

DISEÑO, EVALUACIÓN Y RENDIMIENTO DE LUMIDUCTOS VERTICALES

Leandro Martín Ferrón* Dr. Medio Ambiente Visual e Iluminación Eficiente
* Laboratorio de Ambiente Humano y Vivienda – INCIHUSA, CCT Mendoza, CONICET Tfno: +54 261 524 4344.
lferron@mendoza-conicet-gob.ar

Recibido: -- Aceptado:-- DOI:

DESIGN, EVALUATION AND PERFORMANCE OF VERTICAL LIGHTPIPES

ABSTRACT:

Every day, men and women living in environments in which the predominant lighting is artificial sources. To counteract this, is possible to use daylighting systems for entry natural light to interior spaces. However, there is still great difficulty to find light performance data of these systems, creating uncertainty among architects and designers when planning the lighting of spaces using these devices. This work proposes to validate the use of the TIP-HDRI technique to evaluate and predict the performance of tubular daylighting systems. As a result, it shows a comparative analysis between the luminous flux measured using an array of illuminance sensors, and measured TIP-HDRI technique. A concrete example of application is shown by measuring of the luminous flux emitted month by month, for three self-manufacturing lightpipes, installed in actual use, in a residential environment, of cities with sunny climates, for a period of one year.

Key Words: Daylighting, Daylighting systems, Photometric characterization

RESUMEN:

Día a día, hombres y mujeres se desenvuelven en ambientes en los que predomina la iluminación artificial de bajo consumo. Para contrarrestar esta situación, es posible utilizar sistemas de iluminación natural para el ingreso de luz natural a los espacios interiores. Sin embargo, existe aún una gran dificultad para hallar datos de rendimiento lumínico de estos sistemas, lo que genera incertidumbre entre arquitectos y proyectistas al momento de planificar la iluminación de espacios utilizando estos dispositivos. En este trabajo se propuso validar el uso de la técnica TIP-HDRI para evaluar y predecir el rendimiento de sistemas tubulares de iluminación natural. Como resultado, se muestra el análisis comparativo entre flujos lumínicos medidos por medio un arreglo de sensores de iluminancia y la técnica TIP-HDRI, y se muestra un ejemplo concreto de aplicación mediante el relevamiento del flujo luminoso emitido mes a mes por tres lumiductos de fabricación propia, instalados en situación de uso real, en entornos residenciales de ciudades con climas soleados, durante un período de un año.

Palabras Clave: Iluminación natural, Sistemas de iluminación, Caracterización fotométrica

1.- INTRODUCCION

En el entorno del hábitat urbano encontramos que son escasos los ejemplos en los que el diseño de espacios ha sido planificado en función del aprovechamiento de la energía solar disponible, o de los efectos que la luz natural incidente puede generar sobre la arquitectura. Día a día, hombres y mujeres permanecen en espacios interiores durante largos períodos de tiempo como parte de sus rutinas cotidianas, desenvolviéndose en ambientes en los que predominan los muros y la iluminación artificial de bajo consumo, en ámbitos públicos y privados, supeditando su relación con el mundo exterior a la presencia o no de aberturas como ventanas o tragaluces.

Según Mascaró [1], la luz natural como forma económica de iluminación de edificios fue perdiendo terreno frente al desarrollo de la iluminación artificial que, conjuntamente con los sistemas de control de ventilación y calefacción, dieron a las personas la posibilidad de independizar su entorno de las características propias del ambiente exterior. Paradójicamente, el avance de la tecnología en estos campos devino en una desmedida exaltación de las formas en el diseño de residencias y edificios, comerciales e institucionales, enclavados en distintas orientaciones, en los que se evidencia la escasa importancia de la luz solar como variable considerada durante la planificación del proyecto. Esta indiferencia respecto de las posibles interacciones entre la luz solar y el ambiente construido, sustentada desde la génesis de los proyectos por el uso de fuentes artificiales como único recurso tecnológico para iluminar, provoca

invariablemente la generación de volúmenes arquitectónicos que se conforman en obstáculos que dificultan el uso de la luz natural como recurso para la iluminación de espacios.

En este contexto, la utilización de dispositivos tecnológicos que permitan el direccionamiento e ingreso de luz natural para la iluminación de espacios interiores ha sido tópico de estudios académicos y generador de innovaciones en la industria desde hace ya más de 50 años [2]. Ya en el año 2000, el Institut für Licht und Bautechnik FH Köln [3], en una revisión de sistemas para el control y manejo de la iluminación natural, presentó una clasificación de las tecnologías existentes en función del tipo de clima luminoso, de sus principios de funcionamiento y del nivel de desarrollo de los dispositivos, entre otros aspectos. El desarrollo de estos Sistemas de Iluminación Natural tiene sus bases en la manifiesta preferencia de los usuarios por habitar espacios iluminados naturalmente [4], y creció asentado principalmente en la necesidad de introducir y acrecentar de manera eficiente los niveles de luz solar en el interior de residencias y edificios.

Sin embargo, la dificultad para hallar datos de rendimiento lumínico de diferentes Sistemas de Iluminación Natural en función de su tipología, localización geográfica y clima luminoso, coloca a los arquitectos y proyectistas en una situación de total incertidumbre al momento de planificar la iluminación de espacios mediante la utilización de estos dispositivos [5]. Otro factor a tener en cuenta, es que tampoco queda claro para los fabricantes, comerciantes y profesionales cuales son las herramientas metodológicas de las que podrían disponer para la determinación del rendimiento de estos sistemas, dejando pasar la oportunidad de ofrecer a los usuarios información pertinente que represente, además, un valor diferencial de este tipo de productos.

