

APROVECHAMIENTO DE LA RADIACIÓN SOLAR COMO FUENTE DE ILUMINACIÓN PARA ESTACIONES DE TRABAJO UTILIZANDO FIBRA ÓPTICA COMO MEDIO TRANSMISOR Y EMISOR*

David Ricardo Cuervo Tabares**

Juan Camilo Moreno Bernal***

Resumen: se propone el aprovechamiento de la radiación solar como fuente de un sistema de iluminación para estaciones de trabajo. Para esto se construyó un sistema que colecta la radiación solar por medio de un espejo parabólico para luego transmitir a través de un arreglo de fibra óptica la porción visible del espectro de dicha radiación y emitirla de forma puntual en el área de trabajo. Para caracterizar el sistema se realizaron pruebas de funcionamiento con radiación solar y se describió el comportamiento del emisor por medio de pruebas de fotometría como distribución de candelas y cono de dispersión.

Palabras clave: sistema de iluminación, radiación solar, fibra óptica, estaciones de trabajo.

Abstract: The use of solar radiation as source of an illumination system for workstations is proposed. For this, a system to collect solar radiation with a parabolic mirror was built. The visible portion of the spectrum of this radiation is then transmitting through a fixture of optic fiber and emitted as a punctual light in the work area. To characterize the system, operation tests with solar radiation were conducted in order to describe the behavior of the emitter by photometry tests like Candlepower distribution and cone of dispersion.

Key words: Illumination system, solar radiation, optic fiber, work stations.

* Fecha de recepción: 2 de noviembre de 2003. Fecha de aceptación para publicación: 19 de diciembre de 2003.

** Ingeniero industrial, Pontificia Universidad Javeriana. Correo electrónico: david.cuervo@javeriana.edu.co.

*** Estudiante de ingeniería industrial, Pontificia Universidad Javeriana. Correo electrónico: moreno-j@javeriana.edu.co

1. INTRODUCCIÓN

La iluminación de grandes recintos con luz solar es una práctica muy común en la industria y el comercio; esto se debe a que el horario de trabajo de la mayoría de las empresas es el horario durante el cual se recibe radiación solar,¹ aproximadamente entre las 06:00 (amanecer) y las 18:00 (atardecer), y a que su uso permite no sólo reducir el consumo de energía eléctrica, sino aumentar el confort visual de los trabajadores, generar un ambiente más cálido [OIT, 1989], valorizar los inmuebles, entre otros beneficios. Por ejemplo, en los centros comerciales, los locales situados sobre corredores iluminados con luz natural tienen en promedio un 30% más de valor, e incluso, el uso de la luz solar es un requerimiento que se debe tener en cuenta en el diseño de edificios [Naciones Unidas, 1977].

Se debe tener en cuenta que la iluminación interior con luz solar es posible en la actualidad sólo gracias a la utilización de tejados translúcidos de vidrio o plástico (claraboyas), o grandes ventanas, las cuales permiten el paso de la luz y la iluminación. Por otro lado, desde 1983 se está utilizando una forma de iluminación conocida como tubos de luz (*light-pipes*), en la que la luz solar es conducida desde el exterior al interior de una edificación por medio de tubos en cuyo interior la luz se refleja a través de espejos o prismas hasta el lugar de emisión [RPI, 2002].

En cuanto a la iluminación en estaciones de trabajo, la luz natural es suficiente, siempre y cuando la tarea realizada sea de un esfuerzo visual y una complejidad medias, ya que por la forma de recolección de la luz solar a través de claraboyas ésta es insuficiente y muy dispersa; asimismo, la variación de su ángulo de incidencia a lo largo del día hace que se generen sombras sobre las superficies de trabajo. Es por esto que cuando se realiza un trabajo de precisión es fundamental que sobre los objetos que se están manipulando no se presenten sombras ni distorsiones de sus formas y colores o deficiencia en el contraste, por lo que se requiere de una iluminación artificial puntual.

En este trabajo se propone, entonces, que las actuales luminarias artificiales sean sustituidas por un sistema de iluminación que aproveche la radiación solar para ofrecer una adecuada iluminación en las estaciones de trabajo. El sistema propuesto constituye un híbrido entre los tubos de luz y la iluminación artificial a través de fibra óptica que se viene utilizando desde la década de los noventa [Rodríguez, González, 1992], con el cual se busca llevar luz solar a lugares remotos donde no puede llegar directamente (característica de los tubos de luz), aprovechando un medio transmisor más cómodo, flexible y de menor tamaño. Dicho sistema consta de tres fases: colección, transmisión y emisión de luz solar de manera puntual sobre el área de trabajo. La primera fase, colección de radiación solar, es posible haciendo uso de un espejo

¹ Energía emitida por el sol y propagada en todas las direcciones a través del espacio mediante ondas electromagnéticas [Rodríguez, González, 1992].

parabólico que la concentra en su punto focal [Tipler, 1994], lugar donde se posiciona un arreglo de fibra óptica para iluminación en el que empieza la fase de transmisión. El arreglo de fibra óptica se encarga de recibir la radiación colectada y transmitir la luz solar hasta su otro extremo. La fase de emisión tiene lugar cuando la luz que viaja a través de la fibra óptica es emitida de manera puntual por el arreglo.

En cada fase los elementos fueron sometidos a pruebas para determinar el correcto funcionamiento de sus componentes y del sistema en general. En la fase de colección, el espejo tuvo pruebas de campimetría y de colección (o concentración de luz); en la segunda fase se determinó experimentalmente la eficiencia de transmisión del arreglo de fibra óptica y en la fase de emisión se realizaron las pruebas de fotometría de distribución de candelas y cono de dispersión.

