

ANÁLISIS EXPERIMENTAL DE LA PROPAGACIÓN DE LUZ EN ESTRUCTURAS CILÍNDRICAS DE PMMA

EXPERIMENTAL ANALYSIS OF THE LIGHT PROPAGATION IN CYLINDRICAL PMMA STRUCTURES

Ángel Vergara Betancourt

TecNM / Instituto Tecnológico Superior de Zacapoaxtla, México
avergarabetancourt@gmail.com

Oscar Javier Zapata Nava

TecNM / Instituto Tecnológico Superior de Zacapoaxtla, México
javier.ozapata@gmail.com

Oscar Abdón Castelán Camacho

TecNM / Instituto Tecnológico Superior de Zacapoaxtla, México
306oscarabdon@gmail.com

Recepción: 21/octubre/2019

Aceptación: 2/diciembre/2019

Resumen

En este trabajo se analiza la propagación de luz en estructuras cilíndricas de polimetilmetacrilato (PMMA). Bajo distintos escenarios de operación y aprovechando la propiedad de reflexión total interna, se estudia la eficiencia de transmisión de luz en este tipo de material. Su utiliza un arreglo experimental conformado por fuentes de luz, elementos ópticos, estructuras cilíndricas de acrílico y un medidor de potencia óptica. Para las pruebas experimentales, se utilizaron, una fuente de luz monocromática y luz blanca. La propagación de luz se realizó, modificando condiciones como ángulo de incidencia, distancia de iluminación, geometría de estructura, condiciones térmicas, entre otras y se midió la potencia óptica de salida. Los resultados, permiten determinar la posibilidad de utilizar este tipo de estructuras para el desarrollo de sistemas de concentración, conducción e iluminación natural de interiores. Lo anterior, como alternativa al uso de fibras ópticas en sistemas de iluminación natural.

Palabras Claves: Iluminación natural, PMMA, propagación de luz, reflexión total interna.

Abstract

This paper analyzes the propagation of light in cylindrical structures of polymethylmethacrylate (PMMA). Under different operating scenarios and taking advantage of the property of total internal reflection, the efficiency of light transmission in this type of material is studied. An experimental arrangement consisting of light sources, optical elements, cylindrical acrylic structures and an optical power meter its uses. For experimental tests, a monochromatic light source and white light were used. The light propagation was performed, modifying conditions such as angle of incidence, lighting distance, structure geometry, thermal conditions, among others and the optical output power was measured. The results allow us to determine the possibility of using these types of structures for the development of interior concentration, conduction and natural lighting systems. The above, as an alternative to the use of optical fibers in natural lighting systems.

Keywords: *Daylighting, light propagation, PMMA, total internal reflection.*

1. Introducción

En la actualidad, existen reportes que establecen que el consumo energético debido a iluminación en los grandes edificios de Estados Unidos y China, llegan a alcanzar del 20% al 40% del total de la energía utilizada en estos lugares [Zhou, 2015]. Por esta razón, en años recientes se ha acrecentado el interés en desarrollar tecnología que permita un uso eficiente de las energías renovables y un aprovechamiento óptimo de las fuentes de energía natural. Derivado de lo anterior, se ha propuesto y evaluado la pertinencia de desarrollar sistemas de iluminación natural “Daylighting” [Bellia, 2015]. Sistemas que permitan solventar la energía demandada por los sistemas de iluminación convencional. Entre las propuestas actuales, se pueden encontrar aquellos sistemas basados en el diseño de ventanas y superficies de transmisión de luz [Beltrán, 1996], tubos de luz [Pacheco, 2016], sistemas de captación y concentración luz [Xuan, 2017], y sistemas de confinamiento y guiado de luz al interior de los edificios, entre otros.

Para el caso particular de los sistemas de iluminación natural basados en la conducción de luz, se ha propuesto el uso de fibras ópticas. Estos sistemas utilizan

el principio de reflexión total interna y son capaces de guiar la luz en grandes distancias y a puntos donde las ventanas o tragaluces no son una opción viable. Sin embargo, estos sistemas aún resultan costosos para su instalación, debido al precio elevado de la fibra óptica.

En este trabajo, se ha propuesto estudiar las condiciones de propagación de luz a través de materiales que podrían sustituir a las fibras ópticas tradicionales. Como alternativa se ha optado por las propiedades que ofrece el plástico polimetilmetacrilato, comúnmente conocido como acrílico o PMMA. Este material presenta entre sus características más importantes, su alta transparencia a la propagación de luz y la resistencia que presenta a factores externos y desgaste por ralladuras, así como su costo menor en el mercado respecto al de las fibras ópticas.

Es de interés en este reporte, observar y discutir los resultados experimentales de propagación de luz a través de estructuras cilíndricas de PMMA ante distintas condiciones de iluminación. Para ello, se compara la potencia de luz transmitida respecto a la potencia de luz incidente. Para el análisis experimental se utilizan como fuentes de luz: un láser semiconductor rojo de 633 nm con potencia nominal de 30 mW, un LED ultra-brillante como fuente de luz blanca y la radiación visible emitida por el sol. Se experimenta regulando entre otros factores, el ángulo de incidencia, técnica de concentración de luz, polarización de luz, efectos de temperatura y deformación de la guía a través de la deflexión de la misma.