A este respecto, podemos mencionar que algunos de los métodos para la caracterización lumínica de sistemas de iluminación natural pueden llevarse a cabo en situación de laboratorio, mediante la realización de análisis fotométricos bidireccionales, aunque en este caso se requiere de equipamiento de alta complejidad (goniofotómetro bidireccional), o a través de simulación con programas especializados, que han significado un gran avance en el campo de la predicción del rendimiento de dispositivos lumínicos, pero que no se encuentran aún al alcance del público general debido a sus elevados costos [6]. Por otra parte, algunos investigadores han desarrollado técnicas mediante el uso de imágenes de alto rango dinámico (TIP-HDRI por las siglas en inglés de Transmission illuminance proxy - high dynamic range imaging) con las que es posible llevar adelante una evaluación de prototipos de grandes superficies (ventanas, lumiductos, sistemas anidólicos, etc) construidos e instalados en situaciones de uso real [7]. Este método, sin embargo, aún se presenta en etapa experimental y carece de los ensayos necesarios para determinar la precisión de su uso.

Frente a lo expuesto, en este trabajo se propuso validar el uso de la técnica TIP-HDRI como herramienta para la evaluación y predicción del rendimiento lumínico de sistemas tubulares verticales de iluminación natural. Para ello se analizaron comparativamente los resultados obtenidos de la medición de flujo mediante un arreglo de sensores de iluminancia en un semiplano B y la técnica TIP-HDRI; para finalmente mostrar su aplicación práctica tomando como ejemplo el relevamiento del flujo luminoso emitido mes a mes por tres prototipos de lumiductos de fabricación propia, instalados en situación de uso real, en entornos residenciales de ciudades con climas soleados, durante un período de un año.

2. MATERIAL Y MÉTODOS

El trabajo se centró en la verificación de la técnica TIP-HDRI, para ser aplicada luego en la evaluación del flujo lumínico capaz de ser entregado mes a mes por tres prototipos de Sistemas de Iluminación Natural que fueron desarrollados, construidos e instalados en tres viviendas de uso residencial en la provincia de Mendoza, República Argentina. Los dispositivos son de funcionamiento vertical, y fueron ubicados previendo que los elementos de colección queden libres de obstrucciones exteriores tales como sombras de árboles o edificaciones lindantes. La relación de aspecto aproximada en los tres casos fue de 7:1.

Prototipos

El prototipo 1 es un modelo de utilidad que surgió como resultado del trabajo de tesis doctoral de Ferrón [8] sobre Barras de Iluminación Solar. Este prototipo presenta una configuración diferente a la de los otros dos evaluados, ya que su principio de funcionamiento está basado en la reflexión total interna producida dentro de las barras acrílicas, y no en la reflexión especular de un material con acabado metálico pulido. En el caso del prototipo 2, se tomó como base el diseño desarrollado por Pattini en 2003 [9], mejorando el mecanismo de cierre y estanqueidad del sistema mediante un

elemento tipo capuchón. Por último, el prototipo 3 muestra un sistema de encastré innovador entre los elementos de colección, transporte y emisión de luz, en el que se prescindió del cilindro contenedor del elemento de transporte, aligerando la estructura, reduciendo los costos, y permitiendo alcanzar un diámetro y longitud de mayor escala (0.5 m x 3.5 m).

Prototipo 1: Está ubicado en una zona de baja densidad residencial, y posee como cuerpo central un conjunto de barras acrílicas de 0.025 m de diámetro (Barras de Iluminación Solar ó BIS), sujetadas por un disco acrílico, y dispuestas dentro de un tubo de plástico PVC de 100 mm de diámetro interior. La longitud total del elemento de transporte es de 0.6 m, esto significa que a pesar de que en su conformación presenta seis barras acrílicas individuales, la suma de sus diámetros da al sistema una relación de aspecto de 6:1. El dispositivo culmina en su extremo superior con una cúpula acrílica transparente y en su extremo inferior con un disco acrílico con acabado esmerilado (Figura 1)



Figura 1: Prototipo 1. Izquierda, núcleo de barras acrílicas; Centro, cúpula exterior, Derecha, zona de emisión de luz.

El acrílico utilizado posee un grado de transparencia del 98,9%, y un índice de refracción indicado por el fabricante de $n=1,49$. Este dispositivo utiliza como principio de funcionamiento para el transporte de luz la reflexión total interna.

Prototipo 2: Situado en una zona de densidad residencial media, consistente en un tubo de PVC de 0.22 m de diámetro recubierto en su interior por una lámina de polietileno aluminizado de 50 μm . En su extremo inferior, el conjunto está cerrado por un disco de acrílico esmerilado que encastra en un plafón formado por dos aros de madera MDF cortada por LASER, mientras que su extremo superior posee un corte en sesgo a 30° y un capuchón metálico cerrado por una tapa acrílica transparente de 4 mm de grosor, adhesivada con silicona. La longitud total es de 1.5 m (Figura 2)



Figura 2: Prototipo 2, Izquierda, tubo conductor aluminizado; Centro, prototipo instalado; Derecha, zona de emisión de luz.

