

**TERCER CONGRESO DE INVESTIGACIÓN Y TRANSFERENCIA
TECNOLÓGICA EN INGENIERÍA ELÉCTRICA CITTIE 2019
OCTAVO SEMINARIO NACIONAL DE ENERGÍA SENE 2019.**

Universidad Tecnológica Nacional Facultad Regional La Plata

***Ahorro de Energía Eléctrica Mediante la Iluminación con Luz Solar
Transportada por Fibras Ópticas***

Pollora, Genaro Cesar, Estigarribia Peña, Olga Stela, Figueroa de la Cruz, Mario M., Beltrán, Néstor René, Gómez, Daniel Hernán, Solórzano, Claudia.

Universidad Tecnológica Nacional, Facultad Regional Tucumán
Rivadavia 1050, San Miguel de Tucumán, Argentina,
Tel: (0381) 4217150 / 4307387 / 4307385 - Interno 200
gpollora@yahoo.com.ar
mfiguero@gmail.com
nestorrenebel@gmail.com
olgastela@gmail.com
danielgomez62@outlook.com
clausol2@yahoo.com.ar

Resumen – Ante los problemas ambientales por el consumo desmedido de combustibles fósiles surge la necesidad de desarrollar energías renovables alternativas y también de propiciar el ahorro energético. Una manera de disminuir el consumo de energía eléctrica es aprovechar la energía solar con fines de iluminación. Esto se puede lograr potenciando el uso de ventanas y ductos estratégicamente ubicados en las edificaciones y, de una manera innovadora, usando las propiedades de ciertas fibras ópticas para el transporte pasivo de la luz solar hacia lugares oscuros. Esta última idea es el objeto de investigación de los proyectos homologados en la Universidad Tecnológica Nacional identificados como UTI 3666 y UTI 5407, a partir de los cuales surge el presente trabajo.

Para cumplir con el objetivo planteado se propone un sistema básico, justificando cada parte del mismo con el análisis de los conceptos teóricos involucrados y los resultados experimentales. Se analizan las características de cada parte del sistema y se exponen las distintas dificultades encontradas.

Palabras claves - Ahorro energético; Beneficios en la salud; Cuidado del medio ambiente; Iluminación con luz solar; Fibras ópticas.

**TERCER CONGRESO DE INVESTIGACIÓN Y TRANSFERENCIA
TECNOLÓGICA EN INGENIERÍA ELÉCTRICA CITTIE 2019
OCTAVO SEMINARIO NACIONAL DE ENERGÍA SENE 2019.**

Universidad Tecnológica Nacional Facultad Regional La Plata

**TERCER CONGRESO DE INVESTIGACIÓN Y TRANSFERENCIA
TECNOLÓGICA EN INGENIERÍA ELÉCTRICA CITTIE 2019
OCTAVO SEMINARIO NACIONAL DE ENERGÍA SENE 2019.**

Universidad Tecnológica Nacional Facultad Regional La Plata

1. INTRODUCCIÓN.

La iluminación con luz solar fue utilizada por el hombre en todos los tiempos, siendo la más económica, limpia y saludable.

Junto al avance de la tecnología, el uso de la iluminación eléctrica creció sin tener en cuenta el posible agotamiento de los combustibles fósiles y los problemas ambientales por la emisión excesiva de CO₂, ambos relacionados a la generación de energía eléctrica. Por esto en la actualidad se está tomando conciencia de la necesidad de desarrollar técnicas y normas para favorecer las Energías Alternativas y el Ahorro Energético [1].

Entre otros tantos proyectos de ahorro energético, este trabajo plantea la idea de disminuir el consumo de electricidad aprovechando los rayos solares para iluminar espacios interiores en los que normalmente se recurre a la luz eléctrica [2]. Esto quiere decir, básicamente, transportar la luz solar desde el exterior hacia el interior, sin ninguna conversión de energía.

Cualquier sistema que pretenda cumplir con el objetivo de iluminación mencionado debería contar con un *colector* que concentre los rayos solares, aumentando la intensidad luminosa en la entrada de una *guía de luz* (fibra óptica), la cual transporte la luz hasta los espacios interiores que la requieran. Un *mecanismo de seguimiento solar automático* debería mover el colector para tenerlo siempre enfrentado al sol. En el interior, artefactos tipo *luminarias* deberían difundir la luz para abarcar mayores superficies.