2. DESCRIPCIÓN DEL TRABAJO

La iluminación de recintos con luz solar por medio de claraboyas es una práctica muy común debido a los beneficios que de su uso se derivan en términos de salud: mejoría en el confort visual [Quintana, 2003] y en términos de economía: reducción del uso de energía eléctrica y aumento de la productividad [Niebel, 1993]. De igual forma, la fibra óptica surge como una alternativa a las actuales luminarias artificiales, dada su flexibilidad, durabilidad y facilidad de instalación y mantenimiento. Adicionalmente, éste es un material que puede proveer una iluminación directa o dispersa, con la ventaja de cambiar de color de acuerdo con la luminaria que le sirva de fuente. Asimismo, tanto la luz solar como la fibra óptica son empleadas como elementos estéticos y decorativos que añaden valor a los establecimientos y calidez a sus ambientes; sin embargo, aunque muy usadas, no se había desarrollado un sistema que combinara sus beneficios.

De otra parte, la mayoría de los colectores solares desarrollados hasta el momento tienen como fin el calentamiento de agua o la conversión de energía solar en fotovoltaica, utilizando celdas solares [Florida Solar Energy Center, 1998] o a través de un dispositivo denominado torre de fibras [Zik et al., 2000] el cual, por medio de un campo heliostático dirigido hacia la parte superior de una torre central, concentra la radiación térmica proveniente del sol y la distribuye a nodos de fibra óptica. Estas fibras transportan la radiación hacia un receptor no isotérmico que, junto con una turbina de gas, generan energía eléctrica.

Debido a que el objetivo del trabajo se dirigía más hacia la colección de la luz visible, se amplió la búsqueda hacia las distintas formas de concentrarla, encontrando dos grandes grupos: lentes y espejos (esféricos y parabólicos) [Wilson, 1996]. Aunque ambos colectan la luz solar de una manera eficiente, en los lentes una parte de la luz es refractada para concentrarse y otra parte es reflejada —generando pérdidas a la entrada—, mientras que los espejos la reflejan hacia su punto focal para ser concentrada.

La fase de colección requería el diseño de un colector de radiación solar y para ello se procedió a elegir, entre los lentes o los espejos, un dispositivo para la concentración de la radiación. Para definir el criterio de selección se buscó un dispositivo que permitiera mayor concentración de luz con menores pérdidas, que fuese de más fácil construcción y con mayor resistencia a la intemperie. Teniendo en cuenta dichos criterios se optó por un espejo esférico, ya que con éste se puede concentrar gran cantidad de radiación solar y su construcción es más fácil y económica que la de un lente, pues este último requiere un trabajo y cálculo óptico especial para poder dirigir la refracción hacia un mismo punto, teniendo aún mayores pérdidas debido a la reflexión.

Para las fases de transmisión y emisión se optó por usar un arreglo con fibra óptica de las siguientes características: que fuera para aplicaciones de iluminación, que el diámetro de las fibras fuera lo suficientemente grande para unir varias de éstas y formar un nodo que pudiera recibir, transmitir y emitir una buena cantidad de luz y, finalmente, que su precio fuera económico. La fibra óptica adquirida tuvo las siguientes especificaciones técnicas:

- Fibra óptica plástica en acrílico PMMA.²
- Diámetro: 0,080" ó 2 mm.
- Se trata de una fibra individual sin el recubrimiento de PVC que poseen usualmente los cables de más fibras.

A continuación se construyó un modelo funcional del sistema de iluminación. La fase de colección consistió en la elaboración de un modelo de prueba del colector solar, el cual se componía de media esfera de poliestireno expandido con un diámetro de 30 cm, forrada internamente con pequeños hexágonos de una película reflectiva autoadhesiva. Después de algunas pruebas iniciales se estableció que aunque la geometría del modelo era la correcta para la aplicación, al concentrar una importante cantidad de radiación solar, pese a su reducido tamaño y materiales de fabricación, al espejo esférico se le debía hallar su punto focal exacto por medio de un estudio de campimetría.

Dado que existen objetos que ya tienen la geometría calculada para concentrar ondas en su punto focal, se decidió entonces no hacer el estudio de campimetría del punto focal del espejo esférico, sino más bien evaluar las diferentes opciones disponibles, resultando como mejor opción una antena común de televisión satelital, debido a su tamaño, a que son relativamente fáciles de conseguir y no son muy costosas.

Estas antenas están diseñadas para concentrar ondas electromagnéticas que no cubren el espectro de la radiación solar [Dubroff, Marshall, 1997], por lo que fue necesario modificarla para convertirla en el espejo requerido. Para esto se investigaron los diferentes tipos

² PMMA (polymethyl-methacrylate): material termoplástico amorfo, transparente en un 92% en el rango de los 400 a los 750 nm. Es duro, de rigidez media, fácil de rayar y fácil de brillar. Excelente desempeño en exteriores, resiste la intemperie sin que se reduzcan sus propiedades ópticas o mecánicas [Veitch, Newsham, 2002].

de recubrimientos que se encuentran en el mercado, encontrando entre ellos el baño en zinc, cromo, cromo decorativo, níquel y cromoduro. Para determinar el tipo de baño que se debía dar a la superficie de la antena se realizaron pruebas sobre láminas metálicas con cada uno de los tipos de baños. Se encontró que el recubrimiento que mayor brillo ofrecía, después de ser pulido y que además era aceptado sin problemas por el material de la antena (Cold Roll),³ era el cromado decorativo, material con el cual se realizó el recubrimiento definitivo.

Inicialmente, para la transmisión y la emisión las fibras se unieron con adhesivos especiales para plásticos, pero esto resultó en un cambio en la estructura física, generando pérdidas en la transmisión y deterioro de las mismas. Se recurrió entonces a unir las de manera mecánica con abrazaderas. Además, se observó que el arreglo de fibra óptica por sí mismo constituye un emisor de luz, ya que en su extremo terminal se pueden cortar todas las fibras a la misma longitud y pulirlas, de forma que sean una sola superficie plana, convirtiéndose en una luminaria en sí misma, y aunque existe la posibilidad de utilizar accesorios especiales que se encuentran en el mercado para la dispersión de la luz, esto cambiaría las características fotométricas del sistema, pues alteraría la distribución de la luz emitida y disminuiría su concentración.

