

Transmisión de luz en guías de onda con estructuras intrínsecas al núcleo

Norma Patricia Puente Ramírez, Fernando Carranza Hernández,
Gustavo Rodríguez Morales
UANL-FIME, Posgrado en Ingeniería Eléctrica
norma.puenterm@uanl.edu.mx

RESUMEN

Actualmente, la miniaturización, ligereza y velocidad de la transmisión de datos han sido considerados tópicos fundamentales en diversos grupos de investigación por su aplicación a los futuros sistemas de comunicación. La tecnología basada en guías de onda es una forma prometedora para sistemas de transmisión de 100 Gbits/seg, debido a sus excelentes características ópticas, reproducibilidad y alta confiabilidad. En este trabajo, se presenta un estudio numérico de la transmisión y reflexión de luz en guías de onda rectangulares, considerando modulaciones del índice de refracción en el núcleo de la guía de onda, estructuras periódicas y quasiperiódicas conocidas como Thue-Morse, Fibonacci. El método utilizado es el de la matriz de transferencia. Los resultados pueden ser aplicados a sistemas de transmisión de datos, filtros ópticos, sensores, moduladores y al diseño de láseres con ancho espectral deseado.

PALABRAS CLAVE

Guías de onda, Estructuras intrínsecas, Periódicas, Cuasi-periódicas, Fibonacci, Thue-Morse.

ABSTRACT

Currently, miniaturization, lightness and speed of data transmission have been considered fundamental topics in several research groups for its application to future communication systems. The technology based on planar wave guides is a promising way for transmission systems at 100 Gbits/s, due to its excellent optical characteristics, high reliability and reproducibility. In this paper, a numeric study of the transmission and reflection of light in planar wave guides is presented, considering refractive index modulation in the core of the planar waveguide, and also considering periodic and quasi-periodic structures known as Thue-Morse, Fibonacci. The method used is the transfer-matrix method. The results can be applied to data transmission systems, optical filters, optical sensors, optical modulators and to the implementation of lasers with a desired spectral width.

KEYWORDS

Waveguide, intrinsic structure, Quasi periodic structure, periodic structure, Fibonacci, Thue-Morse.

INTRODUCCIÓN

En la ingeniería de telecomunicaciones es primordial el estudio de la propagación de ondas electromagnéticas entre diferentes medios, un caso común es el de una señal propagándose en el aire y después por algún medio dieléctrico, o material compuesto dieléctrico-metal y así propagarse, para ser finalmente detectada. En el caso óptico los sistemas de propagación son integrados en un *chip* dentro del cual se tienen diferentes medios dieléctricos y el control de la propagación de la luz en dichos medios es parte fundamental para lograr sistemas de alta eficiencia en cuanto a la razón señal-ruido y el bajo consumo energético.

Los últimos años, diversos grupos de investigación han reportado a las guías de onda (rectangulares y cilíndricas) como el perfecto medio de propagación electromagnético, revolucionando el campo de la óptica integrada al convertirse en un dispositivo óptico pasivo imprescindible en la manipulación de luz,¹ líneas de transmisión² y sensado de variables termodinámicas o mecánicas.³

Guía de onda

Una guía de onda es cualquier estructura física a través de la cual las ondas electromagnéticas se propagan o permanecen confinadas.⁴ El haz de luz debe cumplir con las siguientes condiciones: reflexión total interna y autoconsistencia para propagarse dentro de la guía de onda rectangular, con el fin de seguir alguna de las trayectorias delimitadas por sus paredes.

