

Revisión y análisis experimental de modos LP_{nm} en fibras ópticas

H.H. Cerecedo-Núñez, A. Sánchez-Martínez y P. Padilla-Sosa
*Facultad de Física e Inteligencia Artificial, Universidad Veracruzana,
 Apartado Postal 270, Xalapa, Ver. México.*

G. Rodríguez-Zurita
*Facultad de Ciencias Físico-Matemáticas, Benemérita Universidad Autónoma de Puebla,
 Puebla, Pue. México.*

Recibido el 25 de marzo de 2008; aceptado el 7 de enero de 2009

En este trabajo se presenta un estudio experimental de los modos linealmente polarizados (del tipo LP_{nm}) en fibras ópticas monomodo y multimodo convencionales. Estos modos se obtienen realizando un ajuste mecánico en un arreglo experimental convencional. Además, se realiza una descripción general de la teoría que origina estos modos y se muestran simulaciones de los mismos. El enfoque de este trabajo es principalmente académico, sin embargo, la revisión teórica y el análisis experimental que se realizan son básicos para el desarrollo de investigaciones en el área.

Descriptor: Fibra óptica; modos transversales; fibra monomodo; fibra multimodo.

This work shows an experimental study to obtain lineal polarized modes in standard optical fibers (LP_{nm} modes). Such modes are getting in a simple set-up, by a mechanical adjustment. In addition, we review the general theory and it is showed computational simulations of such modes. The focus of this work is mainly academic, but at the same time it can be considered basic to start in the fiber optic area.

Keywords: Optical fibers; transversal modes; monomode fiber; multimode fiber.

PACS: 42.81.-i; 42.81.Dp; 42.81.Qb

1. Introducción

En la literatura existen pocos trabajos en donde se mencione un análisis detallado teórico-experimental de los modos transversales en fibra óptica (LP_{nm}) [1-4]. Lo anterior es una de las razones de este artículo. Algunos de los objetivos de este trabajo son: revisar la teoría general de los modos transversales en fibra óptica, comprender las diferencias entre los distintos tipos de modos existentes. Otros objetivos son describir el procedimiento para simular computacionalmente y reproducir experimentalmente los modos LP_{nm} , mostrando las diferencias y similitudes de dichos modos en diferentes fibras.

Una fibra óptica es un filamento de vidrio flexible, es decir, un pequeño hilo cilíndrico de vidrio que consta de núcleo, revestimiento y recubrimiento. En la Fig. 1a se muestra la parte central, el núcleo, parte interna de la fibra a través de la cual se guía la luz. Este núcleo está hecho de sílice o de cuarzo fundido dopado con otro material (por ejemplo, GeO_2 o P_2O_5), su diámetro se encuentra en el rango de micras [5]. El revestimiento generalmente está hecho de sílice puro, la diferencia entre el índice de refracción del núcleo y revestimiento es del orden de $\Delta \sim 0.01$. Existe una capa más que envuelve a la fibra, el recubrimiento, el cual está hecho con algún polímero. La función del recubrimiento es proporcionarle rigidez a la estructura núcleo-revestimiento.

Los núcleos de las fibras ópticas pueden tener distinta distribución del índice de refracción. Por ejemplo, una fibra de índice abrupto cuenta con un índice constante, en ella la luz se guía puramente por reflexión interna total. En el caso de fi-

bras ópticas con perfil de índice gradual la luz se desvía suave y continuamente hacia el eje de la fibra, (ver Fig. 1b).

La energía confinada al interior de la fibra óptica se describe en términos de un conjunto de ondas electromagnéticas denominados modos atrapados de la guía de onda. Cada modo atrapado es un patrón de líneas de campo eléctrico (E) y magnético (H) que se repiten a lo largo de la fibra en intervalos iguales de longitud de onda. Sin embargo, sólo un cierto número discreto de modos pueden propagarse por la fibra.

Dependiendo del número de modos que se propaguen en una fibra, éstas se pueden clasificar como monomodo o multimodo. La fibra monomodo se diseña para que se propague un solo modo. En una fibra multimodo se propagan varios modos. Sin embargo, una fibra monomodo diseñada para operar a 1550 nm puede comportarse como una fibra multimodo si en ella se propaga radiación a una longitud de onda por debajo de la que fue diseñada. Este hecho es importante mencionarlo, pues será un factor a considerar en el desarrollo de este trabajo.