Las secciones posteriores de este artículo se han organizado de la siguiente manera: En una primera sección se describe la metodología a seguir en este estudio experimental. Posteriormente, en la siguiente sección se realiza una discusión del estado del arte referente a este tema. A continuación, se presentan algunas definiciones de conceptos básicos de reflexión total interna y propagación de luz a través de guías de onda. También se exponen las propiedades que definen la elección del PMMA como guía de luz, a modo de propuesta para el desarrollo de sistemas de iluminación natural. En una tercera sección se explica el sistema óptico que se ha propuesto para el análisis experimental de la propagación de luz. En esta sección se mencionan los materiales a utilizar y las características de este sistema. Se continúa con una sección que describe las condiciones de prueba y se obtienen

los datos de los experimentos. Mientras que en la sección de resultados se exponen en forma resumida los datos recuperados de los experimentos y se discuten los alcances de estos para el desarrollo de sistemas de iluminación natural. Finalmente se presenta una sección de conclusiones donde se resumen los resultados y los alcances de esta investigación. Se logra concluir, que este tipo de material puede ser viable para el desarrollo de sistemas de iluminación, ya que los resultados que se han obtenido han mostrado transmitir luz con niveles aceptables relación potencia de salida respecto a potencia de entrada.

2. Métodos

Este trabajo experimental se ha llevado a cabo en el laboratorio de óptica del ITS Zacapoaxtla. Se han utilizado solo los recursos básicos para la experimentación en óptica, con los que cuenta el instituto y el grupo de investigación de instrumentación y control optomecatrónico. El desarrollo de este trabajo se ha establecido en cuatro etapas: Análisis de marco referencial y conceptual, diseño del sistema óptico para el análisis experimental, desarrollo experimental y análisis de resultados derivados de este estudio experimental. Cada una de las etapas, serán descritas y explicadas a detalle en los párrafos subsecuentes.

Los sistemas de iluminación mediante el uso de fibras ópticas, fue propuesto inicialmente 1980 por un grupo de investigadores franceses [Cariou, 1980], sin embargo, no se logró un avance tecnológico inmediato debido a las limitantes tecnológicas y los costos elevados que en ese momento representaba el uso de la fibra óptica [Rahman-Abdul, 2010]. Con el paso de los años, esta tecnología ha avanzado y desde entonces, se han realizado una serie de propuestas para hacer realidad esta idea.

Para comprender el fenómeno de la reflexión total interna, se inicia con el estudio de la Ley de Snell [Hecht, 2016]. Establece que cuando un haz de luz viaja de un medio con índice de refracción n_1 a otro medio con índice de refracción n_2 , se cumple la relación entre ángulo de haz incidente θ_1 y ángulo de haz transmitido θ_2 descrito por la ecuación 1.

$$n_1 \text{sen} \theta_1 = n_2 \text{sen} \theta_2 \quad (1)$$

Sin embargo, cuando el índice de refracción del medio en el cual viaja el rayo de luz, es mayor que el índice de refracción del medio sobre el cual incide ($n_1 > n_2$), se presenta el fenómeno de la reflexión total interna [Hecht, 2002]. Es decir, el haz incidente ya no se refracta, sino que se refleja sobre la superficie entre los dos medios, provocando que el haz de luz quede atrapado al interior del medio de mayor índice de refracción, esto ocurre cuando $\theta_1 \geq \theta_c$, donde θ_c se denomina ángulo crítico y queda descrito por la ecuación 2.

$$\theta_c = \text{sen}^{-1}\left(\frac{n_2}{n_1}\right) \quad (2)$$

Cuando se presenta el fenómeno de la reflexión total interna en estructuras cilíndricas o rectangulares, estas confinan la luz en su interior y son capaces de transportar la radiación a lo largo de la estructura debido a las múltiples reflexiones en su interior [Saleh, 1991]. El caso más conocido son las fibras ópticas, sin embargo, esto ocurre también en otras estructuras cerradas de diferente geometría, las cuales de manera general son denominadas como sistemas de guías de onda [Snyder, 1983] o guías de luz, cuando la radiación que se propaga en el interior se halla en el rango de la luz visible [Okamoto, 2000]. En la figura 1, se esquematiza este fenómeno.

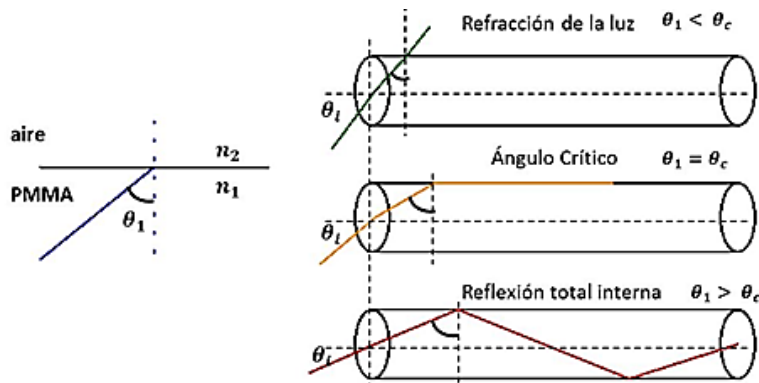


Figura 1 Fenómeno de la reflexión total interna.

Para describir completamente la propagación de luz a través de guías de onda, se requiere también conocer dos conceptos más: la apertura numérica (NA) y el ángulo de aceptación de la guía (θ_i) [Saleh, 1991]. Estos conceptos proporcionan

información respecto al ángulo máximo que debe existir entre la luz que se está ingresando en la guía y la normal a la superficie de entrada de la guía, para garantizar que se alcance el ángulo crítico al interior del medio. Estos conceptos están descritos matemáticamente por las ecuaciones 3 y 4, respectivamente.

$$NA = n_0 \text{sen} \theta_i = \sqrt{(n_1)^2 - (n_2)^2} \quad (3)$$

$$\theta_A < \theta_i = \text{sen}^{-1} \left(\frac{\sqrt{(n_1)^2 - (n_2)^2}}{n_0} \right) \quad (4)$$

Discutiendo ahora las propiedades del polimetil-metacrilato (PMMA) o acrílico, se describe como un termoplástico amorfo con características de alta transparencia óptica, baja sensibilidad a la radiación UV y alta resistencia a los factores climatológicos y ambientales [Pawar, 2016]. Es un sustituto natural del vidrio, además de que ofrece una alta transmitancia de luz, con índice de refracción de 1.4905 a 589.3 nm, y puede ser termoformado sin presentar pérdidas en la claridad óptica (International Polymer Solutions Inc.).