En este trabajo se contempla la guía de onda rectangular envuelta por un revestimiento con índice de refracción menor que el del núcleo con el fin de

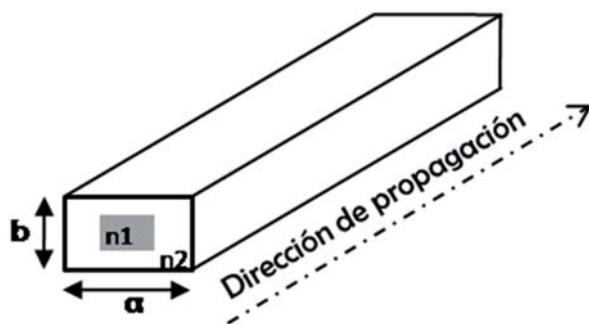


Fig. 1. Guía de onda rectangular.

cumplir la reflexión total interna, se estudia el caso particular variaciones del índice de refracción, como se muestra en la figura 1.

MARCO TEÓRICO

El análisis de la transmisión de luz en guías de onda se realizó aplicando el Método de la Matriz de Transferencia. Este método parte de las ecuaciones de Maxwell para el cálculo de las magnitudes del campo magnético y eléctrico. Se parte asumiendo un medio isotrópico, homogéneo y no conductor, por lo que se tiene que:

$$\begin{aligned} \nabla \times H - \frac{1}{c} \frac{\partial D}{\partial t} &= 0 \\ \nabla \times E - \frac{1}{c} \frac{\partial B}{\partial t} &= 0 \end{aligned} \quad (1)$$

donde H es el campo magnético, E es el campo eléctrico, D y B son la densidad de flujo eléctrico y magnético respectivamente $D = \epsilon E$ y $B = \mu H$, mientras que ϵ es la permitividad eléctrica y μ es la permeabilidad magnética. Se obtienen dos ecuaciones con polarización Transversal Eléctrico (TE) y Transversal Magnético (TM). Para este trabajo es despreciable la polarización del campo TM debido a que se considera invariante con respecto a la componente perpendicular al campo debido a las dimensiones.

El campo satisface la ecuación de Helmholtz unidimensional, dada por:

$$\frac{\partial^2 U}{\partial z^2} + k_c U(z) = 0 \quad (2)$$

donde U es la amplitud compleja del campo para la polarización TE y $k_c = (\omega \sqrt{\epsilon \mu}) / c$ representa la constante de propagación.

La solución general para la ecuación (2) se plantea de la forma:

$$U(z) = R^{(+)} e^{ik_c z} + R^{(-)} e^{-ik_c z} \quad (3)$$

donde $R^{(+)}$ y $R^{(-)}$ son ondas viajeras en direcciones opuestas que representan en este caso a la amplitud transmitida y reflejada del campo eléctrico, respectivamente.

Si se considera un medio homogéneo con longitud l, es decir variando de $z=0$ a $z+l$ e índice de refracción

n, las amplitudes de campo se pueden representar de la siguiente manera:

$$\begin{aligned} A_{z+l} &= A_z e^{ikcl}, \\ B_{z+l} &= B_z e^{-ikcl}, \end{aligned}$$

y en forma matricial es llamada matriz de propagación de un medio homogéneo y queda como sigue:

$$\begin{pmatrix} A_{z+l} \\ B_{z+l} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} e^{ikcl} & 0 \\ 0 & e^{-ikcl} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} A_z \\ B_z \end{pmatrix} \quad (4)$$

y en términos de los campos eléctricos y magnéticos quedaría:

$$\begin{aligned} H_y(z+l) &= R_{z+l}^{(+)} e^{ik_z z} + R_{z+l}^{(-)} e^{-ik_z z} \\ E_x(z+l) &= \sqrt{\frac{\mu}{\epsilon}} \left[R_{z+l}^{(+)} e^{ik_z z} - R_{z+l}^{(-)} e^{-ik_z z} \right] \end{aligned} \quad (5)$$

donde la amplitud del campo reflejado y transmitido en z+l, en función de la distancia z, que en forma matricial es:

$$\begin{pmatrix} R_{z+l}^{(+)} \\ R_{z+l}^{(-)} \end{pmatrix} = M_{\text{long}} \begin{pmatrix} R_z^{(+)} \\ R_z^{(-)} \end{pmatrix} \quad (6)$$

y la matriz que relaciona las amplitudes que se propagan a través de un medio homogéneo está dada como:

$$M_{\text{long}} = \begin{pmatrix} e^{ikcl} & 0 \\ 0 & e^{-ikcl} \end{pmatrix} \pi r^2. \quad (7)$$

Propagación del campo electromagnético a través de una interface

Si se analizan dos medio homogéneos consecutivos en dirección z, con frontera en z=0. El primer medio con índice de refracción n1 y el segundo medio un n2, tal como se muestra en la figura 2.