La lámina de plástico espejado posee un grado de reflexión de 93%, y está libre de polvo e impurezas debido a que los extremos superior e inferior del dispositivo fueron cerrados de manera estanca mediante el uso de sellador elástico de silicona.

Prototipo 3: Instalado en una zona de alta densidad residencial, se trata de un sistema de 3,5 m de longitud y 0.5 m de diámetro compuesto por tres elementos que se vinculan in situ. Para su instalación, se posiciona en primer lugar el elemento colector, que posee una pieza con forma de aro que se vincula al techo y sobre la que se monta un capuchón con un sesgo a 30° y una tapa acrílica transparente de 4 mm de espesor, seguidamente bajo el cielo raso se instala el plafón circular, construido en acrílico esmerilado y MDF cortado con LASER, y finalmente se vinculan estas piezas mediante una lámina de plástico polietileno aluminizado de 50 µm que se cierra sobre el perímetro formando un tubo (Figura 3)



Figura 3: Prototipo 3; Izquierda, esquema del conjunto. Derecha, instalación sobre techo inclinado.

En este caso, la lámina de polietileno aluminizado ($r^{\circ}93$) permitió generar una innovación en la conformación del sistema gracias al espesor del material: al formarse la curva del cilindro, la lámina adquiere rigidez suficiente como para no requerir ser contenida dentro de un tubo de otro material, sino que se auto-porta. Esta nueva manera de proyectar el elemento de transporte permitió alcanzar dimensiones que no hubieran sido posibles lograr mediante los formatos utilizados anteriormente. Gracias a la construcción de este prototipo se verificó una reducción en el peso del conjunto (de aproximadamente un 75% respecto del prototipo 2), se redujo la cantidad de material utilizado, reduciendo así los elementos de encastre y unión entre piezas, se simplificó el procedimiento para la instalación y se redujeron los costos de fabricación del conjunto en aproximadamente un 40%.

Plan de mediciones de prototipos

Las mediciones se realizaron a lo largo de todo un año (2013), aproximadamente cada 30 días dependiendo de las condiciones de cielo, eligiendo días despejados con pronóstico climático extendido para toda la jornada. Los momentos de medición fueron las 10:15 hs, 13:30 hs y 16:30 hs, según la hora oficial Argentina UTC-3. Como registro de control de las condiciones lumínica exteriores se relevaron la iluminancia exterior horizontal global ($E_{h_{ext}}$) y difusa ($E_{h_{dif}}$) al momento de las mediciones utilizando los datos obtenidos por la Estación de medición de iluminación natural exterior, instalada sobre el techo del edificio del CCT- CONICET Mendoza (32.53S y 68.51°). Este equipo de adquisición de datos está homologado conforme a las especificaciones del International Daylight Measurement Programme –IDMP-, y que fue incorporado a la red mundial de estaciones, dependiente de la CIE. La estación realiza una toma de datos minuto a minuto mediante un sistema automatizado basado en un microcontrolador MC68H11 y provisto de cuatro sensores. Todos los datos son chequeados de acuerdo a los controles de calidad establecidos por la CIE [10] para las estaciones de la red mundial (Figura 4).



Figura 4: Estación de medición de iluminancia Mendoza.

Cabe mencionar que el tipo de cielo predominante en la provincia es el cielo claro, con presencia de sol, y con un porcentaje de cielo despejado o parcialmente despejado que alcanzan un promedio de 83% anual, sumando aproximadamente 2850 horas de irradiación solar.

Flujo de iluminación natural

En este trabajo se determinó el flujo lumínico aportado por cada sistema, para lo que se recurrió al uso de la técnica TIP-HDRI, presentada en 2009 por investigadores de la universidad de Monfont, UK y el MIT, USA. A diferencia de otros métodos para la caracterización de sistemas de iluminación vertical [11] esta técnica se basa en el concepto de que las imágenes de alto rango dinámico (HDR) contienen la información de la luminancia de la escena real en cada uno de los píxeles que la componen, lo que permite establecer mediante la captura de imágenes con una cámara digital (en este trabajo, una Canon A570IS con sensor de semiconductores de óxido de metal –CMOS-), cuál es el flujo luminoso emitido por dispositivos de grandes áreas, como pueden ser ventanas o lumiductos.

Comprobaciones del coeficiente q^{-1}

Para la aplicación de la técnica TIP-HDRI fue necesario determinar el valor del coeficiente de transmisión de luminancia en el espectro visible (q) de un material de acabado superficial difuso.

Siguiendo los pasos de la publicación original, se caracterizó una lámina de papel blanco (difusor de luz no-Lambertiano), de 80gr, que fue colocada como filtro difusor de los haces de luz que atravesaban la zona de emisión de los sistemas verticales. Se decidió trabajar con este material por dos razones: en primer lugar, porque en el apartado “anexo” de su trabajo, Mardaljevic expone detalladamente la metodología utilizada para determinar el valor q^{-1} de una hoja de papel ink-jet estándar, cuyo resultado estuvo comprendido entre $q^i = 0.0448 \text{ sr}^{-1}$ y $q^{40} = 0.0395 \text{ sr}^{-1}$ para condiciones de cielo cubierto y cielo despejado con un ángulo de incidencia $\sim 40^\circ$ respectivamente, y en segundo lugar porque se trata de un material estandarizado, de bajo costo y disponible en gran variedad de tamaños. El valor de inclinación $\sim 40^\circ$ para la mediciones con luz directa se adoptó tomando base a los resultados de Mardaljevic en los que comprobó que para ángulos mayores de 30° , en el caso del papel utilizado la caída en el valor de q es equiparable a la ley del coseno. En su experiencia, los investigadores utilizaron como equipamiento una esfera integradora, un luminómetro y una fuente de luz artificial estabilizada. En este trabajo tomamos como referencia los resultados publicados, y realizamos la tarea de validar el uso de estos coeficientes de luminancia para la transmisión de la radiación visible, recurriendo a la comparación de datos de flujo obtenidos mediante la técnica TIP-HDRI versus las mediciones realizadas con un arreglo semicircular de sensores de iluminancia, para realizar los ajustes pertinentes en caso de ser necesario.