Respecto a las características de este material, se encuentra que sus propiedades no se ven alteradas ante la presencia de soluciones acuosas, detergentes, ácidos orgánicos, entre otros. Entre las ventajas que presenta, es que los acrílicos se pueden aserrar, taladrar, fresar, grabar y terminar fácilmente con herramientas afiladas de carburo. También pueden ser fabricados en forma de láminas, barras, tubos y algunos otros perfiles. En cuanto a las características ópticas, el PMMA puede transmitir hasta el 92% de la radiación visible, en un espesor de 3 mm y reflejar alrededor del 4% de la radiación de su superficie. Las aplicaciones del PMMA, son diversas e incluyen: fabricación de ventanas y puertas en edificios, cristales, cubiertas y elementos decorativos en el sector automotriz y de transporte, en pantallas LCD, monitores y en aplicaciones de conversión de energía solar. Otras aplicaciones se hallan en el diseño de interiores y diseño de muebles, en el sector salud y médico y en los sistemas de iluminación para aplicación en lámparas, aplicaciones LED, sistemas de transmisión de luz solar, entre otras.

En las siguientes líneas se expone el estudio experimental y los elementos del sistema óptico con que se diseñará el experimento.

La primera parte de esta sección es la preparación de los materiales a utilizar, los cuales se enlistan en la tabla 1.

Tabla 1 Material utilizado durante el experimento.

Material y equipo	Características
Barras circulares de acrílico	40 cm longitud 10 mm de diámetro
Fuentes de luz monocromática (láser rojo)	$\lambda=633$ nm Potencia nominal = 30 mW CW Potencia real = 12.43 mW CW Mod. LPMS-5-110 con una fuente LPM639-30C
Fuente de luz blanca (LED ultrabrillante)	$400 \text{ nm} < \lambda < 800 \text{ nm}$ Potencia máxima 3 mW en $\lambda=400$ nm
Medidor de potencia óptica	Mod. PMKIT-SL-2W $400 \text{ nm} < \lambda < 1100 \text{ nm}$ $100 \text{ pW} < \text{Pot} < 2 \text{ W}$
Elementos ópticos	Lente biconvexa 30 mm distancia focal Lente biconvexa 100 mm distancia focal Objetivo de microscopio Polarizador
Soportes mecánicos	Montura para lentes y láser Monturas de plástico para soporte de la guía Tabla holográfica

El primer paso consistió en preparar las guías de acrílico, cortando a 40 cm de largo y puliendo cada uno de los extremos de la barra para obtener la mayor transmisividad utilizando pulidor comercial del orden de μm como se muestra en la figura 2.



Figura 2 Preparación de las guías de PMMA.

Posteriormente, se propuso el arreglo experimental que se muestra en las figuras 3 y 4, en las cuales se consideraron, la fuente luz, la barra de PMMA y el medidor de potencia, todos colocados y fijados con monturas sobre una tabla holográfica.

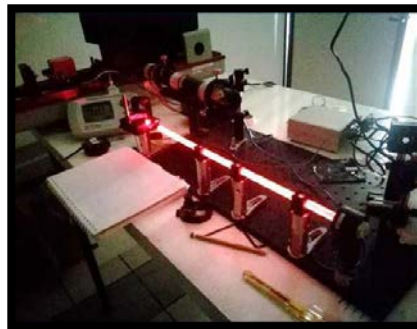
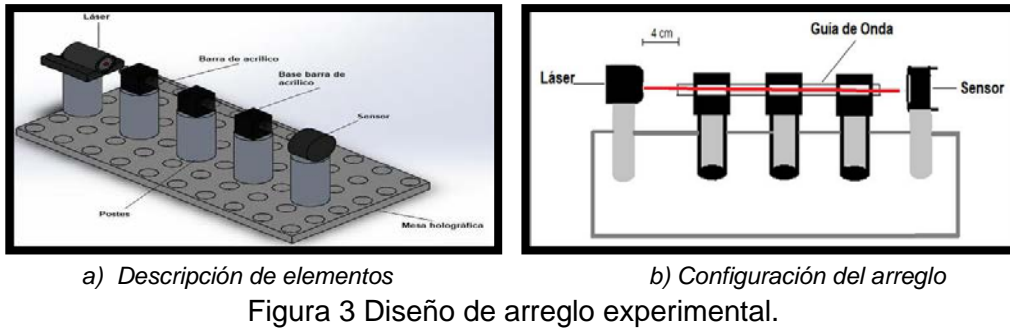


Figura 4 Implementación del sistema completo.

3. Resultados

El primer estudio experimental consistió en propagar luz monocromática a lo largo de la barra de PMMA bajo diferentes condiciones de operación. Se inició comparando la propagación de luz en 4 barras similares de 40 cm, y eligiendo la que ofrece mejor respuesta. De acuerdo con la figura 5, la potencia máxima de la fuente láser de 633 nm, medida directamente sobre el sensor de potencia óptica es de 12.43 mW en condiciones de laboratorio. En adelante los resultados de los experimentos serán mostrados en unidades normalizadas a la potencia máxima.