Finalmente, el arreglo fue posicionado en el punto focal del espejo. Con el modelo ya terminado, se procedió a dar inicio al diseño de experimentos y a la aplicación de las pruebas.

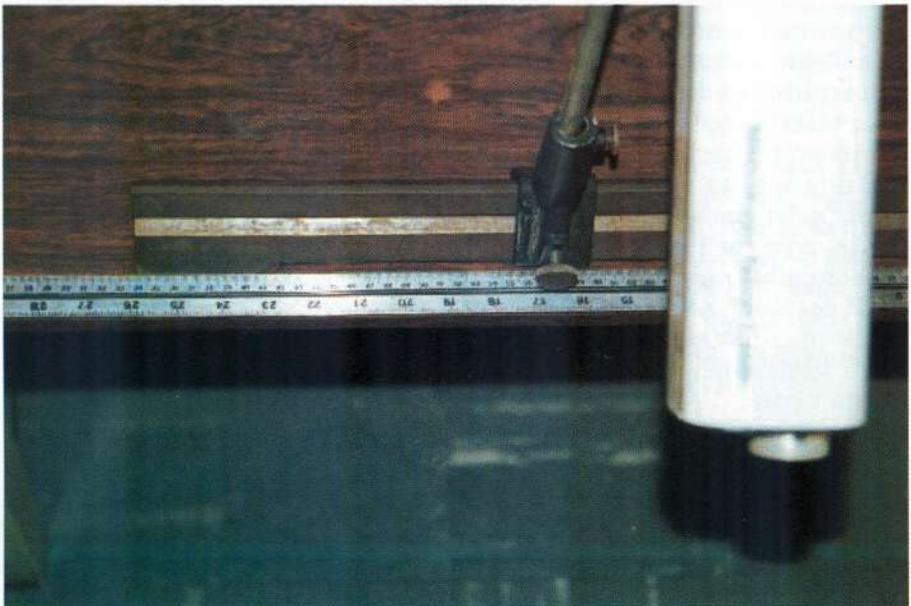
Lo primero que se debía verificar era si la fase de colección funcionaba correctamente, es decir, comprobar que el punto focal del espejo parabólico, después de las modificaciones a las que fue sometido, aún estaba en su posición correcta, así que se desarrolló una metodología denominada campimetría, que consiste en simular con un haz de luz un punto de una onda plana que incide sobre el espejo y comprobar si se refleja en el punto focal. Como fuente de luz, para que recorriera cada uno de los puntos de la superficie del colector, se utilizó un haz de rayo láser, acoplado a una nuez escualizable y un jinetillo que se deslizaba en un banco óptico, el cual estaba sobre una mesa en la que se fijó una regleta metálica y con la que se alineó en el centímetro 50 para poder tomar las mediciones de desplazamiento (Figura 1). A su vez, el colector fue dividido en cinco franjas horizontales de 12 cm de grosor cada una, ubicado a una distancia horizontal de 190 cm de la base del láser. Cada franja es una demarcación que permite delimitar áreas más reducidas, para en su centro hacer mediciones sobre una línea horizontal, las cuales se supone que representan a cualquier punto dentro de la superficie de la franja; así se evita recorrer de manera exhaustiva la superficie del colector, pues sería un trabajo muy dispendioso (Figura 2).

³ Láminas de acero delgadas, cuyo espesor ha sido logrado mediante un proceso de enrollamiento a temperatura ambiente.

Figura 1. Láser de metrología con soporte sobre riel óptico.



Figura 2. Espejo parabólico con franjas para campimetría.



El punto inicial para cada una de las franjas era el ángulo para el cual el láser, apuntando en el centro horizontal de cada franja, se reflejaba exactamente en el punto focal. Cabe anotar que dicho plano es igual para todas las franjas, pero debía ubicarse manualmente para cada una de ellas, ya que para cada franja se debía cambiar la altura del láser.

Una vez ubicado el punto inicial para cada franja, es decir, la altura del láser y el ángulo que éste formaba con la vertical, se realizaron las mediciones variando la posición del láser con respecto a la vertical del espejo en forma paralela a distancias de 5 cm por medición hacia cada uno de los lados del espejo (izquierda y derecha de su centro), formando un conjunto de puntos de medición sobre una línea horizontal para cada franja. Para cada uno de los puntos de la línea se determinó si el haz láser se reflejaba sobre el punto focal, en qué medida se distanciaba y en qué dirección se reflejaba el centro exacto del punto focal.

Después de comprobar el correcto funcionamiento del colector, para las fases de transmisión y emisión se debían establecer la eficiencia de transmisión y las características de emisión del arreglo de fibra óptica a través de pruebas de fotometría ya estandarizadas, como son distribución de candelas [Ballman, 2001] y cono de dispersión [IES, 1957].

Para realizar estas pruebas el modelo fue expuesto a la radiación solar, ubicándolo sobre el eje este-oeste y direccionándolo hacia el sol; sin embargo, al colector la radiación el espejo no hace discriminación entre el espectro no visible y el visible,⁴ generando una alta concentración de ondas en la frecuencia del infrarrojo (IR), también conocida como radiación térmica, lo cual hace que se eleve la temperatura y se cree un problema debido a que la fibra óptica no es capaz de resistir tan altas temperaturas durante largos periodos de tiempo, por lo que se llega al punto de reblandecimiento, derritiéndose y luego quemándose (Figuras 3 y 4). Debido a esto, tanto la determinación de la eficiencia como las pruebas fotométricas se realizaron utilizando un proyector halógeno de 500W.

Figuras 3 y 4. Efecto del exceso de temperatura por radiación térmica sobre el arreglo de fibra óptica.