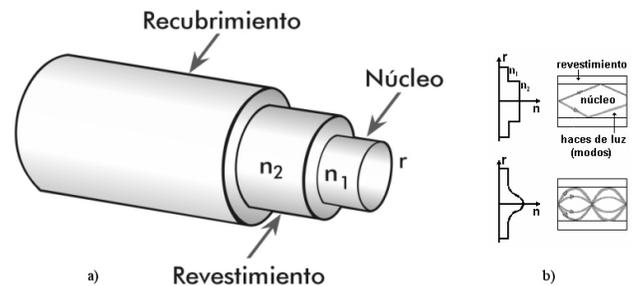


FIGURA 1. a) Conformación básica de una fibra óptica. b) Esquema de fibra con índice escalonado e índice gradual.

TABLA I. Soluciones de las ecuaciones de onda (1) y (2). A, B, C y D son constantes arbitrarias, β es la componente en z del vector de propagación y es determinada por las condiciones a la frontera de los campos electromagnético en la interfase del núcleo y del revestimiento.

Región de la fibra óptica	Para $r < a$	Para $r > a$
Campo eléctrico	$E_z(r < a) = AJ_\nu(ur)e^{j\nu\phi}e^{j(\omega t - \beta z)}$	$E_z(r > a) = Ck_\nu(wr)e^{j\nu\phi}e^{j(\omega t - \beta z)}$
Intensidad magnética	$H_z(r < a) = BJ_\nu(ur)e^{j\nu\phi}e^{j(\omega t - \beta z)}$	$H_z(r > a) = Dk_\nu(wr)e^{j\nu\phi}e^{j(\omega t - \beta z)}$
	$u^2 = k_1^2 - \beta^2$	$w^2 = \beta^2 - k_2^2$
Magnitud del vector de propagación	$k_1 = \frac{2\pi n_1}{\lambda}$	$k_2 = \frac{2\pi n_2}{\lambda}$

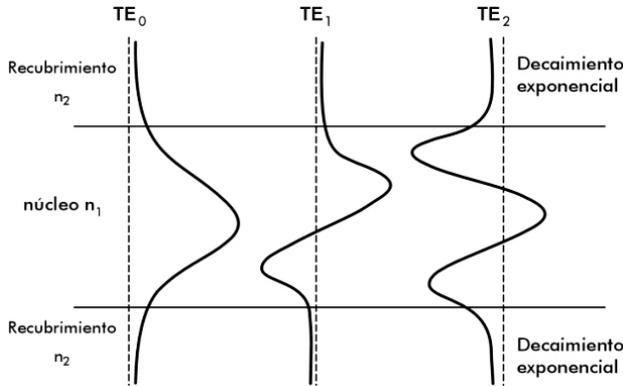


FIGURA 2. Diagrama de distribuciones transversales de campo eléctrico dentro de una fibra óptica [5].

En la siguiente sección se explica el origen de los modos linealmente polarizados, junto con simulaciones computacionales de los mismos. Posteriormente se muestra la obtención experimental de dichos modos.

2. Modos en fibras con índice constante

Los modos transversales que se propagan en el interior de la fibra óptica se conocen como modos confinados o ligados, para comprender este concepto, considérese un corte a lo largo del eje de la fibra como se indica la Fig. 2. En ella podemos observar tres patrones diferentes del campo eléctrico, estos patrones son soluciones de las ecuaciones de Maxwell para una guía de onda cilíndrica. La Fig. 2 nos muestra el orden de los modos, el cual representa el número de ceros cortando al eje imaginario (líneas segmentadas). A su vez, el orden de los modos está relacionado con el ángulo de incidencia del haz y el eje de la fibra óptica. Este orden indica que a un mayor ángulo de incidencia con el eje de la fibra más alto es el orden del modo.