Con el fin de modelar la interface del medio homogéneo del que ha perdido la homogeneidad se conduce a las ecuaciones que describen la

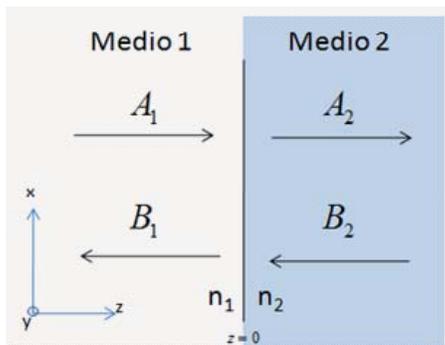


Fig. 2 Propagación de una onda plana a través de la interface entre dos medios con diferente índice de refracción.

propagación de ondas electromagnéticas en la interface de un medio n1 a un medio n2 están dadas por:

$$\begin{pmatrix} A_2 \\ B_2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} m_{1,1} & m_{1,2} \\ m_{2,1} & m_{2,2} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} A_1 \\ B_1 \end{pmatrix}, \quad (8)$$

donde los subíndices 1 y 2 representan el medio analizado, considerando z=0 en la interface entre el medio 1 y el medio 2, y denotando en forma matricial las ecuaciones se tiene que:

$$M_{12} = \frac{1}{2} \begin{pmatrix} 1 + \frac{n_2}{n_1} & 1 - \frac{n_2}{n_1} \\ 1 - \frac{n_2}{n_1} & 1 + \frac{n_2}{n_1} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} m_{11} & m_{12} \\ m_{21} & m_{22} \end{pmatrix} \quad (9)$$

el par de subíndices de la Matriz M12 indican el cambio de interface del medio 1 al medio 2, los elementos de la matriz están dados por:

$$m_{1,1} = m_{2,2} = \frac{1}{2} \left(1 + \frac{k_{c2}}{k_{c1}} \right), \quad (10)$$

$$m_{1,2} = m_{2,1} = \frac{1}{2} \left(1 - \frac{k_{c2}}{k_{c1}} \right). \quad (11)$$

Tomando en cuenta que ambos medios son dieléctricos y $n = \sqrt{\epsilon \mu}$, (10) y (11) se pueden representar como:

$$m_{1,1} = m_{2,2} = \frac{1}{2} \left(1 + \frac{n_2}{n_1} \right),$$

$$m_{1,2} = m_{2,1} = \frac{1}{2} \left(1 - \frac{n_2}{n_1} \right).$$

Partiendo de (8) y considerando solo las reflexiones por el medio 1, se obtienen los coeficientes de reflexión y transmisión, quedando:

$$r = \frac{B_1}{A_1} = - \frac{m_{2,1}}{m_{2,2}} = \frac{n_2 - n_1}{n_2 + n_1}, \quad (12)$$

$$t = \frac{B_2}{A_1} = - \frac{\det(M_{2,1})}{m_{2,2}} = \frac{2n_2}{n_2 + n_1} \quad (13)$$