Se encuentran muy pocas soluciones comerciales de este tipo a nivel mundial y también escasos trabajos de investigación.

Este concepto promisorio y estéticamente atractivo, presenta una complejidad técnica no menor, sobre todo en la elección del medio de transporte de la luz, en el filtrado de los rayos solares y en la necesidad de orientar permanentemente el colector en dirección al sol.

De acuerdo a investigaciones en el área de la sanidad, el uso de la luz natural produce diversos beneficios en la salud de los humanos. Lo que significa un motivo más para desarrollar el sistema de iluminación mencionado.

2. CONCEPTOS TEORICOS.

2.1. Espejos y lentes

Según los principios de la óptica geométrica, la luz se propaga como un rayo y al incidir en una superficie puede experimentar los fenómenos de reflexión y de refracción.

En base a estos fenómenos se desarrollaron dispositivos que permiten controlar el curso, normalmente recto, de los rayos de luz. Los que se basan en la reflexión se llaman espejos y pueden ser cóncavos o convexos. Los que se basan en la refracción de la luz se llaman lentes, y pueden ser convergentes o divergentes. Tanto los espejos como las lentes tienen un punto llamado "foco" en donde se concentran (real o virtualmente) todos los rayos que llegan a ellos.

2.2. Fibras ópticas

Estos cables están constituidos por un núcleo y un revestimiento, ambos transparentes pero de diferentes índices de refracción, siendo el índice del núcleo mayor al del revestimiento. Esto asegura que se produzca la "reflexión interna total", si la luz incide en

**TERCER CONGRESO DE INVESTIGACIÓN Y TRANSFERENCIA
TECNOLÓGICA EN INGENIERÍA ELÉCTRICA CITTIE 2019
OCTAVO SEMINARIO NACIONAL DE ENERGÍA SENE 2019.**

Universidad Tecnológica Nacional Facultad Regional La Plata

la interface de los dos medios con un ángulo mayor al *ángulo crítico*, que de acuerdo la ley de Snell se lo obtiene a partir de:

$$\text{sen } \theta = \frac{n_1}{n_2}$$

Si la luz incide en el puerto de entrada de la fibra óptica con un ángulo menor a su apertura numérica, la misma se propaga por su interior reflejándose sucesivamente, sin que haya ninguna refracción, hasta llegar al otro extremo.

Estos cables son ampliamente utilizados en Telecomunicaciones para la transmisión de información digitalizada en forma de pulsos de luz. Para estas aplicaciones se disponen de fibras ópticas de cuarzo, de muy reducidos diámetros (10 a 50 micrones) y se las diferencia en Monomodo y Multimodo.

Para otras aplicaciones existen fibras ópticas plásticas, con igual principio de funcionamiento, con mayores diámetros, pero a la vez con mayores pérdidas por atenuación.

2.3. Espectro de la radiación solar

A partir de la teoría de James Clerk Maxwell, se sabe que la luz se propaga de acuerdo a un comportamiento ondulatorio, dando lugar a los fenómenos de interferencia, difracción y polarización, entre otros. Entonces, la luz al igual que todas las ondas electromagnéticas, se caracteriza por su frecuencia, amplitud, longitud de onda y potencia.

Se sabe que la luz visible comprende un rango de longitudes de onda que va desde los 400 nm (violeta) hasta los 700 nm (rojo). Longitudes de ondas inmediatamente menores a 400 nm son rayos ultravioletas e inmediatamente superiores a 700 nm son rayos infrarrojos.

Por otro lado entendemos que la energía que nos llega mediante los rayos solares está compuesta por la suma de luz visible, rayos infrarrojos y rayos ultravioleta, principalmente.

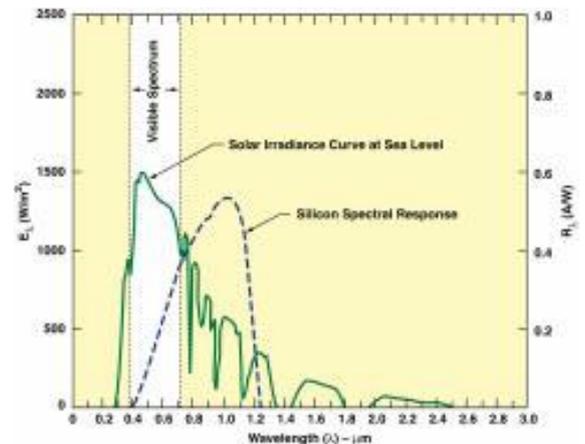


Figura 1 *Respuesta espectral de la luz solar a nivel del mar y del silicio*

2.4. Luminotecnia

La luz emitida por una fuente se puede cuantificar por su intensidad, la que representa la potencia por unidad de superficie. Si una fuente emite isotrópicamente (en todas direcciones) la intensidad disminuye con el cuadrado de la distancia, ya que se obtiene dividiendo la potencia de la fuente en la superficie de una esfera.