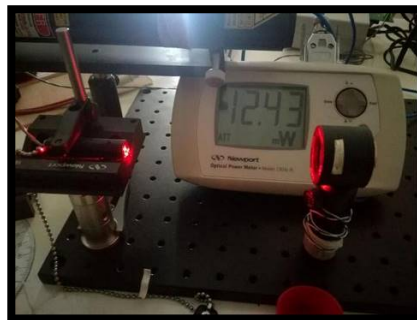
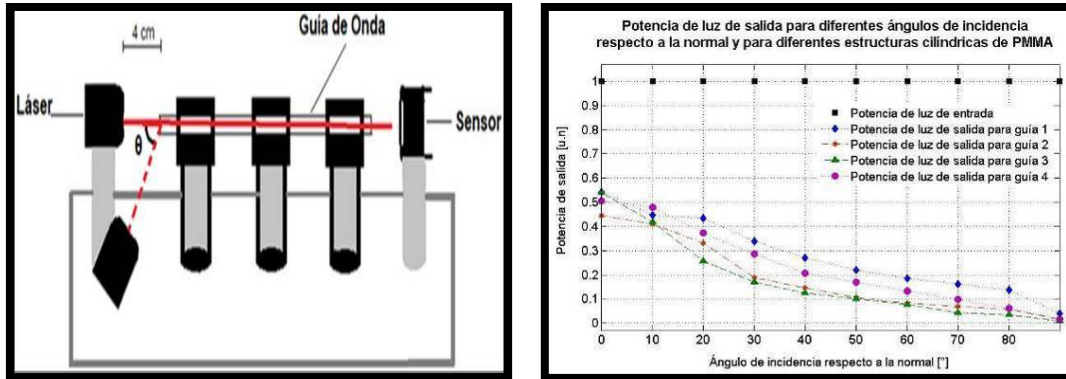


Figura 5 Fuente de luz monocromática láser rojo, 633 nm, 12.43 mW.

Para el experimento se utilizó el diseño de la figura 6a. La propagación en las cuatro barras se realizó variando ángulo de entrada del haz de luz, de 0° hasta los 90° respecto a la normal de incidencia. Los resultados se muestran en la figura 6b.

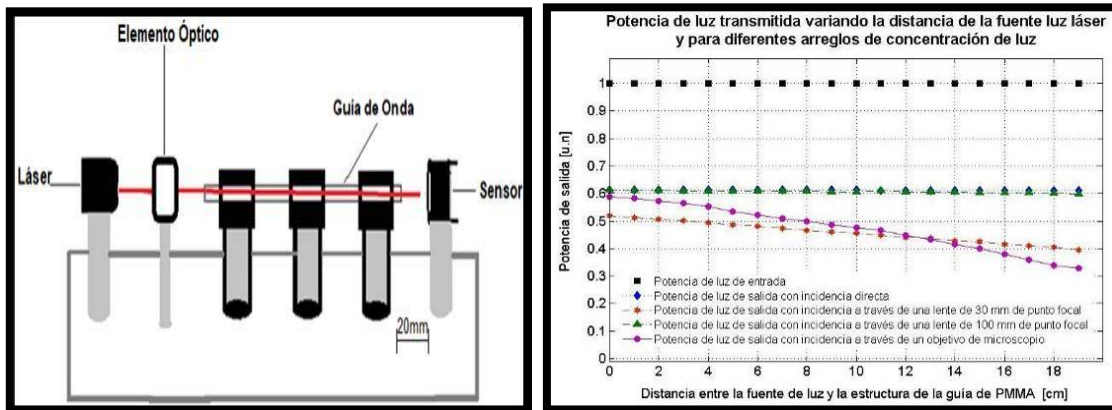


a) Arreglo experimental
b) Resultados de la propagación
Figura 6 Propagación en 4 barras, modificando el ángulo de incidencia.

Basados en los resultados mostrados en la figura 6b, se puede observar primero que las cuatro barras presentan diferencias en propagación, sobre todo la guía 2, que presenta una menor potencia de salida que el resto cuando existe incidencia normal. Las guías 1, 3 y 4, presentan una potencia de salida a incidencia normal de aproximadamente entre 50-55% de la potencia de entrada. Es decir, existieron pérdidas en la propagación a lo largo de las guías, sin embargo, como se observó en este y otros experimentos, esta reducción es debida a pérdidas por reflexión a la entrada, refracción en las paredes internas de la guía y pérdidas debido a la estructura amorfa del PMMA. Otro dato importante, es que conforme se aumenta el ángulo de incidencia, el comportamiento en las cuatro barras es similar y la potencia de salida disminuye hasta reducirse a 10% de la potencia de entrada cuando se incide a 80° respecto a la normal. A partir de aquí se puede establecer que para ángulos de incidencia menores a 20° , se tiene una razón de potencia de salida, respecto a la potencia de entrada aceptable para condiciones de transmisión de luz. Por otra parte, también se puede observar que la guía sigue transmitiendo radiación incluso cercana a 90° . Esto se debe a que la interfaz donde se presenta la reflexión total interna, presenta una diferencia de índices de refracción de aproximadamente 0.49, debido a la gran diferencia entre los índices de refracción del material PMMA

y el aire, por lo que de acuerdo con las ecuaciones 3 y 4, el ángulo máximo de propagación es de 90° . Finalmente, se concluye que la guía 1, será la guía con la que se realizará el resto de los experimentos, ya que es la que ofrece mayor potencia de salida en todos los ángulos de incidencia.