TRANSMITANCIA Y REFLECTANCIA

La transmitancia (T) y reflectancia (R) se definen como la razón de flujo (o potencia) transmitido o reflejado.⁵ Si el ángulo de incidencia del haz de luz $\theta_i=0$, T y R puede representarse con los coeficientes de transmisión y reflexión:

$$R = |r|^2,$$

$$T = |t|^2.$$

Con el objetivo de cumplir con la conservación de energía, el sistema propuesto debe cumplir:

$$R+T=1. \tag{14}$$

Método de la matriz de transferencia

Este método funciona a partir de multiplicaciones matriciales. Los productos se generan a partir de la matriz de propagación en un medio homogéneo (7) y la matriz de propagación en una interface (9) según corresponda. Cada multiplicación indica un cambio en las magnitudes reflejadas y transmitidas, obteniendo finalmente:

$$M_R = \prod_{k=1}^N [M]_k [P]_k, \tag{15}$$

Donde N es el total de interfaces con medios homogéneos.

La manipulación matricial (15) es considerada para el sistema multicapa, donde el cambio de interfaces es característico de las rejillas de Bragg, quedando como sigue:

$$M_\Lambda = [M_{12}] [M_{long2}] [M_{21}] [M_{long1}] \tag{16}$$

donde M12 y M21 tienen la estructura de la ecuación (9) y Mlong1 y Mlong2 tienen la estructura de la ecuación (6).

Para propósitos del presente trabajo, es considerada la incidencia normal.

ESTRUCTURAS CUASI-PERIODICAS

En este trabajo, se analiza el desempeño de dos sucesiones cuasi-periódicas: Fibonacci y Thue Morse.⁶

Fibonacci

El concepto fundamental de la sucesión de Fibonacci es que cada elemento es igual a la suma de los dos anteriores, siendo definido por la ecuación:

$$f_n = f_{(n-1)} + f_{(n-2)},$$

partiendo de los valores iniciales n=0 y n=1. Para este trabajo se implemento A como longitud en la guía de onda sin cambio en el índice de refracción y B para la longitud con cambio en el índice de refracción de la guía de onda, es importante aclarar

que el cambio en el índice de refracción se refiere a la inclusión de rejillas de Bragg^{7,8} en el núcleo, como se observa en la figura 3.

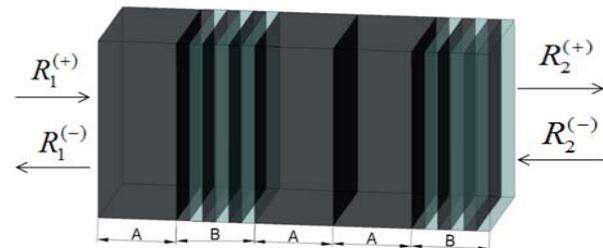


Fig. 3. Geometría con secuencia Fibonacci.

Thue Morse

La secuencia Thue-Morse (Allouche and Cosnard 2000) es una secuencia binaria (de una secuencia infinita de 0 y 1) iniciando con 0 y añadiendo sucesivamente el complemento booleano de la secuencia obtenida hasta el momento. Este procedimiento produce la siguiente secuencia: 01, 0110, 01101001, 0110100110010110 y así sucesivamente, en términos físicos 1 o A, corresponde a no variación del índice de refracción, mientras que 0 o B corresponde a rejillas de bragg, como se muestra en la figura 4.

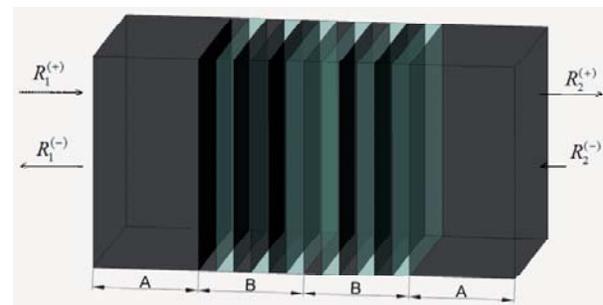


Fig. 4. Geometría con secuencia Thue-Morse.