Medición de flujo mediante sensores de iluminancia B-plano

Se construyó un recinto de planta cuadrada, cuyas superficies interiores se pintaron de color negro mate a fin de eliminar la componente interreflejada de luz, dotado de una abertura cenital de 100 mm de diámetro (Figura 5). Las dimensiones del recinto fueron proyectadas respetando el criterio del quintuplo de la distancia respecto del tamaño del área evaluada, a fin de poder considerar esta última como una fuente puntual. El principio de funcionamiento sobre en que se apoyó la construcción del dispositivo responde a similares fundamentos de diseño que el Goniómetro Bidireccional desarrollado por el Lawrence Berkeley National Laboratory, U.S.A. sobre el final de los años ochenta [12]. Tomando como antecedente los experimentos realizados para la caracterización lumínica de Barras de Iluminación Solar en el trabajo de tesis doctoral de Ferrón [8], el equipamiento utilizó como fuente lumínica el sol durante días completamente despajados y completamente cubiertos, y estuvo compuesto por siete sensores marca Internacional Light modelo SCD110, asociados a un sistema de adquisición de datos multicanal modelo IL1700, conectados a una PC Pentium IV para el almacenamiento de datos mediante una salida digital.

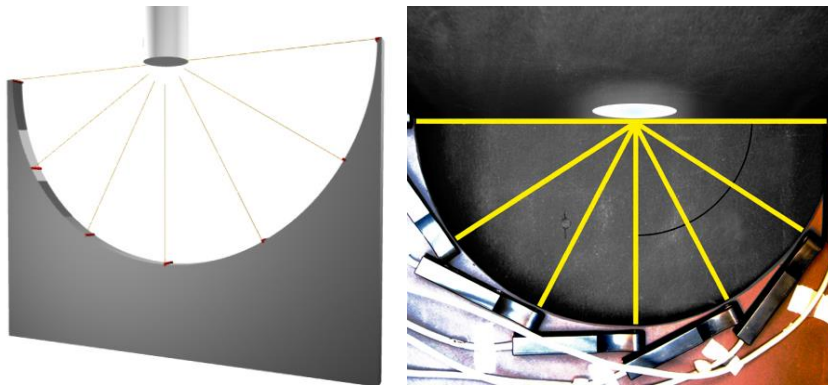


Figura 5: Sensores de iluminancia en un semiplano B. Derecha: Esquema; Izquierda: arreglo de sensores en box de ensayo.

Los valores se registraron en lux (lm/m^2) y se afectaron luego por la ley de la inversa del cuadrado de la distancia mediante la Ecuación 1:

$$I = \frac{E \cdot d^2}{\cos \gamma} \quad (1)$$

Donde:

I : Intensidad en candelas (lm/sr)

E : Iluminancia en lux (lm/m^2)

d : Distancia desde la fuente al punto de medición (m)

$\cos \gamma$: Coseno del ángulo de elevación sobre el semiplano B

Los datos derivados de esta ecuación fueron expresados en unidades de intensidad luminosa (I), es decir, en candelas (cd). Seguidamente se procesaron los valores utilizando el software Photometric Tool Box. La interfaz de este programa requiere el ingreso de los valores de intensidad correspondientes a cada ángulo de elevación γ (es decir, el ángulo que adquiere el sensor respecto de la horizontal que pasa por el centro de la fuente medida, en nuestro caso, la apertura de 100 mm), para cada semiplano B (semiplanos virtuales distribuidos en ángulos que pivotan en torno a la horizontal que pasa por el centro de la fuente evaluada). Como resultado, se obtuvo un perfil del cuerpo fotométrico del flujo lumínico en formato gráfico (curva polar) y digital (archivo *.ies).

Posteriormente, el archivo resultante en formato fotométrico digital estándar *.ies (desarrollado por la Illuminating Engineering Society [13]) se utilizó para realizar el cálculo del flujo lumínico de la fuente a través de la adaptación de una metodología para la evaluación de la polución lumínica desarrollada por Manzano y Cabello [14]. Esta metodología consiste en la creación de un espacio virtual dentro de un programa de cálculo luminotécnico, en el que sus herramientas presentan la opción de calcular la iluminancia producida por la fuente ingresada solo sobre las superficies especificadas por el usuario, para luego realizar el cálculo de la luz incidente sobre cada una de ellas, excluyendo de las mismas la porción interreflejada.