El flujo luminoso, básicamente, es el producto de la intensidad luminosa por el área transversal a los rayos de luz.

3. DISEÑO DEL SISTEMA.

Para lograr los objetivos de este proyecto el sistema debe contar con las siguientes partes [3] [4] principales:

- 1- colector solar;
- 2- guía de luz;
- 3- sistema de seguimiento solar;

**TERCER CONGRESO DE INVESTIGACIÓN Y TRANSFERENCIA
TECNOLÓGICA EN INGENIERÍA ELÉCTRICA CITTIE 2019
OCTAVO SEMINARIO NACIONAL DE ENERGÍA SENE 2019.**

Universidad Tecnológica Nacional Facultad Regional La Plata

4- luminarias y

5- sistema híbrido para mantener constante el nivel de iluminación.

Las consideraciones tenidas en cuenta en el diseño del sistema son las siguientes:

La intensidad luminosa presente en el puerto de entrada de la fibra óptica (guía de luz) será transmitida, descontando las pérdidas, al puerto de salida. Por lo tanto el flujo luminoso a la salida de la fibra será el flujo de entrada menos las pérdidas. Si se ingresa a la fibra óptica la luz directa que llega del sol el flujo de entrada y en consecuencia el flujo disponible para iluminar el espacio que se requiera, será muy pequeño a causa de los reducidos diámetros de las fibras, mucho menos en las fibras de multimodo o monomodo.

Por lo expuesto concluimos que es indispensable contar con un colector que concentre la luz solar, aumentando la intensidad luminosa en el puerto de entrada y en consecuencia incrementando el flujo luminoso que llegara al espacio interior. Para disponer de un cierto flujo luminoso en un espacio interior, a menor sección de fibra óptica mayor debería ser la intensidad luminosa en la entrada de la misma.

Otro aspecto importante a tener en cuenta es el hecho de que la entrada de la fibra óptica siempre debe estar ubicada en el foco del colector, para capturar la mayor intensidad luminosa posible. Esto significa que la entrada de la fibra siempre debe estar en la misma posición respecto al colector, y éste siempre enfrentado a los rayos solares.

3.1. El colector solar

Tiene la función de concentrar los rayos solares, es decir aumentar la intensidad

luminosa, en una pequeña superficie (llamado foco) en donde estará ubicada la entrada de la guía de luz. Al mismo se lo puede realizar con espejos o con lentes. A mayor tamaño de los espejos mayor intensidad luminosa concentrada. Los espejos pueden ser esféricos o parabólicos, según la necesidad. Se pueden utilizar lentes convergentes individuales de diferentes tamaños y pueden estar agrupadas en distintos números de acuerdo a los requerimientos del proyecto. También se pueden realizar colectores con una única "lente de Fresnel".

3.2. La guía de luz

Es el medio por donde viajara la luz desde el exterior hacia el interior. Aunque hay diferentes alternativas, en este proyecto esta función es cumplida por fibras ópticas. Es deseable que las mismas tengan baja atenuación, sean resistentes a rayos infrarrojos y ultravioletas, sean flexibles y tengan bajo costo para que sea viable el proyecto.

Para lograr que el sistema funcione se debe tener el permanente cuidado de que la entrada de la fibra óptica este ubicada en el foco del concentrador.