Se puede observar que la distribución de radiación electromagnética que conforma los modos no se confinan completamente en el núcleo (no existen ceros en la interfase), sino que se extiende hacia el revestimiento, decayendo de manera exponencial y dentro del núcleo varían armónicamente.

Al solucionar las ecuaciones de Maxwell para una guía de onda cilíndrica se obtiene un número finito de modos guiados y un número infinito de modos que no están confinados ni guiados en el núcleo. Esos modos no confinados en el núcleo

son producto de que cierta radiación incidente en la fibra se encuentra fuera del cono de aceptación y por ello es refractada fuera del núcleo. Estos modos son conocidos como *modos del revestimiento* o *modos refractados*.

Debido a que una fibra óptica estándar de comunicaciones cuenta con radios de núcleo y de revestimientos pequeños y finitos, no sólo los modos del núcleo se propagan, sino que también los del revestimiento. Esto a la vez provoca un acoplamiento entre alguno de esos modos; en la práctica se busca atenuarlos después de una corta distancia de propagación.

Existe otro tipo de modo, llamados *modos de fuga* (*leaky modes*). Estos modos son parcialmente confinados en el núcleo de la fibra y se atenúan a cortas distancias debido a las pérdidas de radiación hacia afuera del núcleo. Dicha radiación perdida se debe al efecto túnel.

En resumen, la propagación de la radiación y de los modos que se confinan al interior del núcleo de la fibra se centra en conocer los valores que tomará la componente del vector de propagación β ; tomando en cuenta las condiciones a la frontera en la solución de las ecuaciones de Maxwell.

Las expresiones matemáticas para la descripción completa de los modos guiados y de radiación son muy complejas, ya que se involucran seis componentes híbridas de los campos electromagnéticos. Sin embargo, existen simplificaciones basadas en el índice de refracción de las fibras. Por ejemplo, cuando la diferencia entre los índices de refracción del núcleo y del revestimiento es muy pequeña ($n_1 - n_2 \ll 1$), sólo se requiere tomar en cuenta cuatro componentes del campo electromagnético [5-7].

Si consideramos que la fibra es un medio lineal, isótropo, sin corrientes, ni cargas libres, se puede obtener la ecuación de onda E y H para una guía de onda cilíndrica [5-7]:

$$\frac{\partial^2 E_z}{\partial r^2} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 E_z}{\partial \phi^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial E_z}{\partial r} + q^2 E_z = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial^2 H_z}{\partial r^2} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 H_z}{\partial \phi^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial H_z}{\partial r} + q^2 H_z = 0 \quad (2)$$

En donde $q^2 = \omega^2 \epsilon \mu - \beta^2 = k^2 - \beta^2$, ω es la frecuencia angular de la onda, k es la magnitud del vector de propagación y β es la componente en z del vector de propagación en el vacío.

Es importante observar que estas ecuaciones contienen sólo las componentes E_z y H_z . Es evidente que las componentes longitudinales de E y H se encuentran desacopladas y que pueden escogerse arbitrariamente. En general, el acoplamiento de E_z y H_z resulta por la condición a la frontera de las componentes del campo electromagnético. Si las condiciones a la frontera no permiten el acoplamiento entre las componentes del campo, la solución de los modos puede obtenerse tanto para $E_z = 0$ como para $H_z = 0$. Cuando $E_z = 0$ los modos se denominan *transversales eléctricos* (TE) y cuando $H_z = 0$ los modos se denominan *transversales magnéticos* (TM). Cuando los valores de E_z o H_z son distintos de cero, se denominan modos *híbridos* y se designan como HE o EH. La designación dependerá si E_z o H_z , respectivamente, tienen una mayor contribución transversal que la otra.

Las soluciones de las Ecs. (1) y (2) se obtienen utilizando el método de separación de variables [5-8] y su solución está asociada con las funciones de Bessel. Los campos resultantes se muestran en la Tabla I. Después de realizar un análisis de los límites y tendencias de estas soluciones se puede concluir que el rango permitido de β para una condición de confinamiento es

$$n_2 k = k_2 \leq \beta \leq k_1 = n_1 k, \quad (3)$$

donde nuevamente la constante de propagación en el vacío es $k = 2\pi/\lambda g$.

