mm (Fig 8)



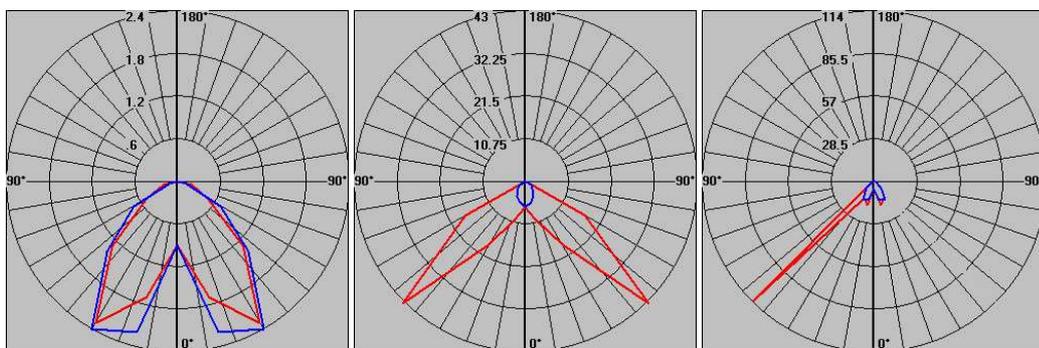
Figuras 6, 7 y 8: Aspecto del extremo emisor de cada uno de los tres sistemas de lumiductos evaluados: Barra acrílica, lamina acrílica y ducto respectivamente

## RESULTADOS

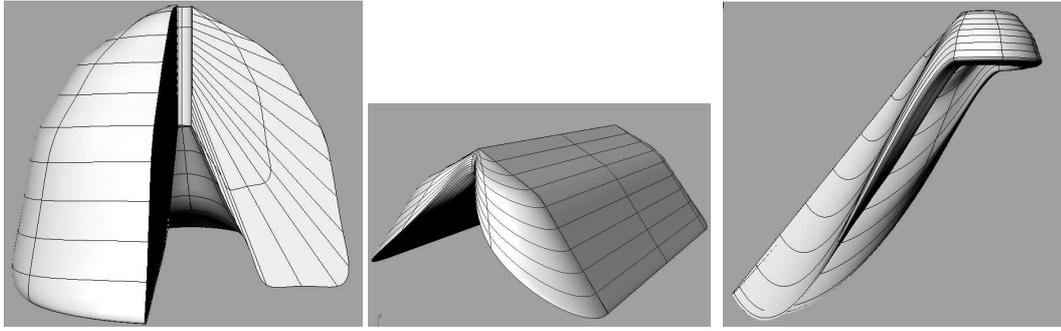
Los resultados obtenidos para las tres tipologías de Lumiductos se presentan en las tablas I, II y III. Allí se indican los valores de intensidad luminosa en función del ángulo de elevación  $\gamma$  para los planos acimutales definidos como longitudinal y transversal. Los resultados se presentan también en forma de curvas polares (Figs 9, 10 y 11) y una representación tridimensional del cuerpo fotométrico de los artefactos (Figs 12,13 y 14).

Tipología BARRA			Tipología LAMINA			Tipología TUBO					
Fecha	29/08/07, 15:15	Eext	73,380lux	Fecha	29/08/07, 12:20	Eext	81,700lux	Fecha	29/08/07, 13:35	Eext	85,700lux
Angulo	Longitudinal	Transversal	Angulo	Longitudinal	Transversal	Angulo	Longitudinal	Transversal			
0	0,9	0,9	0	6,7	6,7	0	5	5			
15	1,7	2,2	15	9,9	5,6	15	13,5	12,8			
30	2,3	2,4	30	18,7	4,2	30	14	14,2			
45	1,3	1,4	45	43,6	2,6	45	10	6,7			
60	0,5	0,7	60	17,3	1,6	60	0,8	1,2			
75	0,2	0,1	75	0,2	0,1	75	0,1	0,2			
90	0	0	90	0	0	90	0	0			

Tabla I, II y III: Valores registrados en lux durante la medición de intensidades luminicas, afectados por la ley de la inversa de los cuadrados.



Figuras 9,10 y 11: Curvas polares de distribución luminosa para las tres tipologías evaluadas: Barra, Laminar y Tubular respectivamente. Las líneas azules corresponden al plano longitudinal y las rojas al plano transversal.



Figuras 12, 13 y 14: Cuerpos fotométricos para las tres tipologías evaluadas: Barra, Laminar y Tubular respectivamente. Obsérvese la distribución asimétrica correspondiente a la tipología Laminar y Tubo.

En las distintas representaciones expuestas se puede observar una significativa diferencia entre las distribuciones lumínicas de cada uno de los Sistemas evaluados.

En primer lugar, para la tipología *Barra*, encontramos un cuerpo fotométrico que responde a una simetría radial y cuyos valores máximos de intensidad se registran sobre el vector correspondiente a  $\gamma = 30^\circ$ . Si bien resulta atípico encontrar que sobre el ángulo  $0^\circ$  el valor registrado sea menor al registrado en ángulos superiores, la causa de que esto sea así se relaciona directamente a la morfología del sistema y al principio de reflexión por medio del cual actúa. En efecto, la luz que es transportada por medio de TIR viaja por el interior de la barra adquiriendo una serie de ángulos de reflexión siempre iguales o inferiores al ángulo crítico determinado por el índice de refracción  $n$  del PMMA utilizado.