⁴ La radiación solar se compone en un 47,3% de luz visible (VIS), y en un 52,7% de radiación invisible al ojo humano (7% de luz ultravioleta, UV, y 45,7% de infrarrojo, IR) [IES, 1957].

Al considerar el factor de eficiencia del arreglo independiente de la fuente de iluminación, los datos obtenidos con la luminaria artificial son válidos en el cálculo del mismo. Sin embargo, en el caso de las pruebas fotométricas la cantidad de iluminación de salida depende directamente de la de entrada; por ello, al momento de caracterizar el modelo completo del sistema en funcionamiento con radiación solar se hace una corrección de los datos, ya que la iluminación entregada por el colector es superior a la entregada por la luminaria artificial. Esto se hace por medio de un factor de relación entre la luz entregada por la luminaria y la colectada por el espejo.

La eficiencia del arreglo se calcula midiendo la cantidad de iluminación que incide sobre la superficie del arreglo y comparándola con la cantidad de iluminación emitida por éste. Las pruebas fotométricas se realizaron con la misma fuente de luz; para la prueba de distribución de candelas se barren 180° , en pasos de 10° alrededor de la superficie emisora y a una distancia constante, que es aproximadamente 5 veces el tamaño de la luminaria examinada, midiendo punto a punto la intensidad, con lo cual se expone en términos de candelas la distribución de la luz emitida por una luminaria en un espacio tridimensional. Para el cono de dispersión se toman medidas cada 5 centímetros a partir de la superficie de emisión y sobre el mismo eje del arreglo, hasta llegar a una distancia de 30 cm del emisor, determinándose de esta manera la cantidad de iluminación sobre un plano y el diámetro del área que ésta cubre. De esta manera se puede observar cómo se dispersa la luz emitida por la luminaria y cuál es su alcance efectivo en términos de iluminación.

3. RESULTADOS

3.1 CAMPIMETRÍA Y CONCENTRACIÓN EN EL PUNTO FOCAL

Por medio de la campimetría se comprobó que el colector reflejaba en su punto focal todos los puntos de una onda plana que incidía sobre su superficie. A continuación, para caracterizar el comportamiento del colector en distintas horas del día y diferentes condiciones atmosféricas, se realizaron mediciones con luz solar, en las que simultáneamente se medía tanto la intensidad de la luz solar en un momento determinado, como la intensidad de la totalidad de los haces de luz concentrados en el punto focal (Tabla 1). Con estos datos se construyó una gráfica que muestra la relación entre la iluminación del sol y la iluminación concentrada por el colector (Gráfica 1). Las variaciones presentadas en dichos datos se deben a que, aunque el sol emite de manera constante su radiación, la rotación de la tierra hace que la cantidad de iluminación recibida aumente desde el amanecer hasta el mediodía, cuando el sol se encuentra en el cenit y disminuya a medida que se oculta. Asimismo, la presencia de nubes en la atmósfera hace que la iluminación tenga caídas intermitentes, a veces durante cortos periodos si son cúmulos o incluso durante horas si son nimbos.

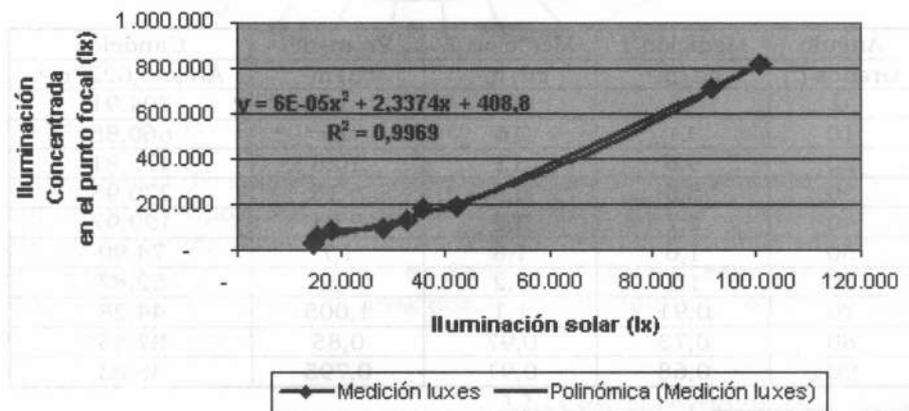
Tabla 1. Relación de intensidad de luz solar frente y concentración en el punto focal del espejo.

| Factor de concentración del espejo parabólico | | | |
|---|----------------|------------------|------------------|
| Medición | Luz solar (lx) | Punto focal (lx) | Relación (veces) |
| 1 | 14540 | 30000 | 2,06 |
| 2 | 14690 | 34610 | 2,36 |
| 3 | 15540 | 63470 | 4,08 |
| 4 | 18150 | 90400 | 4,98 |
| 5 | 28150 | 100000 | 3,55 |
| 6 | 32800 | 130000 | 3,96 |
| 7 | 36000 | 180000 | 5,00 |
| 8 | 42000 | 190000 | 4,52 |
| 9 | 91400 | 710000 | 7,77 |
| 10 | 100617 | 820000 | 8,15 |
| Relación promedio | | | 4,64 |

Nota: los resultados obtenidos en esta tabla son el promedio de los datos obtenidos simultáneamente con dos luxómetros de las mismas características, el primero media la intensidad solar y la concentración en el punto focal. Estos datos son válidos para este experimento, para posteriores análisis se deben tomar nuevos, ya que la intensidad de la radiación solar está variando con el tiempo y por efectos climáticos.

Fuente: los autores.

Gráfica 1. Relación entre la iluminación solar y su concentración en el punto focal del espejo parabólico



Fuente: los autores.