De este modo, mediante el programa RELUX¹ se construyó un espacio virtual cuyas dimensiones fueron de 1m x 1m x 1m, en el que se insertaron los distintos archivos fotométricos*.ies, replicando la ubicación espacial de la fuente durante la toma de datos con el arreglo semicircular de sensores. Así, se calculó el flujo luminoso que llegaba a cada superficie interior del cubo, mediante el producto de la iluminancia media (Lux= lm/m²) por el área (m²) de cada pared. El flujo total de la apertura de 100 mm se obtuvo entonces sumando los respectivos valores de flujos verificados en cada una de las seis paredes internas del espacio virtual, siendo la expresión utilizada:

$$\Phi_{lum} = E_1 \cdot A_1 + E_2 \cdot A_2 + \dots + E_6 \cdot A_6 = A \cdot \sum_{i=1}^6 E_i \quad (2)$$

Donde:

A: Es el área de cada pared virtual, en el experimento: 1m x 1m (m²)

E_i, i = 1...6: es la luminancia media de cada una de las paredes del recinto (lux ó lm/m²)

Como resultado, se obtuvieron los valores diarios de flujo ingresante a través de la apertura de 100 mm, con registros tomados cada 1 hora, bajo condiciones de cielo despejado e iluminación global difusa (Gráfico 1)

Medición de flujo TIP-HDRI

Siguiendo la publicación original, para cada medición de flujo se realizaron series de 4 fotografías con apertura de diafragma f4 y velocidades de obturación variables, desde 1/2000s hasta 1/5s (Figura 6).

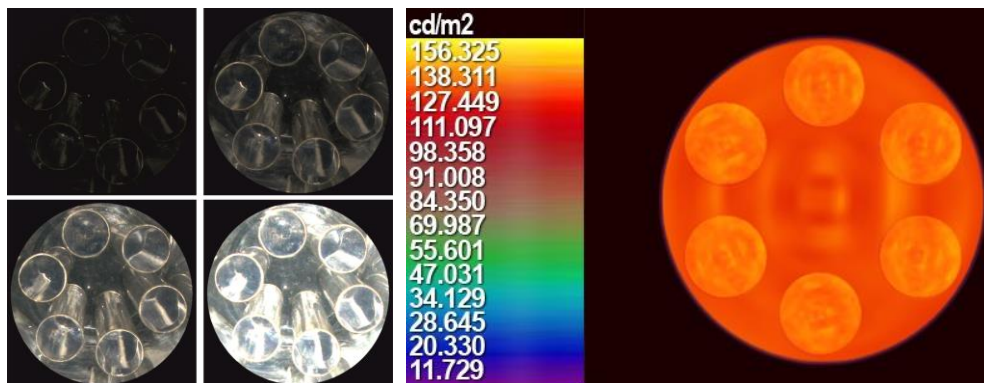


Figura 6: Izquierda, muestra de fotografías tomadas con diferentes velocidades de obturación; Derecha, imagen procesada en colores falsos con escala de valores en cd/m² (Las imágenes son ilustrativas).

Finalmente se compusieron las imágenes HDR a través de la herramienta on-line WebHDR [15]. Los resultados obtenidos luego del procesamiento de los datos de luminancias de las imágenes fueron operados mediante la ecuación:

$$F = E \times A = q^{-1} (L_w - L_r) \times A \quad (3)$$

Donde q^{-1} es el coeficiente de transmisión de luminancia en el espectro visible de un material difuso (en nuestro caso, q_1 y q_{40prom} ambos expresados en sr⁻¹), L_w y L_r son el promedio de luminancia registrado a través del papel y el promedio de la luminancia reflejada por el papel hacia el sensor de la cámara respectivamente (tomadas con un luminancímetro Minolta LS 110, de ángulo de lectura de 1/3° y rango de medición de 0.01 a 999.900 cd/m²), y A es el área de emisión del dispositivo evaluado (m²).

Comparación de resultados

En el gráfico 1 podemos ver que el uso del valor de $q_1 = 0.0448 \text{ sr}^{-1}$ para condiciones de iluminación de cielo cubierto mostró un alto grado de correlación entre las curvas obtenidas. Sin embargo, el coeficiente $q_{40} = 0.0395 \text{ sr}^{-1}$ previsto para cielo despejado mostró mayores discrepancias, con un error típico de 15,96 en las mediciones realizadas con cada método.

¹ RELUX, [<http://www.relux.biz>] disponible en línea.

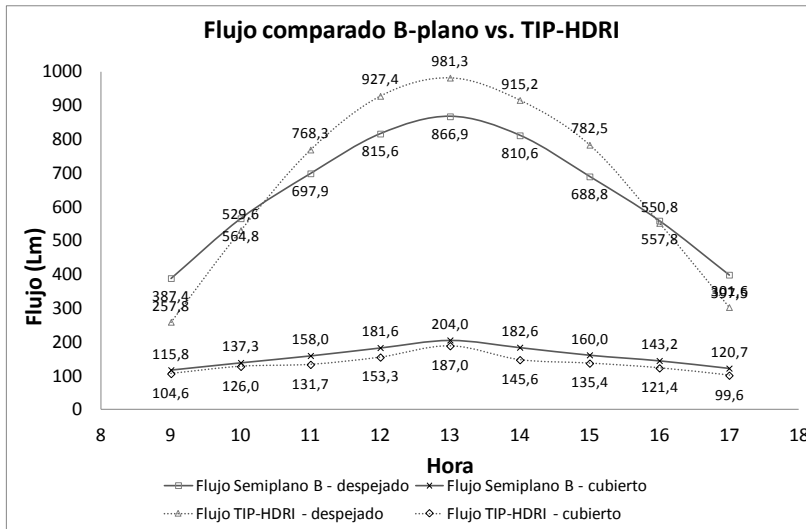


Gráfico 1: Medición comparativa de flujo B-Plano vs. TIP-HDRI.