El segundo experimento que se realizó, consistió en observar cómo influye en la potencia de luz transmitida, el utilizar elementos ópticos para concentrar mayor cantidad de luz a la entrada de la guía. Para ello se proponen utilizar tres elementos, una lente biconvexa de 30 mm de distancia focal, otra lente biconvexa de 100 mm de distancia focal y un objetivo de microscopio. El arreglo experimental se muestra en la figura 7a. La propagación se realizó a incidencia normal y se utilizó un láser de 633 nm, con una potencia incidente de 12.43 mW. Sin embargo, los resultados mostrados se presentan normalizados a esta potencia. Otra variable en el experimento fue aumentar la distancia de incidencia entre la fuente de luz y la guía de PMMA. Los resultados se muestran en la figura 7b.



a) Arreglo experimental

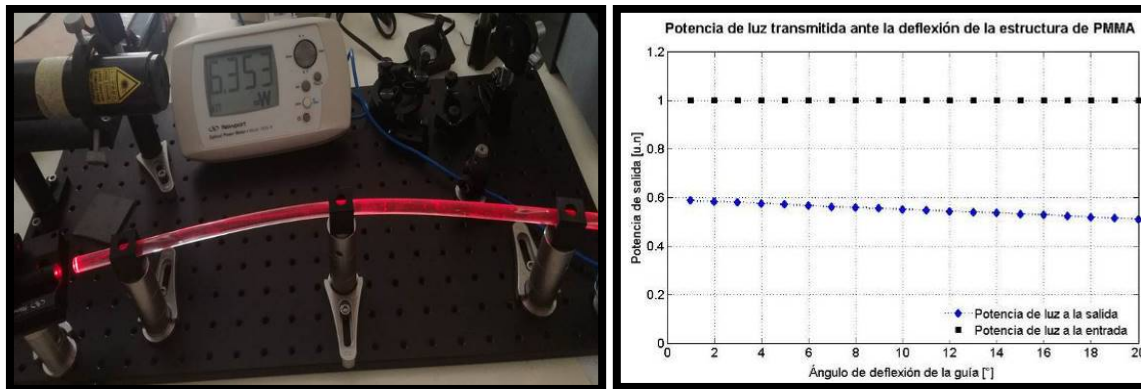
b) Resultados de la propagación

Figura 7 Propagación, interponiendo elemento óptico de concentración de luz.

Como se observa en la figura 7b, la potencia de salida cuando no se utiliza elemento óptico y con la lente de 100mm de distancia focal, son muy similares, es de aproximadamente el 60% de la potencia que emite el láser y se mantiene constante aun cuando la distancia entre la fuente de luz y la guía se incrementó a 20 cm. Mientras que la potencia utilizando lente de 30 mm de distancia focal se ha reducido y decae conforme aumenta la distancia entre el láser y la guía. Caso similar, ocurre

cuando se utiliza el objetivo de microscopio, en el cual la potencia de salida reduce hasta un 30% de la potencia emitida por el láser. De este experimento se puede concluir, que para una fuente monocromática como es el láser, el integrar elementos de concentración no aumenta la cantidad de luz transmitida.

Otro experimento realizado, es observar cómo influye en la propagación de luz, generar una deflexión sobre la estructura de PMMA y curvar la guía, como se presenta en la figura 8a. Los resultados se muestran en la figura 8b.



a) Arreglo experimental

b) Resultados de la propagación

Figura 8 Deflexión de la barra de PMMA y propagación de luz láser.

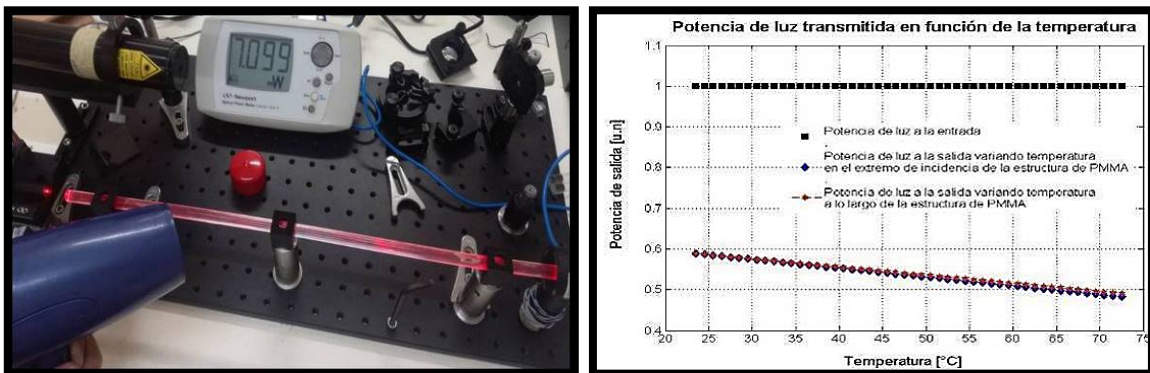
En figura 8a se observa que solo se consideró la propagación de láser sin incluir elementos ópticos y con incidencia normal a la entrada de la guía. Por lo cual solo se compara la potencia de entrada con la potencia de salida para diferentes ángulos de deflexión de la barra. En primera instancia se observa que la potencia de salida y que ha transmitido la barra cuando no existe deflexión es de aproximadamente el 60% de la potencia incidente sobre la guía. Conforme la guía se curva de 0° a 20°, la potencia de salida se reduce en forma lineal en una razón aproximada de 1% por cada 2 grados de deflexión, reduciendo a 50% de la potencia transmitida cuando la guía deflectó en 20°. De este resultado, se puede concluir que doblar las guías afecta la propagación reduciendo su razón de transmisión, pero las pérdidas no son mayores con referencia a otros factores estudiados en este trabajo.

Una variable más a considerar en la propagación de luz a través de las estructuras de PMMA, es la temperatura. Para ello se propone aplicar calor a las barras de

acrílico para aumentar su temperatura y observar los efectos que esta tiene en la transmitividad de la guía.

En la imagen de la figura 9a se muestra el experimento y en la figura 9b los resultados de este. De acuerdo con figura 9b, un aumento en la temperatura de la barra representa una disminución de la radiación transmitida en una razón de 1% cada 5 °C de incremento en un rango de 22.5 a 72.5 °C, lo cual significa que las propiedades de trasmisión de la barra no se alteran en gran medida por efectos de la temperatura. No importa si la temperatura cambia a lo largo de toda la barra o solo en el extremo donde se incide la radiación.