En la gráfica se observó que el comportamiento de los datos se podía representar por medio de la siguiente ecuación de segundo grado:

$$C_{pf} = (6 \times 10^{-5} \times (I_s)^2) + (2,3374 \times I_s) + 408,8 \quad (1)$$

donde:

C_{pf} = Concentración en el punto focal [lx]

I_s = Iluminación solar [lx]

El factor de concentración indica el número de veces que el colector concentra la luz en su punto focal con respecto a la luz recibida en el medio ambiente; este valor tiende a aumentar a medida que se incrementa la cantidad de iluminación recibida. Esto se puede deber a que con mayores valores de iluminación el colector recibe una radiación más uniforme sobre su superficie y la concentra con mayor eficiencia.

3.2 PRUEBAS FOTOMÉTRICAS

3.2.1 DISTRIBUCIÓN DE CANDELAS

Para esta prueba se realizaron dos mediciones con las cuales se estableció un promedio de las candelas por metro cuadrado (cd/m^2) para cada uno de los ángulos (Tabla 2). Luego, se estableció el valor de las candelas tomando como referencia el área de emisión del haz de luz a la distancia en que se tomaron las medidas, es decir, a una distancia de 15 cm producía un haz de luz de 0,17 m de diámetro. El área obtenida para un círculo con radio 0,085m² es de 0,02227 m².

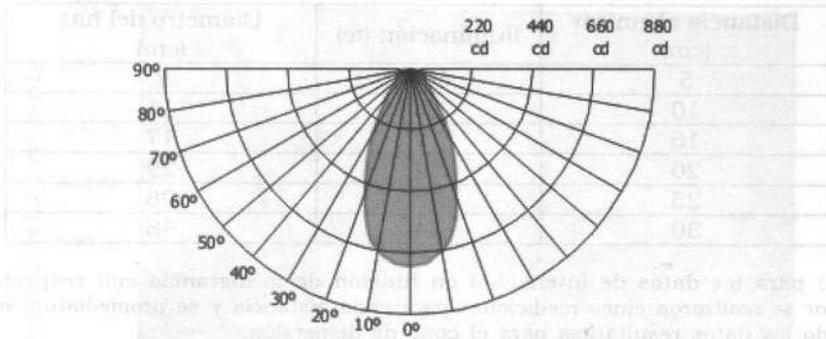
Tabla 2. Resultados de la distribución de candelas

| Ángulo | Medición 1 | Medición 2 | Promedio | Candelas |
|------------|-------------------|-------------------|-------------------|----------------------------|
| Grados (°) | cd/m ² | cd/m ² | cd/m ² | Área=0,02227m ² |
| 0 | 15 | 17 | 16 | 704,91 |
| 10 | 14 | 16 | 15 | 660,85 |
| 20 | 9,6 | 12 | 10,8 | 475,81 |
| 30 | 5,5 | 6,8 | 6,15 | 270,95 |
| 40 | 2,7 | 3,2 | 2,95 | 129,97 |
| 50 | 1,6 | 1,8 | 1,7 | 74,90 |
| 60 | 1,2 | 1,2 | 1,2 | 52,87 |
| 70 | 0,91 | 1,1 | 1,005 | 44,28 |
| 80 | 0,73 | 0,97 | 0,85 | 37,45 |
| 90 | 0,68 | 0,91 | 0,795 | 35,03 |

Fuente: los autores.

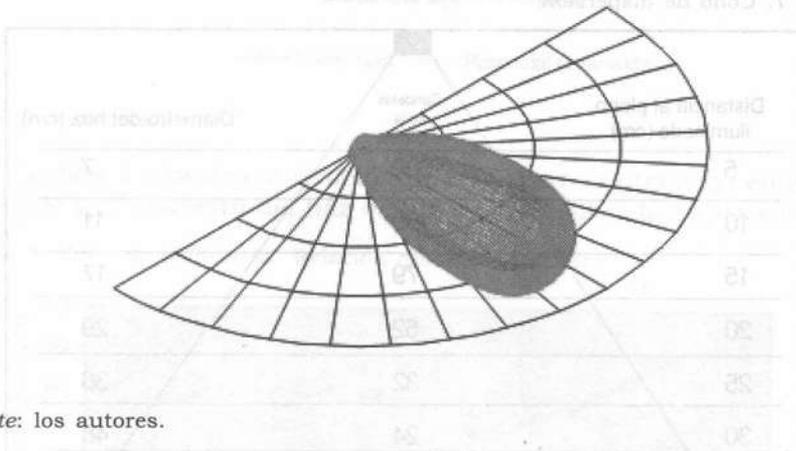
Posteriormente, con los promedios obtenidos en la Tabla 2 se procedió a realizar una gráfica de la distribución de la intensidad de luz emitida de acuerdo con los ángulos (distribución de candelas), junto con su representación tridimensional, las cuales se muestran en las Figuras 5 y 6.

Figura 5. Distribución de candelas



Fuente: los autores.

Figura 6. Representación tridimensional de la distribución de candelas



Fuente: los autores.

Por medio de estas gráficas se puede notar que se trata de una luminaria de tipo puntual, debido a que en ángulos superiores a los 30° no hay intensidad de iluminación y a que los máximos valores se encuentran alrededor del eje, es decir en 0°. Es por esto que se debe usar enfocándola hacia el área que se desea iluminar, en un ángulo no superior a los 30°.

3.2.2 CONO DE DISPERSIÓN (CONO DE LUZ)

Para esta prueba se realizaron seis mediciones de la intensidad de luz en puntos sobre planos perpendiculares al arreglo de fibras, para distancias entre 5 y 30 cm, con intervalos de 5 cm cada uno. Para cada distancia se midieron la intensidad y el diámetro del haz. Los resultados obtenidos se presentan en la Tabla 3.