3.3. Sistema de seguimiento solar

Debido al movimiento relativo entre el sol y la tierra es necesario corregir permanentemente la orientación del colector para que los rayos solares incidan siempre en forma perpendicular al mismo. Esto y debido a que la entrada de la fibra siempre está en la misma posición respecto al colector, permite tener en todo momento una buena intensidad luminosa en la salida de la fibra. Para lograr esto se debe contar con un sistema de seguimiento solar automático. Esta función se la puede realizar de varias maneras. En nuestro caso optamos por un mecanismo

**TERCER CONGRESO DE INVESTIGACIÓN Y TRANSFERENCIA
TECNOLÓGICA EN INGENIERÍA ELÉCTRICA CITTIE 2019
OCTAVO SEMINARIO NACIONAL DE ENERGÍA SENE 2019.**

Universidad Tecnológica Nacional Facultad Regional La Plata

formado por una cavidad que puede moverse en dos ejes, y en su parte frontal lleva ubicada una lente convergente. Por medio de dos motores de pasos a pasos, controlados por una placa Arduino, y con los correspondientes engranajes reductores, se realizan los movimientos de Azimut y Zenit. Estas correcciones se producen en función de las señales generadas por un sensor de dirección solar, construido con resistencias LDRs, y enviadas a la placa Arduino.

3.4. Luminarias

Una vez que la luz solar ha sido concentrada, acoplada a la fibra y transportada por esta, es necesaria la difusión de la misma para iluminar una mayor superficie en el ambiente interior. Esto se puede lograr con luminarias (pasivas) que básicamente lo que harán es reflejar y refractar la luz solar.



Figura 2 Conjunto de luminarias

3.5. Sistema híbrido

Debido a las fluctuaciones que puede sufrir el nivel de luz en el exterior, por la nubosidad, el sistema completo debería contar con lámparas eléctricas incorporadas y controladas por un sistema automático, con el fin de mantener constante el nivel de iluminación en el interior.

4. RESULTADOS EXPERIMENTALES.

Se puede decir que buena parte de los conocimientos adquiridos en este proyecto surgen de la experimentación.

De las pruebas realizadas con fibras ópticas de cuarzo, usadas en telecomunicaciones, se entendió que no es factible el uso de las mismas para los fines del proyecto. A causa de sus reducidos diámetros (10 a 50 micrones) es muy difícil el ingreso de la luz en la fibra y por otro lado, al ser tan pequeña la sección transversal se requeriría intensidades luminosas muy elevadas (que traerían otros problemas) para transportar luz suficiente para fines prácticos. De todas formas, se prevé realizar pruebas con varias fibras de este tipo trabajando en paralelo.



Figura 3 Pruebas con fibras ópticas de cuarzo, lente convergente y luminaria dicróica.

A los efectos de concentrar la luz solar para disponer mayores intensidades de luz a la entrada de las fibras ópticas se hicieron pruebas con espejos cóncavos (realizados con antenas parabólicas) y también con lentes convergentes de distintos tipos y tamaños. En

**TERCER CONGRESO DE INVESTIGACIÓN Y TRANSFERENCIA
TECNOLÓGICA EN INGENIERÍA ELÉCTRICA CITTIE 2019
OCTAVO SEMINARIO NACIONAL DE ENERGÍA SENE 2019.**

Universidad Tecnológica Nacional Facultad Regional La Plata

todos los casos se obtuvieron intensidades luminosas muy elevadas.

En la búsqueda de un mejor medio para la transmisión de luz solar se hicieron pruebas, entre otras, con fibras ópticas plásticas recubiertas, de 1 mm de diámetro, y también con un haz de fibras desnudas de 0,75 mm de diámetro. En estas pruebas se observó que tienen una respuesta mucho más aceptable para los fines del proyecto, aunque tienen la desventaja de que son difíciles de conseguir y tienen un costo superior a las fibras ópticas comunes.

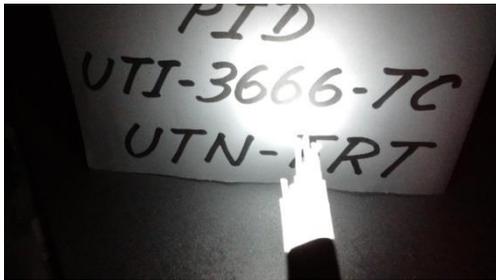


Figura 4 Pruebas con fibras ópticas plásticas



Figura 5 Pruebas con un haz fibras ópticas plásticas

En los ensayos efectuados para concentrar la luz solar, por distintos medios, se comprobó que todos estos dispositivos son muy sensibles a la variación relativa de la posición solar. En cuestión de unos pocos minutos cambia la posición del foco luminoso y es necesario reubicar la entrada de la fibra óptica. Por tal motivo es indispensable contar

con un sistema de seguimiento solar automático. Con este objetivo se armó un mecanismo de prueba, consistente en una cavidad que puede girar sobre dos ejes, movida por dos motores paso a paso que son controlados por una placa Arduino. En el frente de la cavidad va ubicada una lente, que tendrá su foco en un punto interior a la cavidad. Para detectar la dirección del sol respecto al frente del colector se dispone de un sensor, realizado principalmente con resistores LDR.