Considerando que se pretende propagar radiación solar para aspectos de iluminación natural, se ha propuesto el uso de elementos que permitan ingresar la mayor cantidad de luz a las guías, los resultados de este experimento aportan en el interés de determinar cómo podría afectar a las barras el incremento de calor al concentrar radiación solar sobre el extremo de estas.



a) Arreglo experimental

b) Resultados de la propagación

Figura 9 Propagación de luz al modificar la temperatura de la barra de PMMA.

Como se ha observado anteriormente, la propagación de luz monocromática en las guías se ve afectada en mayor o menor medida por los factores externos durante la propagación o por las propiedades en las estructuras de PMMA. Sin embargo, al propagar luz blanca, se esperaría observar otros fenómenos y efectos producto del espectro de frecuencias que conforman este tipo de radiación y la respuesta a diferentes frecuencias por parte del material PMMA. Para ello, se ha propuesto utilizar como fuente de luz, un LED ultrabrillante con el espectro en la luz visible

entre 400 y 750 nm, con su mayor punto de emisión de radiación en 450 nm de acuerdo con la hoja de especificaciones de este elemento [Everlight, 2007]. El LED ha sido alimentado con una fuente de 5 V y el nivel de luminosidad máximo que genera es de 3 mW a 400 nm, como se muestra en la figura 10.



Figura 10 Fuente de luz blanca LED ultrabrillante 400-750 nm.

El primer experimento realizado a la iluminación con LED, ha sido probar la propagación en incidencia normal y utilizando diferentes elementos ópticos de concentración como se propone en la figura 11a. Previamente se analizó la respuesta de transmisión de luz en todo el espectro y midiendo con el sensor de potencia, la potencia de salida ajustado para medir a diferentes longitudes de onda. Se observó que la mayor potencia transmitida se presenta al medir en el rango de 400nm. Ajustando el medidor de potencia a este rango, se procedió a medir la potencia, modificando la distancia entre la fuente de luz y la barra de PMMA, los resultados se presentan gráfico de la figura 11b.

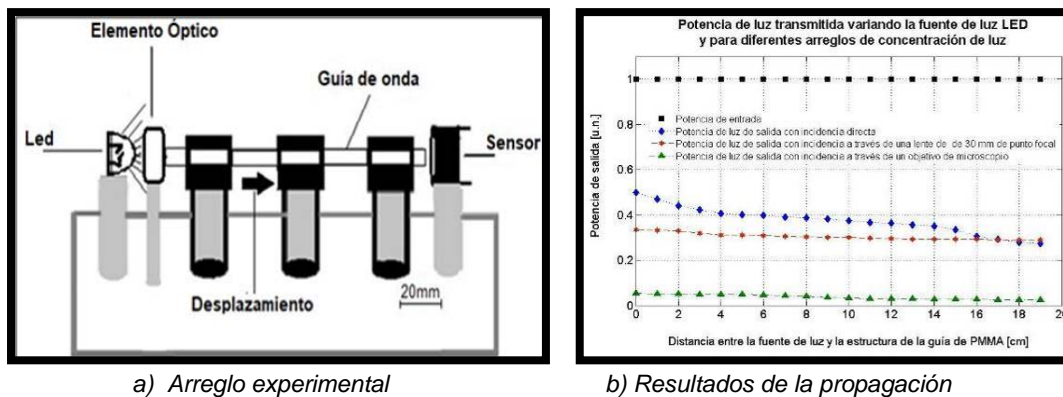
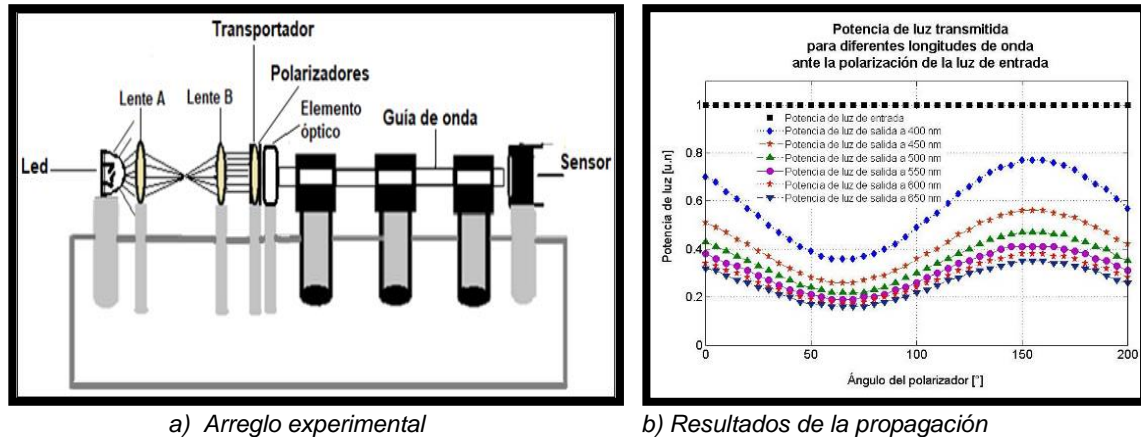


Figura 11 Propagación a incidencia normal con una fuente de luz blanca (LED).

Para este estudio, se observó que la mayor potencia que se obtiene es cuando no existe elemento óptico de por medio y ocurre cuando la distancia entre la fuente de luz y la barra es solo de algunos mm de separación. Bajo estas condiciones, la potencia de salida es del 50% de la potencia de entrada a la guía. Conforme se aumenta la distancia entre el LED y la guía, la potencia decrece hasta un 30% de la potencia total ingresada cuando la distancia es de 20 cm. Por otra parte, cuando se utilizó una lente de 30 mm para enfocar el haz, la potencia máxima es de alrededor del 35% de la potencia de entrada, la cual, aunque es menor que en el caso cuando no existe elemento óptico de por medio, mantiene un valor más constante para diferentes distancias entre la fuente de luz y la guía, disminuyendo solo a 30% cuando la distancia es de 20 cm. Finalmente se observa que cuando se utiliza un objetivo de microscopio, la potencia de salida es muy pobre, ya que el haz requiere un proceso previo de colimación, lo que complica más el arreglo experimental.