Con el objetivo de minimizar el error entre ambos métodos se decidió calcular un nuevo valor, q_{40prom} , que sería el resultado del promedio de coeficientes q_{40} medidos para cada evaluación con sensores bajo cielo despejado, mediante la aplicación de las ecuaciones 4 y 5:

$$q_{40n} = \frac{F}{(Lw - Lr) \times A} \quad (4)$$

$$q_{40prom} = \bar{X}(q_{40}^1 + q_{40}^2 + q_{40}^3 + \dots + q_{40n})/n \quad (5)$$

El gráfico 2 muestra para el coeficiente q_{40prom} un valor de $0.0413sr^{-1}$, reduciendo el error típico a 2,57.

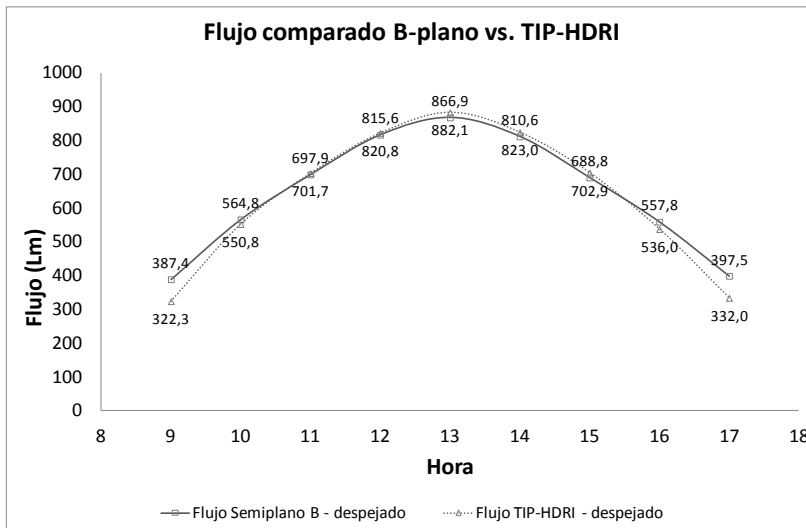


Gráfico 2: Medición comparativa de flujo B-Plano vs. TIP-HDRI.

3. RESULTADOS

Los gráficos 3, 4 y 5 muestran los resultados del flujo lumínico entregado por los prototipos 1, 2, y 3 respectivamente, medidos durante días típicos de cada mes del año, para tres momentos del día, 10:15 hs, 13:30 hs, y 16:30 hs.

En todos los casos, la forma de campana invertida evidencia que en los extremos del gráfico se encuentran los valores registrados durante los meses de verano, y en la zona central se representan los meses de invierno (según las características estacionales del hemisferio sur).

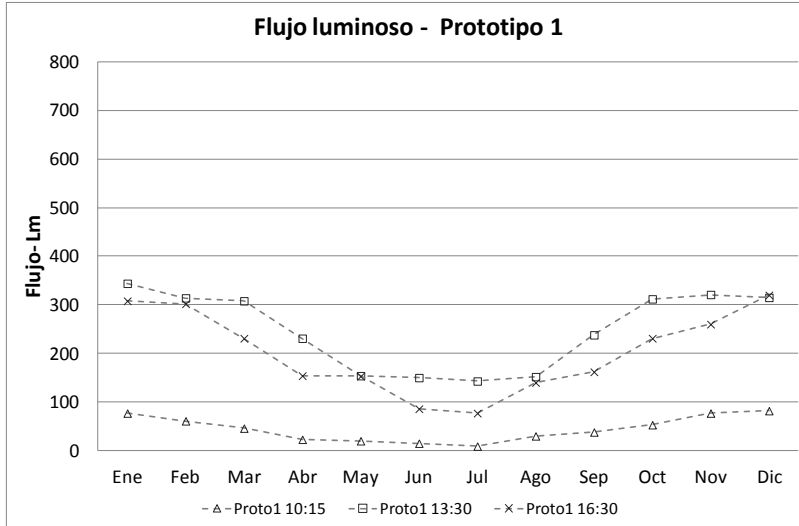


Gráfico 3: Comportamiento estacional del prototipo 1. Meses de Enero a Diciembre, escala 0-450 lm.

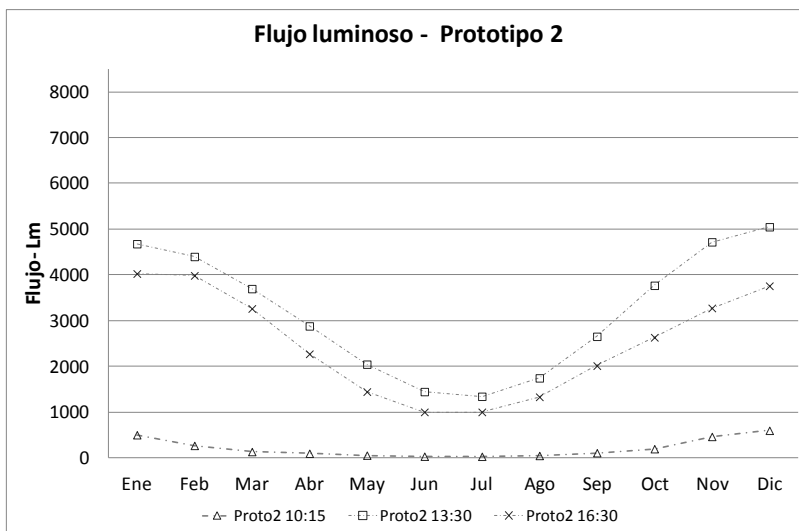


Gráfico 4: Comportamiento estacional del prototipo 2. Meses de Enero a Diciembre, escala 0-5000 lm.