Cuando estos haces de luz llegan al extremo de la barra, encuentran una sección circular de cara plana, cuyo perímetro está definido por la intersección de dos planos perpendiculares entre sí. Sobre esta intersección, la arista circular generada funciona como primer elemento concentrador que rompe la continuidad del paralelismo de las caras de la barra, y actúa como ventana de salida para la luz transportada, causando la propagación de los haces principalmente en la dirección del ángulo ya mencionado (Fig. 15)

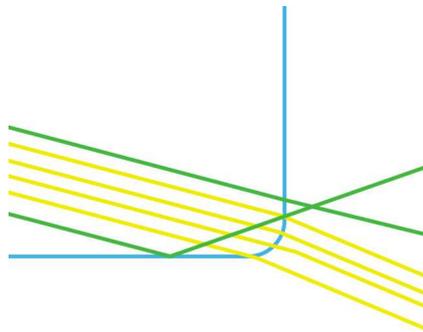


Figura 15: Detalle geométrico de la interacción de haces de luz sobre la arista generada por la intersección de dos planos perpendiculares de material PMMA.

En el caso de la tipología *Laminar* observamos que las distribuciones para cada semiplano contemplado se separan abruptamente destacándose los valores registrados sobre el plano longitudinal a la luminaria. Esta marcada diferencia entre los niveles de iluminancia registrados se explica por la misma razón que en el caso anterior, en el que las áreas de emisión de luz de mayor relevancia coinciden morfológicamente con las aristas que definen la superficie del extremo de la lámina. De esta manera, también se percibe aquí un desplazamiento de los valores más altos registrados hacia los  $45^\circ$  del plano longitudinal (curva en rojo), y una notable reducción del flujo sobre los valores correspondientes al plano transversal (curva color azul) La representación tridimensional del cuerpo fotométrico nos da la pauta de que el diseño de un apantallamiento para este tipo de morfología debe contemplar la redirección de haces sobre el área central de la fuente, es decir, los  $0^\circ$ .

Finalmente, para el caso de la tipología *Tubo*, la lectura de la curva polar correspondiente nos muestra en principio, una distribución radial. Sin embargo, se ve claramente que ésta se encuentra afectada por un pico de intensidad sobre los  $-45^\circ$  del plano longitudinal. La posible causa de la existencia de esta aguja sobre la gráfica de la curva polar es la posición relativa del sol en el momento de la medición. En este prototipo de Lumiducto, el transporte de luz se produce por reflexiones especulares a través del interior de un cilindro cuya relación de aspecto (diámetro sobre longitud) es mucho mayor que en los casos precedentes, ya que es esta variable la que se relaciona directamente con el rendimiento del artefacto. Esto genera dos fenómenos congruentes, por un lado, los haces lumínicos incidentes no se encuentran sesgados por un ángulo crítico que limite su apertura, pudiendo ingresar por la zona de colección rayos con ángulos iguales o menores a  $180^\circ$  y por otro, las características propias de la geometría solar, es decir, altitud y azimut correspondientes a la hora de la medición, harán incidir una mayor proporción de rayos en una dirección predominante que encontrará su equivalente en la salida del artefacto. Es

válido pensar que en el caso de diseñar un apantallamiento para esta tipología de sistemas se haría necesaria la evaluación del comportamiento de la curva de intensidades para todo el periodo del día y durante diferentes meses del año para diversas ubicaciones geográficas.

## DISCUSIÓN y CONCLUSIONES

A partir de los resultados obtenidos podemos afirmar que existe una estrecha relación entre la morfología particular de distintos sistemas de lumiductos y su distribución fotométrica de intensidades característica.

Esta conclusión ubica el núcleo de atención sobre el diseño de los elementos de emisión, para considerarlos ya no como un componente meramente decorativo, sino como un desarrollo ajustado a un cuerpo fotométrico específico, y que tiene como objetivo alcanzar una distribución lumínica concreta que responda a las necesidades de uso de un espacio particular.

Encontramos también, que las posibles configuraciones de los artefactos para el transporte de luz natural dependen del material del que se componen. Este material que determina a su vez, el principio físico mediante el cual se producirá el fenómeno de transporte.

Esto nos permite pensar que, para el caso de los sistemas conformados por plásticos transparentes, sería interesante explorar la posibilidad de afectar los cuerpos fotométricos resultantes por medio del manejo formal del material, concibiendo de esta manera una integración de elementos transportador/emisor que optimice no solo el rendimiento lumínico del sistema, sino que además reduzca la cantidad de componentes que hoy necesariamente deben vincularse entre sí o a la arquitectura a través de piezas mecánicas.

## REFERENCIAS

- Callow, J.M., Shao, L. “*Air-clad optical rod daylighting system*”, Lighting Research and Technology, Vol. 35, N°1, 2003
- Ferrón, L. — Pattini, A. y Lara, M.A., “*Disponibilidad comercial de sistemas de transporte de luz natural*”, Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente, ISSN 0329-5184, Vol. 9, N° 3, 2005.
- Pattini, A. — de Rosa, C. y Kirschbaum, C., “*Medición de las características fotométricas de sistemas de iluminación natural*”, Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente, AVERMA ISSN 0329-5184, Vol. 5, N° 1, 2001.
- Pattini, A., Mitchell, J., Ferrón, L., *Diseño de lumiductos de bajo costo para vivienda bioclimática unifamiliar*, Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente AVERMA, ISSN 0329-5184, Vol. 7, N° 1, 2003.
- Raitelli, M, Costilla, M.A., Soria, A., “*Fotometría de lumiductos*”, Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente AVERMA, ISSN 0329-5184, Vol. 8, N° 2, 2004.

## ABSTRACT

The natural lighting quality inside the building spaces depends of the photometric ditribution of the nautral lighting systems. These photometric characteristics could present variations related to the systems morphologic design and the properties of his materials. The present paper exposes the evaluation of three systems typologies using a measurement device of distribution of light intensities. The obtained results are compared through different graphical representation systems.

**Keywords:** Innovative daylighting systems, photometry