MODELO NUMÉRICO

La geometría propuesta para analizar la transmitancia de las diferentes estructuras propuestas se ilustra en la figura 5, donde A es la longitud de guía de onda con índice de refracción homogéneo y B es la longitud de la guía de onda

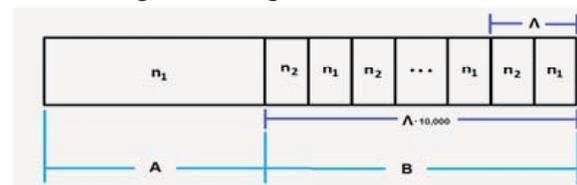


Fig. 5. Geometría del modelo numérico en la guía de onda.

Los parámetros que se involucran en el estudio y análisis de la transmisión y reflexión de luz que se describe en este trabajo se presentan en la siguiente tabla.

Los parámetros que se involucran en el estudio y análisis de la transmisión y reflexión de luz que se describe en este trabajo se presentan en la siguiente tabla.

Tabla I. Parámetros, descripción y valor de las variables utilizadas en los cálculos numéricos.

Parámetro	Descripción	Valor
n_1	Índice de refracción del medio A.	1.5
Δn	Cambio inducido al índice de refracción	1.5E-4
$n_2 = \Delta n + n_1$	Índice de refracción del medio B.	1.50015
Λ	Período de Bragg.	500nm
A	Longitud del medio A.	10mm
B	Longitud del medio B.	5mm

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Secuencias periódicas

En la figura 6 incisos a), c) y e), se presentan las curvas de reflectancia de luz a través de una estructura con secuencia periódica, mientras que a y b muestran el espectro de reflectancia y transmitancia para NN=1, c y d para NN=5 y por ultima, e y f para NN=8. Se observa que la región de máxima reflectancia se encuentra localizada en todos los casos en 1500.075 nm, conforme aumenta el número de capas (NN) aumenta el número de frecuencias que son filtradas (líneas delgadas) y aumenta el ancho espectral de reflectancia y transmitancia. Cada una de la forma de los espectros, tal como ancho espectral, pico espectral y ancho de línea espectral es posible controlar mediante los parámetros que se presentan en la tabla I. En este tipo de arreglo es importante notar que las líneas de ancho espectral permanecen periódicas.