De esta prueba se puede concluir que la propagación de radiación con una fuente de luz blanca, resulta menor que la de una fuente monocromática, lo cual puede explicarse por diversas razones: el LED no presenta coherencia óptica como el láser, lo cual requiere específicamente de un elemento óptico para enfocar la radiación y de un elemento para la colimación de la luz. Además, en este caso, la guía de PMMA también responde de forma distinta a diferentes longitudes de onda, así como el hecho de que la propia fuente, no presenta una misma intensidad lumínica para todas las longitudes de onda. Otro aspecto que debe considerarse en la propagación de luz blanca, son los efectos de polarización. Mientras que con un láser la radiación entra polarizada a la guía y no puede observarse los efectos a otros ángulos de polarización, con el uso de una fuente de luz blanca, al ser una fuente no polarizada, se podría ver alterada la propagación. Por lo cual se propone el arreglo de la figura 12a y se observan los resultados en el gráfico de la figura 12b. Como se observa en figura 12, la potencia de salida se ve afectada por el ángulo de polarización del haz, de esta manera, la potencia máxima ocurre cuando el plato polarizador se halla alrededor de 160° , alcanzado su mayor razón de potencia de salida cuando el medidor de potencia se halla ajustado a 400 nm, y la variación de potencia, se presenta bajo un perfil sinusoidal como se esperaría en cualquier otra

situación donde se polariza la luz. Este resultado, permite establecer que las barras de acrílico responden de forma distinta para diferentes ángulos de polarización, algo que habría que tomar en cuenta, cuando se trabaje con luz no polarizada y con elementos ópticos que podrían forzar a la polarización de la radiación.



a) Arreglo experimental b) Resultados de la propagación
 Figura 12 Propagación de luz blanca colimando y polarizando el haz de luz.

Con los resultados obtenidos anteriormente, se puede ahora estudiar las condiciones que garantizan una mejor respuesta a la transmisión de radiación solar, como fuente de luz natural. Recordando que este estudio se ha realizado con la intención de proponer sistemas de iluminación natural “daylighting” utilizando materiales sustitutos de las fibras ópticas. Para ello, se proponer seguir el arreglo experimental de la figura 13a, donde se colecta la radiación solar con una lente de 100 mm de punto focal y se dirige hacia la guía de PMMA, la cual está encerrada en un contenedor con fondo oscuro, para evitar que exista radiación difusa incidiendo sobre la guía. El tubo de acrílico es de 40 cm, y es el mismo que se ha utilizado en los experimentos anteriores, y el medidor de potencia óptica también es el que se utilizó en las mediciones previas.

Los resultados de este experimento al incluir la lente concentradora y al no incluirla para dirigir la luz hacia la guía, se muestran en la figura 13b. Además de que también se ha realizado un barrido en la longitud de onda que detecta el sensor de potencia óptica, para determinar la potencia en cada componente frecuencial. De acuerdo con los resultados (Figura 13), la potencia máxima que detecta el sensor,

ocurre cuando este está ajustado para medir 400 nm. Para el caso de incidencia directa de la radiación del sol sobre el medidor, la potencia detectada es de 200 mW, la cual se reduce conforme el medidor de potencia hace el barrido en la longitud de onda, llegando a medir 65 mW en 800 nm.

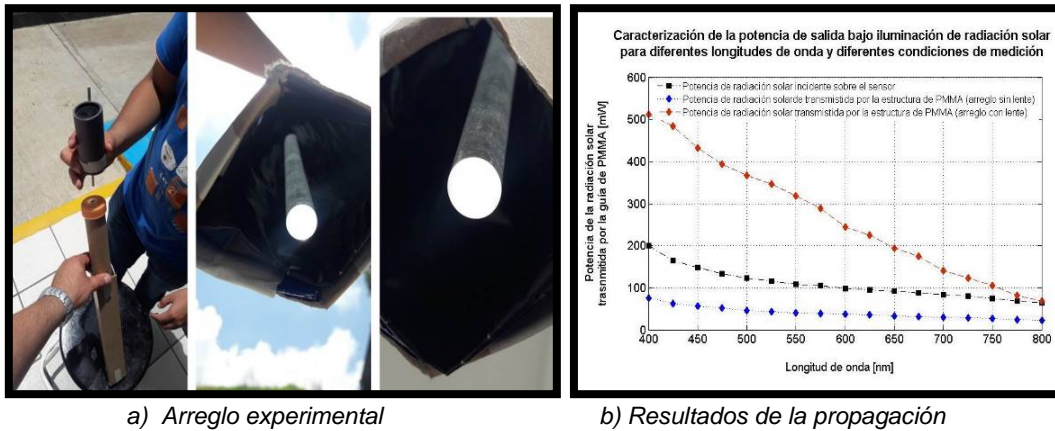


Figura 13 Propagación de radiación solar a través de estructuras cilíndricas de PMMA.

Cuando se coloca la guía de PMMA y se incide la radiación solar con dirección normal sobre la superficie de entrada de la guía y sin lente que concentre la radiación, la potencia máxima alcanzada es también la que se mide en 400 nm y corresponde a un valor aproximado de 75 mW, es decir, solo se transmite el 35% de la radiación que entra a la guía. Este resultado, sugiere el uso de una lente para aumentar la radiación que ingresa a la guía. Bajo este esquema, la potencia máxima alcanzada también en 400 nm, es de aproximadamente 500 mW, lo que significa un incremento del 150% de la potencia que detecta el sensor sin la lente ni la guía. Resultado que tiende a ser muy significativo y prometedor para los objetivos que se pretenden de desarrollar sistemas de iluminación “daylighting” mediante la concentración, guiado y redireccionamiento de luz a través de guías de onda hechas con materiales de menor costo que las fibras ópticas.