El mecanismo de seguimiento armado cumple básicamente con el objetivo. Es necesario mejorar su precisión, robustez y programación para contemplar casos especiales.



Figura 6 Prototipo de mecanismo de seguimiento solar. Control electrónico. Instrumental.

**TERCER CONGRESO DE INVESTIGACIÓN Y TRANSFERENCIA
TECNOLÓGICA EN INGENIERÍA ELÉCTRICA CITTIE 2019
OCTAVO SEMINARIO NACIONAL DE ENERGÍA SENE 2019.**

Universidad Tecnológica Nacional Facultad Regional La Plata



Figura 7 Prototipo de mecanismo de seguimiento solar. Control electrónico. Instrumental.

Para lograr la difusión de la luz solar, transportada por las fibras ópticas, se probó con reflectores del tipo que utilizan las lámparas dicroicas y que tienen muy buena reflectividad. Los resultados fueron satisfactorios, aunque se pueden mejorar.

5. CONCLUSIONES.

De acuerdo a lo investigado y a las pruebas realizadas, se puede decir que es factible iluminar espacios interiores con luz solar, por medio de fibras ópticas plásticas.

La concentración de luz solar no presenta grandes inconvenientes y se la puede hacer de distintas manera.

De la experimentación realizada, se concluye que la mayor dificultad que se enfrenta en este proyecto es conseguir un tipo de Fibra Óptica (o guía de luz) que se pueda acoplar fácilmente al colector solar, que permita la transmisión de intensidades importantes de luz, que sea flexible, que tenga una baja atenuación para poder llegar a lugares alejados y que tenga un costo accesible para que haga viable este sistema. Lo conveniente es disponer de FO de mayores diámetros.

Un tema que debe ser atendido es el calentamiento producido por la concentración de los rayos solares. Esto puede dañar las fibras ópticas, y limita el flujo luminoso máximo que se puede transportar.

Debido a la complejidad del sistema de seguimiento solar automático, que eleva el costo total del proyecto y lo hace más vulnerable a posibles fallas, sería muy ventajoso diseñar un colector solar estático que pueda captar intensidades luminosas suficientes, desde cualquier dirección.

Comparando las mediciones de intensidad luminosa, en aulas de la UTN – FRT, con las normas internacionales sobre los niveles de luz necesarios para cada actividad humana, se observó que aprovechando la abundante luz natural que ingresa por las ventanas en buena parte del día, se puede lograr un importante ahorro en energía eléctrica. Este concepto se puede hacer extensivo para un sistema de iluminación natural en base a fibras ópticas.

En la medida en que se mejore la técnica de acoplamiento de la luz solar a las fibras ópticas y se consigan fibras ópticas más económicas, este sistema de iluminación puede llegar a ser competitivo.

6. REFERENCIAS.

[1] National Laboratory Directors for the U.S. Department of Energy, "Technology Opportunities: to Reduce U.S. Greenhouse Gas Emissions, and "Technology Opportunities: to Reduce U.S. Greenhouse Gas Emissions: Appendix B; Technology Pathways," October 1997.

[2] Prokash, K., Vijai, T. and Kannan, R, "Comprehensive Ventilation and Lighting Design of a Building," International Journal of Research in Civil Engineering, Architecture&Design, 1(1), 28-38, 2013.

**TERCER CONGRESO DE INVESTIGACIÓN Y TRANSFERENCIA
TECNOLÓGICA EN INGENIERÍA ELÉCTRICA CITTIE 2019
OCTAVO SEMINARIO NACIONAL DE ENERGÍA SENE 2019.**

Universidad Tecnológica Nacional Facultad Regional La Plata

[3] Craig DiLouie, The Lighting Management Handbook, The Fairmont Press, Lilburn, Georgia., 1997, p. 120

[4] Muhs, Jeff. DESIGN AND ANALYSIS OF HYBRID SOLAR LIGHTING AND FULL-SPECTRUM SOLAR ENERGY SYSTEMS. Oak Ridge National Laboratory. Madison, Wisconsin July 16-21, 2000.