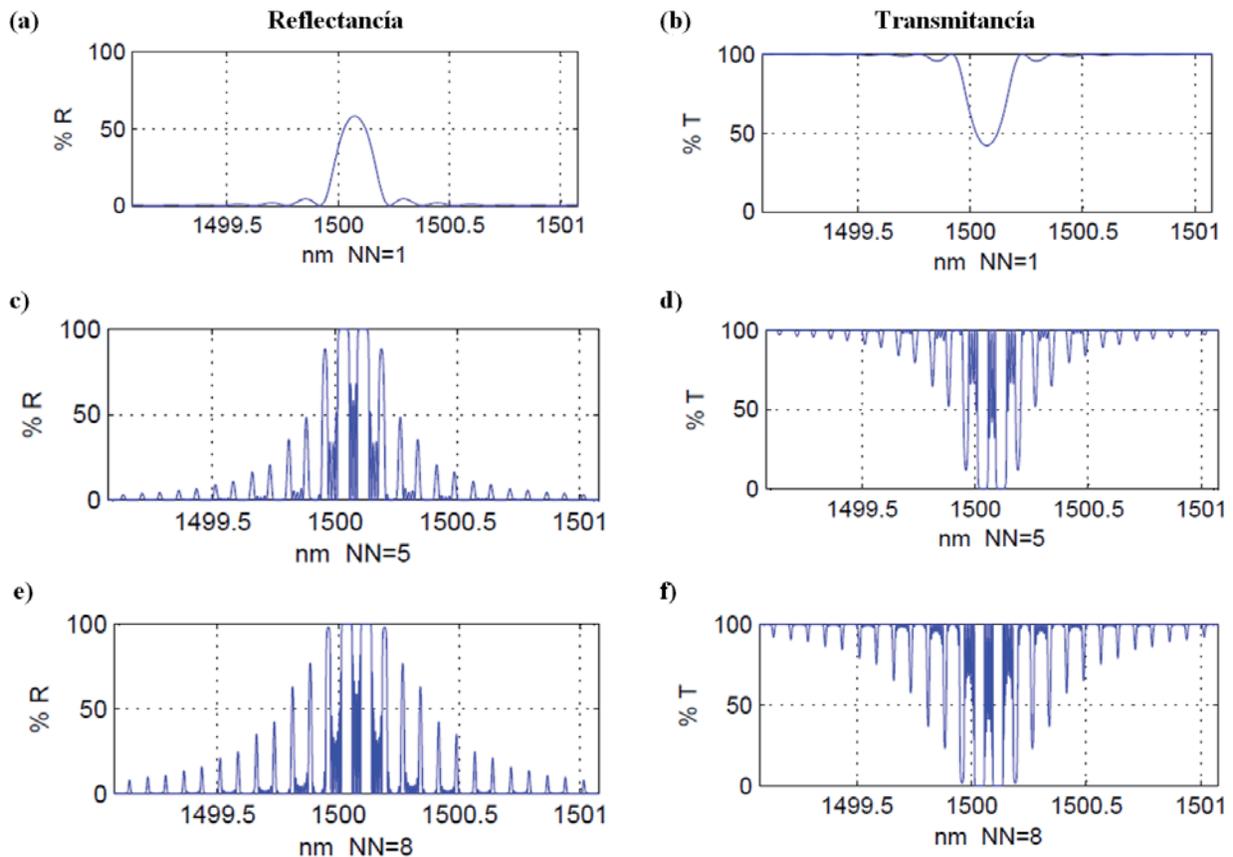


Fig. 6. Gráfica que muestra las curvas de reflexión y transmisión con estructuras periódicas intrínsecas a la guía de onda, se ilustra con NN=1, 5 y 8.

Realizar cálculos numéricos de secuencias periódicas, además de caracterizar el sistema permite identificar las características del sistema con parámetros similares.

Secuencias Cuasi-periódicas

En la figura 7 se presentan una tabla con curvas de reflexión de luz a través de diversas estructuras cuasi periódicas, en la columna (a) se ilustran las diferentes geometrías que numéricamente fueron inducidas en el núcleo de las guías de onda, en la columna (b) se muestran los espectros de reflexión para 2 capas ($NN=2$), en la columna (c) 5 capas y en la (d) $NN=8$. En la fila 1 se observa las curvas al inducir la estructura periódica, en la 2 los espectros de reflexión para estructuras con secuencia Thue-Morse y en la fila 3, los espectros de reflexión de secuencias fibonacci.

Discusión de resultados

En la secuencia periódica, el espectro de reflexión coincide con los ya reportados en la literatura para $NN=2$, esta secuencia se realizó numéricamente como una forma de calibración del modelo numérico, en la figura 7, fila 1 se observa que a medida que aumenta el número de capas las líneas espectrales se vuelven más delgadas y aparecen líneas en donde no existían a lo largo del espectro de reflexión.

En la secuencia Thue-Morse, el espectro de reflexión para $NN=2m$ se observa muy localizado y con lóbulos laterales en 1500.075nm, a medida que aumenta el número de capas los lóbulos empiezan a crecer y líneas muy delgadas empiezan a formarse, para $NN=8$ las líneas espectrales de reflexión son muy delgadas.

En la secuencia Fibonacci, se observa que a medida que aumenta el número de capas el espectro de reflexión aumenta en magnitud y las líneas espectrales que aparecen son significativamente más estrechas lo que permite aumentar la sensibilidad o selectividad del sistema óptico, aún más que con la estructura Thue-Morse.