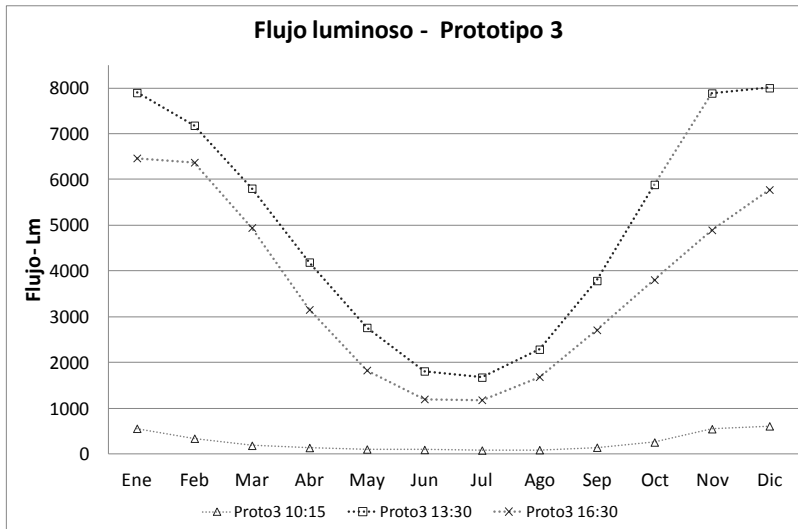


Gráfico 5: Comportamiento estacional del prototipo 3. Meses de Enero a Diciembre, escala 0-8000 lm.

Las curvas correspondientes al prototipo 1 (Gráfico 3) muestran el rendimiento más bajo de los tres sistemas, con un orden de magnitud de los datos cercano a los 450 lm, se registró un mínimo de 9 lm y un máximo de 344 lm, alcanzando un promedio anual de rendimiento de 165 lm con una desviación estándar de 111 lm. Recordemos que el sistema posee seis barras acrílicas de 25 mm de diámetro cada una, con una relación de aspecto de 6:1. La suma de las áreas de las BIS representa una superficie total de emisión de 0,002946 m², hecho que podría explicar el modesto aporte lumínico del dispositivo durante todo el año.

Los prototipos 2 y 3 muestran curvas de rendimiento en las que se percibe un incremento de flujo en función de las dimensiones de los sistemas (Gráficos 4 y 5): a pesar de poseer la misma proporción largo/diámetro, vemos que a mayor diámetro del tubo, mayor flujo lumínico aportado. En ambos casos, el análisis del comportamiento estacional muestra cómo los valores correspondientes a los meses de invierno se mantuvieron dentro del rango de los 1000 lm a 2000 lm durante las 13:30 hs y 16:30 hs horas del día, en tanto que, durante los meses de verano, esos mismos rangos horarios registraron un incremento de flujo que llegó a alcanzar valores de hasta 5048 lm para el Prototipo 2, y de 8002 lm para el Prototipo 3.

Para los tres prototipos encontramos que durante cada día evaluado los registros de flujo matutino de todo el año estuvieron por debajo de los 650 lm, mientras que los valores del mediodía (hora oficial) mostraron variaciones de 1342 lm a 5048 lm y de 1676 lm a 8002 lm para los Prototipos 2 y 3 respectivamente. Frente a esto, se observa que la cantidad de luz aportada al espacio un mismo día puede variar de un rango de cientos a miles de lúmenes (en el mismo día) en pocas horas (558 lm a las 10:15 hs a 7897 lm a las 13:30 hs el día 12 de Enero). En función del clima luminoso anual y de los requerimientos de uso del espacio a iluminar, será necesario contemplar el desarrollo de elementos de emisión que procuren un control del flujo emitido por los Sistemas.

4. CONCLUSIONES

La construcción de un equipo para la medición de iluminancias en diferentes puntos de un semiplano B permitió determinar el flujo de luz natural ingresante a través de una abertura de 100 mm de diámetro y establecer mediante la comparación de resultados la factibilidad de uso de la técnica TIP-HDRI para la determinación del flujo lumínico. Las diferencias registradas entre los valores obtenidos mediante el uso de una u otra metodología fueron ajustadas a partir de la calibración del valor del coeficiente q^{-1} de una hoja de papel ink-jet. Esto se logró promediando los datos de flujo obtenidos de la medición de las intensidades con el arreglo de sensores de iluminancia y comparando el valor resultante con el del coeficiente establecido por los creadores de la técnica. Con este ajuste, el nuevo método propuesto para la calibración del valor del coeficiente q^{-1} (surgido a partir de la falta de una esfera integradora similar a la utilizada por Mardaljevich en su publicación original) mostró ser útil para validar el uso de la hoja de papel seleccionada, con un error típico de 2,57. Se espera en un próximo trabajo poder replicar la experiencia de los investigadores, para contrastar los valores recabados mediante la técnica TIP-HDRI y el arreglo semicircular de sensores de iluminancia. Entendiendo

que la falta de datos de rendimiento de los sistemas de iluminación natural es uno de los principales obstáculos que enfrentan arquitectos y proyectistas al momento de planificar su aplicación en los espacios construidos, se validó una técnica de medición simple y se adoptó el uso herramientas gratuitas, con el objetivo de que tanto profesionales como investigadores que carezcan de equipamientos más complejos puedan abordar de forma independiente el análisis y la evaluación del rendimiento en términos de flujo emitido de dispositivos de iluminación natural en situaciones de uso real.