4. Discusión

Con los experimentos realizados, se pueden resumir algunos resultados importantes derivados de este estudio experimental.

La propagación de radiación a través de estructuras cilíndricas de PMMA, depende del tipo de radiación que se está propagando, luz monocromática o luz blanca. Aunque los niveles de potencia máximos se obtuvieron con el láser de 633 nm, el interés es propagar radiación de todo el espectro visible. También se ha observado que los elementos ópticos de concentración de luz modifican la dinámica de propagación de luz, y lo cuales pueden contribuir para incrementar o reducir la razón de radiación óptica transmitida y consecuentemente la potencia medida al final de la guía. Además, se observó que los efectos de temperatura y deflexión en las guías, afectan muy poco la propagación de la radiación.

En los experimentos con luz blanca, se ha observado que las guías de PMMA, son sensibles a la longitud de onda transmitida, observándose una mayor potencia en 400 nm. En este caso, el uso de lentes contribuye para coleccionar la radiación y enfocarla sobre la guía ya que, al no ser coherente, la radiación se difracta antes de alcanzar la guía y solo una porción de esta logra ingresar a la estructura cilíndrica. Efectos de polarización también se han observado y es un factor a considerar cuando se propaga luz no polarizada. Respecto a la radiación solar, se observó que la guía puede concentrar una cantidad considerable de radiación y guiarla al otro extremo, permitiendo con ello vislumbrar la posibilidad de utilizar las guías de PMMA como una alternativa a la fibra óptica, en los sistemas de iluminación natural.

5. Conclusiones

Los resultados aquí obtenidos, han mostrado los efectos que tienen algunos factores internos y externos a las guías, para obtener la mayor razón de potencia al propagar radiación dentro de ellas. Se han determinado las condiciones bajo las cuales se puede mejorar e incrementar la radiación de salida. Así, por ejemplo, el uso de lentes para concentrar radiación, el rango del espectro visible que se desea propagar, el ángulo de incidencia y los efectos de polarización.

Realizando un análisis comparativo final se puede observar que, en la mayoría de los casos estudiados, la máxima potencia de salida normalizada que se obtiene de la propagación en las guías es de aproximadamente entre el 50 y 60% de la potencia que ingresa a la guía.

Algunos de los aspectos que se derivan de este trabajo, son por ejemplo estudiar en el futuro, lo que ocurre cuando se modifica la geometría de la guía o implementar un medio que rodee a la guía para reducir la diferencia entre los índices de refracción en la interfaz donde se produce la reflexión interna. Además de que se pueden sugerir formas de aumentar la reflectividad en el medio. También se podría experimentar con diferentes diámetros de la guía y experimentar con radiación natural y observar los efectos térmicos del sol sobre la conducción de la guía.

Finalmente se puede concluir de este trabajo experimental, que el uso de estructuras de PMMA para conducir luz mediante el efecto de reflexión total interna, es prometedor para el diseño de sistemas de iluminación natural.

6. Bibliografía y Referencias

- [1] Bellia, L., Fragliasso, F., & Pedaceb, A. (2015). Evaluation of Daylight Availability for Energy Savings. *Journal of Daylighting*, 12-20.
- [2] Beltrán, L., Lee, E., & Selkowitz, S. (1996). Advanced optical daylighting Systems. IESNA Annual Conference, (págs. 1-30). Cleveland.
- [3] Cariou, J., Martin, L., & Dugas, J. (1980). Advances in Ceramics. *Phys. Fiber Opt.*, 557-563.
- [4] Everlight. (2007). futureelectronics.com. Recuperado el 11 de 02 de 2018, de http://www1.futureelectronics.com/doc/EVERLIGHT%C2%A0/334-15__T1C1-4WYA.pdf
- [5] Hecht, E. (2016). *Optics*. Pearson Education.
- [6] Hecht, J. (2002). *Understanding Fiber Optics*. Pentice Hall.
- [7] International Polymer Solutions Inc. (s.f.). IPS. ACRYLIC. Irvine, CA.
- [8] Okamoto, K. (2000). *Fundamentals of Optical Waveguides*. Academic Press.
- [9] Pacheco Diéguez, A., Gentile, N., Wachenfelt, H. V., & Duboisa, M.-C. (2016). Daylight Utilization with Light Pipe in Farm Animal Production: A Simulation Approach. *Journal of Daylighting*, 1-11.
- [10] Rahman-Abdul, H. a. (2010). Limitations in current day lighting related solar concentration devices: A critical review. *International Journal of the Physical Sciences*, 2730-2756.

- [11] Pawar, E. (2016). A Review Article on Acrylic PMMA. *IOSR Journal of Mechanical and Civil Engineering (IOSR-JMCE)*, 1-4.
- [12] Saleh, B. E. (1991). *Fundamentals of Photonics*. John Wiley & Sons, Inc.
- [13] Snyder, A. W. (1983). *Optical Waveguide Theory*. Chapman & Hall.
- [14] Xuan, Q., Li, G., Pei, G., Su, Y., & Jia, J. (2017). Design and Optical Evaluation of a Novel Asymmetric Lens-Walled Compound Parabolic Concentrator (ALCPC) Integration with Building South Wall. *Journal of Daylighting*, 26-36.
- [15] Zhou, X., Yan, D., Hong, T., & Ren, X. (2015). Data Analysis and Modeling of Lighting Energy Use in Large Office Buildings in China. *Energy and Buildings*, 275-287.