Tabla 3. Cono de dispersión

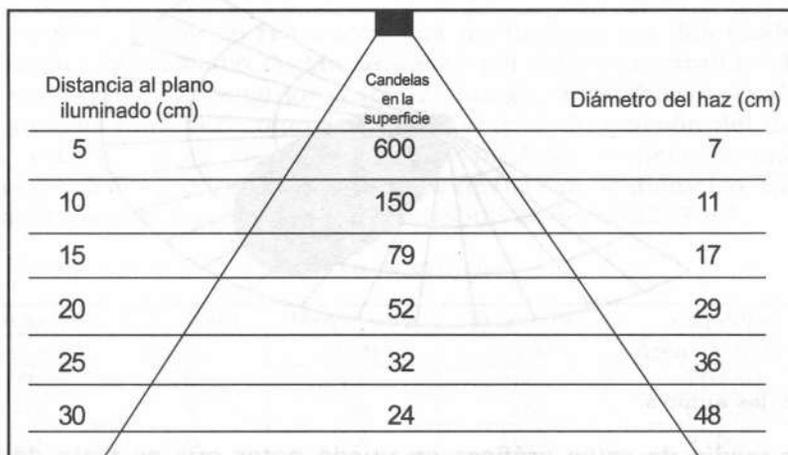
| Distancia al emisor (cm) | Iluminación (fc) | Diámetro del haz (cm) |
|--------------------------|------------------|-----------------------|
| 5 | 600 | 7 |
| 10 | 150 | 11 |
| 15 | 79 | 17 |
| 20 | 52 | 29 |
| 25 | 32 | 36 |
| 30 | 24 | 48 |

Nota: para los datos de intensidad en función de la distancia con respecto al emisor se realizaron cinco mediciones para cada distancia y se promediaron, obteniendo los datos resultantes para el cono de dispersión.

Fuente: los autores.

Con estos datos se realizó la representación esquemática del cono de dispersión que se muestra en la Figura 7.

Figura 7. Cono de dispersión



Fuente: los autores.

A partir de estos datos se pudieron obtener las gráficas de la relación inversa entre la distancia emisor-superficie e intensidad de luz (Gráfica 2).

Esta relación se puede determinar por la ecuación de la línea de tendencia más cercana a los datos obtenidos, la cual es:

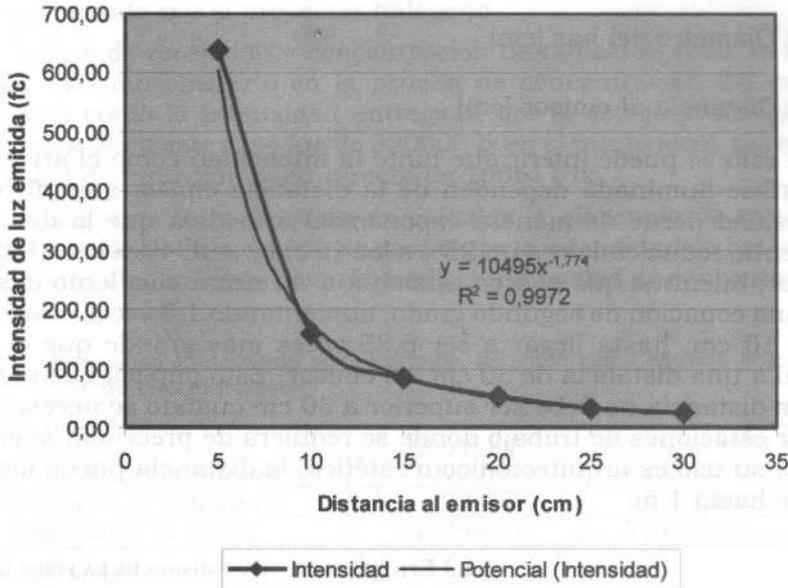
$$I_e = 9855,7 * (d_e)^{-1,774} \quad (3)$$

donde:

I_e = Iluminación en el emisor ($d_e=0$) [lx]

d_e = Distancia al emisor [cm]

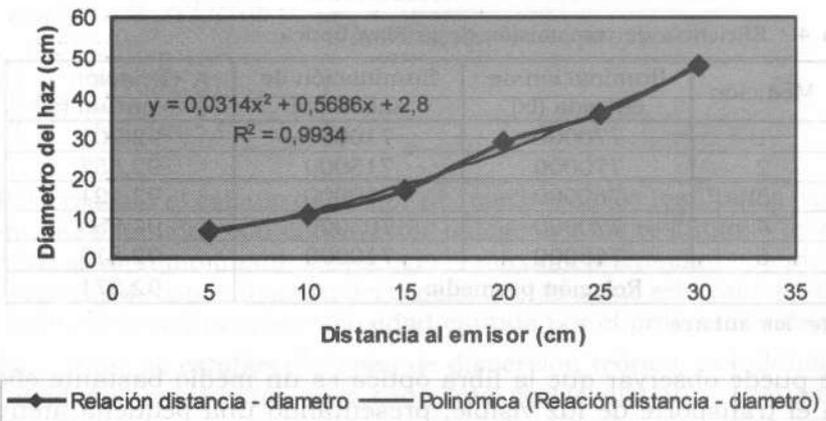
Gráfica 2. Cono de dispersión. Relación distancia-iluminación



Fuente: los autores.

La Gráfica 3 muestra la relación directa entre la distancia emisor - superficie y el diámetro del haz de luz emitido sobre la superficie.

Gráfica 3. Cono de dispersión. Relación distancia-diámetro



Fuente: los autores.

Esta relación se puede determinar por la ecuación de la línea de tendencia más cercana a los datos obtenidos:

$$D_h = 0,0314 * (d_e)^2 + 0,5686 * (d_e) + 2,8 \quad (4)$$

donde:

D_h = Diámetro del haz [cm]

d_e = Distancia al emisor [cm]

De esto se puede inferir que tanto la intensidad como el área de la superficie iluminada dependen de la distancia emisor-superficie. La intensidad decae de manera exponencial a medida que la distancia aumenta, reduciéndose a un 25% a los 10 cm y a un 4% a los 30 cm del emisor; mientras que el área aumenta a un ritmo más lento descrito por una ecuación de segundo grado, aumentando 1,5 veces entre los 5 y los 10 cm, hasta llegar a ser 6,85 veces más grande que el área inicial a una distancia de 30 cm del emisor. Esto implica que para su uso la distancia no debe ser superior a 30 cm cuando se necesita iluminar estaciones de trabajo donde se requiera de precisión, mientras que si su uso es arquitectónico o estético, la distancia puede llegar a ser de hasta 1 m.