Con respecto a la evaluación in campo de los tres Prototipos, gracias a la simplicidad de la técnica TIP-HDRI fue posible determinar sus rendimientos lumínicos in campo, en días seleccionados, mes a mes, durante un periodo de un año. Como primer resultado se observó que a pesar de que los tres sistemas conservan igual proporción largo/diámetro (aspect ratio), la cantidad de flujo emitido por cada uno de ellos fue dispar, correspondiéndose los valores de flujo más elevados con los prototipos de mayores dimensiones totales. En el caso de los lumiductos cuyo principio de funcionamiento es la reflexión especular, las dos dimensiones que conforman su cuerpo se relacionan directamente con la ganancia o la pérdida de eficiencia total del sistema. Así, debido al incremento del número de reflexiones que se produce aumentando el largo del sistema, podemos decir que para esa dimensión la eficiencia es inversamente proporcional (a mayor largo, menor eficiencia). Por el contrario, al aumentar el diámetro de los sistemas, la distancia entre superficies reflectantes aumenta, provocando que el número de reflexiones de los haces lumínicos disminuya. Para el diámetro, la eficiencia del sistema es directamente proporcional, ya que al aumentar esa dimensión ésta también aumenta. El desarrollo de un modelo que caracterice numéricamente esta correspondencia es una línea de interés para continuar con futuras investigaciones.

Desde la perspectiva del análisis de los resultados lumínicos de cada sistema, encontramos niveles de flujo que muestran una gran amplitud en su rango de magnitud, tanto estacional como diaria. A partir de esto, se recomienda dimensionar los sistemas de iluminación previendo que los mismos alcancen los niveles requeridos de flujo para la iluminación del interior en los periodos de menor altitud solar. Sumado a esto, y dependiendo de las tareas que los ocupantes deban desarrollar en los ambientes donde se encuentren instalados los sistemas, se hace evidente la necesidad de incorporar al diseño de estos sistemas elementos que permitan regular de forma manual o automática la cantidad de flujo emitido durante los periodos de mayor radiación solar exterior, con el objetivo de prevenir posibles deslumbramientos lumínicos.

6. BIBLIOGRAFÍA

- [1] Mascaró, L; Mascaró, J.L., Storchi, C. "Incidências das variáveis projetivas e de construção no consumo energético dos edificios", DC Luzzatto, 134 pp, ISBN:8524103906, Porto Alegre, 1992
- [2] Fontoyont, M., Tsangrassoulis, A., Synnefa, A., "SunLight Handbook" Chapter , 2: Daylighting, revision, 2004
- [3] Institut für Licht und Bautechnik FH Köln, "Systematic zu Tageslichtsystemen" Fachhochschule Köln, Colônia. 2000
- [4] Galasiu A.D, Veitch J.A., "Occupant preferences and satisfaction with the luminous environment and control systems in daylight offices: a literature review" Energy and Buildings 38 (7), 728-742. 2006
- [5] Ferrón, L.; Pattini, A. y Lara, M., "Disponibilidad comercial de sistemas de transporte de luz natural", Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente, Salta; Vol. 9 pp. 18 – 21, 2005
- [6] Lambda Research Corporation, "TracePro® User's Manual", Littleton, MA., 2010
- [7] Mardaljevic, J., Painter, B., Andersen, M. "Transmission illuminance proxy HDR imaging: A new technique to quantify luminous flux" Lighting Research and Technology, 41 (1) pp. 27-49, 2009
- [8] Ferrón L. "Barras de Iluminación Solar: aplicabilidad en contextos urbanos", Tesis doctoral presentada para aspirar al título de Doctor en Medio Ambiente Visual e Iluminación Eficiente, ILLyV, UNTucumán, 2010.
- [9] Pattini A., Mitchell J., Ferrón L., "Diseño de lumiductos de bajo costo para vivienda bioclimática unifamiliar" Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente, Vol. 7, Nº 1, Argentina. ISSN 0329-5184; 2003
- [10] CIE, "IDMP stands for International Daylight Measurement Programme". Commission Internationale de l'Eclairage (International Lighting Commission), Vienna, Austria, 1991.
- [11] Carter, D., "The measured and predicted performance of passive solar light pipe systems". Lighting Research and technology, vol. 34 no. 1 39-51, 2002
- [12] Papamichael K., Klems, J., Selkowitz, S. "Determination and application of Bidirectional Solar-Optical properties of fenestration systems", 13th National Passive Solar Conference, pp. 7, Massachusetts Institute of Technology, 1988
- [13] IESNA, [<http://www.iesna.org>], disponible en línea, 2006
- [14] Manzano E.R., Cabello A. "Evaluación de la polución lumínica urbana" Revista Luminotécnica, num. 79, pág. 118 a 124. Editorial de la AADL. 2005
- [15] <http://www.jaloxa.eu/webhdr/>, visitado 09/04/2014.