CONCLUSIONES

En este trabajo se ha demostrado que los sistemas con estructuras ordenada tipo Fibonacci y Thue-

Morse tienen importantes propiedades físicas. Sus espectros de transmisión son caracterizados por la forma, tamaño y ancho de las líneas de reflexión. Los espectros de reflexión presentan una gran cantidad de líneas localizadas cuya existencia se debe a la cuasi-periodicidad de las estructuras inducidas en el núcleo de la guía de onda. Todos los sistemas fotónicos presentados en este trabajo pueden ser controlados mediante la variación de los parámetros presentados en la tabla I. Para cada sistema óptico se tiene una posición y ancho del máximo espectro de emisión.

En cada uno de las estructuras propuestas se tienen una diversa gama de aplicaciones que pudieran ser cubiertas, cambiando los parámetros de propagación, tales como: índice de refracción de la guía de onda, ancho de la guía de onda, longitud entre parte homogénea y no homogénea, número de capas y tipo de geometría, lo que resulta una ayuda para identificar los requerimientos necesarios para tener el espectro de reflexión necesario.

Los resultados pueden ser aplicables a sistemas de comunicaciones ópticas, filtros, láseres, compensadores de dispersión, sensores, moduladores, multiplexores, acopladores, moduladores y a la implementación de láseres con ancho espectral deseado, que van desde la aplicación industrial, científica y médica que en últimos años han sido grandemente explotados.

El estudio de estas estructuras en la propagación de datos, puede ser de enorme ayuda para la implementación de compuertas lógicas completamente ópticas.

REFERENCIAS

1. Schultze, M., Controlling dielectrics with the electric field of light *Nature* 493,75-78, (2013).
2. Blanco-Redondo, A., Coupling mid-infrared light from a photonic crystal waveguide to metallic transmission lines, *Appl. Phys. Lett.*, 104,011105 (2014).
3. Ning Yang, Optical fiber temperature sensor based on optical fiber delay *Proc. SPIE, Fourth Asia Pacific Sensor Conference* (2013).
4. R. Pelster, V. Gasparian and G. Nimtz, Propagation of plane waves and of waveguide modes in quasiperiodic dielectric heterostructures, *Physical*

- Review E, 55(6), 7645-7656, (1997).
5. Hecht and Zajac, *Fundamental of photonics*; (1974).
 6. A. S. Besicovitch, *Almost periodic functions* Dover Publications, (1954)
 7. Raman Kashyap, *Fiber Bragg Gratings*, Academic Press, (1999).
 8. Hill, K.O., Meltz, G., *Fiber Bragg Grating Technology Fundamentals and Overview*, *Journal of lightwave technology*, 15(8), (1997)



XXXVIII SEMANA NACIONAL DE ENERGÍA SOLAR

XI CONGRESO IBEROAMERICANO

Centro de Convenciones de Querétaro
6-10 DE OCTUBRE www.snes38anes.org

2014

CURSOS

- SISTEMAS FOTOVOLTAICOS INTERCONECTADOS A RED
- CALENTAMIENTO SOLAR DE AGUA
- CELDAS DE COMBUSTIBLE
- MEDICIÓN DE RECURSO SOLAR (SOLARIMETRÍA)
- DISEÑO DE BIODIGESTORES
- SISTEMA DE GESTIÓN DE ENERGÍA BASADO EN ISO 50001:2011
- ARQUITECTURA BIOLIMÁTICA
- SISTEMAS HÍBRIDOS PARA APLICACIONES A AISLADOS

PONENCIAS

- ARQUITECTURA SOSTENIBLE
- TECNOLOGÍAS Y SISTEMAS TÉRMICOS SOLARES
- TECNOLOGÍA Y SISTEMAS FOTOVOLTAICOS
- RECURSO SOLAR
- ENSEÑANZA DE LAS ENERGÍAS RENOVABLES
- LA ENERGÍA SOLAR EN EL CONTEXTO ENERGÉTICO GLOBAL



- CONFERENCIAS
- CONCURSOS
- EXPO INDUSTRIAL