3.2.3 EFICIENCIA DE TRANSMISIÓN DE LA FIBRA ÓPTICA

Por medio de esta prueba se determinó la relación entre la intensidad de luz que entra al arreglo de la fibra óptica y la intensidad emitida por la fibra.

En esta prueba se tomaron 5 mediciones para cada uno de los extremos del arreglo de fibra óptica. En la Tabla 4 se muestran los resultados de dichas mediciones.

Tabla 4. Eficiencia de transmisión de la fibra óptica

| Medición | Iluminación de entrada (lx) | Iluminación de salida (lx) | Relación porcentual (%) |
|-------------------|-----------------------------|----------------------------|-------------------------|
| 1 | 770000 | 710000 | 92,208 |
| 2 | 770000 | 715000 | 92,857 |
| 3 | 760000 | 710000 | 93,421 |
| 4 | 770000 | 705000 | 91,558 |
| 5 | 765000 | 710000 | 92,810 |
| Relación promedio | | | 92,571 |

Fuente: los autores.

Se puede observar que la fibra óptica es un medio bastante eficaz para el transporte de luz visible, presentando una pequeña atenuación de aproximadamente 7,43% que, de acuerdo con los fabricantes, se mantiene en una fibra de hasta un kilómetro de longitud, distancia bastante considerable para una estructura vertical.

3.3 MODELO TEÓRICO DE FUNCIONAMIENTO DEL SISTEMA CON LUZ SOLAR

Para poder determinar teóricamente este modelo se realiza el análisis de cada una de las fases de transmisión de luz dentro del siste-

ma, teniendo como fuente de iluminación la radiación solar en lugar de la luz emitida por el proyector halógeno.

En la fase de recepción y concentración de radiación solar se tomó el valor máximo obtenido en la prueba de concentración del espejo parabólico como la intensidad entregada por el espejo al arreglo de fibra óptica. Para este caso fue de 820000 lx en el punto focal, para una intensidad de radiación solar directa de 100617 lx.

En la segunda fase, después de calcular la eficiencia de transmisión del arreglo de fibra óptica, se encuentra la intensidad de luz transmitida y emitida, teniendo como entrada la intensidad de concentración (Tabla 5).

Tabla 5. Intensidad transmitida por el arreglo, teniendo como entrada la intensidad de concentración

| | Proyector | Colector solar |
|-----------------------------|-----------|----------------|
| Iluminación de entrada (lx) | 770000,00 | 820000,00 |
| Eficiencia de la fibra (%) | 92,571 | 92,571 |
| Iluminación de salida | 712796,53 | 759082,01 |

Fuente: los autores.

Para la tercera fase se empieza comparando la intensidad emitida por el arreglo, obtenida con el proyector halógeno, con la intensidad obtenida teóricamente con la concentración de luz solar, estableciendo un factor de relación entre estas dos fuentes (ecuación 5).

$$\text{Factor de relación} = \frac{\text{Iluminación con colector solar}}{\text{Iluminación con proyector}}$$

$$\frac{I_{cs}}{I_{ph}} = \frac{759082,01}{712796,53} = 1,065 \tag{5}$$

Para realizar el cálculo del factor de relación de los resultados experimentales obtenidos con el proyector halógeno y los resultados teóricos con luz solar como fuente, se escogió la máxima intensidad obtenida en las pruebas de concentración del espejo, debido a que este valor (820000 lx) es el más cercano a la intensidad emitida por el proyector halógeno.

Por último se establece el cono de dispersión teórico, calculando las intensidades resultantes para cada una de las distancias del emisor evaluadas, es decir, multiplicando las intensidades obtenidas experimentalmente con el proyector halógeno por el factor de relación, lo que en cierta forma significa agrandar el cono de dispersión debido a que se posee una intensidad de entrada superior a la experimental. Los resultados se muestran en la Tabla 6.

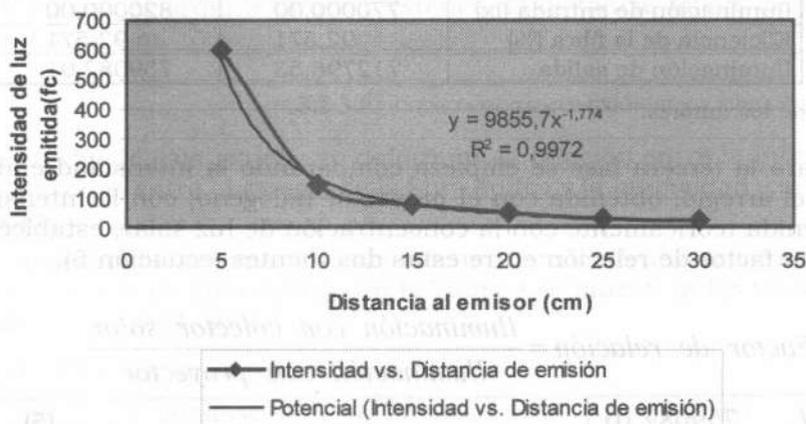
Tabla 6. Cono de dispersión calculado

| Distancia al emisor (cm) | Iluminación proyector (fc) | Iluminación solar teórica (fc) |
|--------------------------|----------------------------|--------------------------------|
| 5 | 600,00 | 638,96 |
| 10 | 150,00 | 159,74 |
| 15 | 79,00 | 84,13 |
| 20 | 52,00 | 55,38 |
| 25 | 32,00 | 34,08 |
| 30 | 24,00 | 25,56 |

Fuente: los autores.

Para el cono de dispersión resultante se obtiene la relación entre distancia al emisor y la intensidad emitida que se muestra en la Gráfica 4.

Gráfica 4. Cono de dispersión resultante. Relación distancia-intensidad



Fuente: los autores.

Esta relación se puede determinar por la ecuación de la línea de tendencia más cercana a los datos obtenidos:

$$I_e = 10495 * (d_e)^{-1,774} \quad (6)$$

donde:

$$I_e = \text{Iluminación en el emisor } (d_e = 0) \text{ [lx]}$$

$$d_e = \text{Distancia al emisor [cm]}$$

Para hallar la distancia máxima utilizable en este cono de dispersión se encontró la distancia a la cual se emitía una intensidad de luz equivalente a 2,79 fc, es decir, la iluminación requerida para pasillos de tráfico. Al despejar la distancia en la ecuación obtenida y reemplazando el valor de la intensidad por 2,79 fc se obtiene una distancia máxima de 103,6 cm.

El resultado en conjunto de todo el sistema se muestra en la Tabla 7.

Tabla 7. Resumen de iluminación a través del sistema

| | Iluminación (lx) |
|--------------------|------------------|
| Entrante (directa) | 100617,00 |
| Concentrada | 820000,00 |
| Transmitida | 759082,01 |
| Emitida (5 cm) | 6875,21 |
| Emitida (10 cm) | 1718,80 |
| Emitida (15 cm) | 905,24 |
| Emitida (20 cm) | 595,89 |
| Emitida (25 cm) | 366,70 |
| Emitida (30 cm) | 275,03 |
| Emitida (1 m) | 30 |

Fuente: los autores.

4. CONCLUSIONES

Se desarrolló un sistema de iluminación que aprovecha la radiación solar como fuente de iluminación para puestos de trabajo, al integrar el uso de un espejo parabólico como colector de radiación solar con la capacidad de la fibra óptica para transportar y emitir luz solar.

El sistema propuesto es seguro, ya que no produce chispa ni transmite o emite calor, evitando así el riesgo de incendio en recintos donde se manipulan elementos inflamables o explosivos muy sensibles a este tipo de estímulos. Es económico porque su mantenimiento es básicamente la limpieza tanto de la superficie del colector como de los emisores y con su uso se reduce el consumo de energía eléctrica. Es limpio porque usa una energía en teoría inagotable, como es la radiación solar, que no genera desperdicios perjudiciales al medio ambiente y es autónomo respecto a la energía eléctrica, pudiéndose utilizar en zonas que no se encuentran interconectadas.

Es una solución viable y efectiva para estaciones de trabajo donde se realicen ensambles o inspecciones simples que requieren de una iluminación puntual, ya que su distribución de intensidad muestra que su ángulo de emisión está alrededor de los 30°, pudiendo colocarse cerca del lugar u objeto a iluminar, a una distancia no mayor de 30 cm con un área iluminada (circular) de aproximadamente 48 cm de diámetro. De igual forma al emitir luz solar conservando su calidad y características propias, mejora las condiciones de trabajo ya que la visión humana ha evolucionado para percibir este tipo de luz, evitándose así la fatiga visual, pérdida de la visión, dolores de cabeza, incapacidades y accidentes.

Se propone como una red de iluminación principal y no como un sistema paralelo al eléctrico, ya que puede utilizarse con luz solar en el día y con luz artificial en las noches, o cuando las condiciones climáticas no sean las óptimas para el sistema.

En general se propone un sistema de iluminación nuevo y diferente a los sistemas comerciales existentes, y que de poder ser llevado a producción, generaría un nuevo y revolucionario concepto en cuanto a iluminación de interiores.

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo se realizó para optar al título de ingenieros industriales de la Pontificia Universidad Javeriana. Los autores agradecen la colaboración del Centro de Estudios de Ergonomía de la Facultad de Ingeniería y del Departamento de Física de la Facultad de Ciencias de la Pontificia Universidad Javeriana.

REFERENCIAS

- Ballman, T. L. (2001), *Photometry and the Photometric Data Sheet, Indoor*.
- Dubroff, R. y Marshall, S. V. (1997), *Electromagnetismo, conceptos y aplicaciones*, cuarta edición, México, Prentice Hall Hispanoamericana.
- Florida Solar Energy Center (1998), *Stand-Alone Photovoltaic Lighting Systems*, first edition.
- Illuminating Engineering Society (IES) (1957), *Lighting Handbook*.
- Naciones Unidas (1977), *Reglas mínimas para el tratamiento de los reclusos*, Ginebra.
- Niebel, B. W. (1993), *Ingeniería industrial métodos, tiempos y movimientos*, novena edición, México, Alfaomega.
- Oficina Internacional del Trabajo. Ministerio de Trabajo y Seguridad Social (1989), *Enciclopedia de salud y seguridad en el trabajo*, Madrid, Fareso.
- Quintana, L. (2003), *Notas de clase ingeniería de seguridad y medio ambiente*.
- Rensselaer Polytechnic Institute (2002), "Lighting from afar". En: *Revista Lighting Futures*, 1 (3).
- Rodríguez, H. y González, F. (1992), *Manual de radiación solar en Colombia*, Vol. 1, Bogotá.
- Tipler, P. A. (1994), *Física*, tercera edición, Madrid, Reverté.
- Veitch, J. A., Newsham, G.R. (2002), IRC'S Lighting Quality Project. En: www.nrc.ca/irc. Fecha de consulta: noviembre de 2002.
- Wilson, J. D. (1996), *Física*, segunda edición, México, McGraw Hill.
- Zik, O., Karni, J. y Kribus, A. (2002), The TROF (Tower reflector with optical fibers): a new degree of freedom for solar energy systems, febrero.