La solución para β se debe determinar con las condiciones en la frontera de los campos indicados en la Tabla I. De

ello resulta una ecuación de eigenvalores para β

$$(J_\nu + K_\nu) (k_1^2 J_\nu + k_2^2 K_\nu) = \left(\frac{\beta \nu}{a}\right)^2 \left(\frac{1}{u^2} + \frac{1}{w^2}\right)^2, \quad (4)$$

donde J_ν y K_ν están dados por

$$J_\nu = \frac{1}{u} \frac{J'_\nu(ua)}{J_\nu(ua)}, \quad K_\nu = \frac{1}{w} \frac{K'_\nu(wa)}{K_\nu(wa)}.$$

Al resolver la Ec. (4) para β se encuentra que sólo valores restringidos por la Ec. (3) serán permitidos. Esta ecuación es trascendental y generalmente se resuelve por métodos numéricos, la solución para cualquier modo particular proveerá todas sus características.

Para considerar los modos que se propagan dentro de una fibra óptica de índice escalón se considerará las raíces de la función Bessel, las cuales se pueden asignar como $\beta_{\nu m}$. Los modos correspondientes son cualesquiera $TE_{\nu m}$, $TM_{\nu m}$, $EH_{\nu m}$, o $HE_{\nu m}$. En general, en una fibra óptica los modos son híbridos, excepto cuando $\nu=0$.

Cuando $\nu=0$, la Ec. (4) se reduce a dos ecuaciones de eigenvalores diferentes que corresponderán a los modos TE_{wm} cuando la componente $E_z=0$, y la otra que corresponde a los modos TM_{0m} cuando $H_z=0$. (Ver Tabla II). Cuando $\nu \neq 0$, la situación resulta ser más compleja y entonces la Ec. (4) se debe resolver por métodos numéricos. Sin embargo, la Ec. (4) puede simplificarse aun más si se consideran modos débilmente guiados ($\Delta g \ n_1-n_2 \ll 1$), y en donde $k_1^2 \cong k_2^2 \cong \beta^2$. Esta simplificación se muestra en la Tabla II.

TABLA II. Simplificaciones de ecuaciones para la obtención de los modos de una fibra óptica con índice constante.

Orden ν	Simplificaciones de la ecuación (4)	Simplificaciones en términos de las funciones $J_\nu(x)$ y $K_\nu(x)$	Modos que describen
$\nu = 0$	$J_0 + K_0 = 0$	$\frac{J_1(ua)}{u J_0(ua)} + \frac{K_1(wa)}{w K_0(wa)} = 0$	TE_{wm} (5)
	$k_1^2 J_0 + k_2^2 K_0 = 0$	$\frac{k_1^2 J_1(ua)}{u J_0(ua)} + \frac{k_2^2 K_1(wa)}{w K_0(wa)} = 0$	TM_{wm} (6)
$\nu \neq 0, \text{ con } \Delta \ll 1$	$J_\nu + K_\nu = +\frac{\nu}{a} \left(\frac{1}{u^2} + \frac{1}{w^2}\right)$	$\frac{J_{\nu+1}(ua)}{u J_\nu(ua)} + \frac{k_{\nu+1}(wa)}{w k_\nu(wa)} = 0$	$EH_{\nu m}$ (7)
	$J_\nu + K_\nu = -\frac{\nu}{a} \left(\frac{1}{u^2} + \frac{1}{w^2}\right)$	$\frac{J_{\nu-1}(ua)}{u J_\nu(ua)} - \frac{k_{\nu-1}(wa)}{w k_\nu(wa)} = 0$	$HE_{\nu m}$ (8)

Finalmente, si se consideran las cuatro ecuaciones mostradas en la Tabla II, se puede lograr conjuntarlas en una sola:

$$\frac{u J_{n-1}(ua)}{J_n(ua)} = -\frac{w K_{n-1}(wa)}{K_n(wa)}, \quad (9)$$

En donde se realiza el cambio de parámetro n por

$$n = \begin{cases} 1 & \text{para Modos TE y TM} \\ \nu + 1 & \text{para Modos EH} \\ \nu - 1 & \text{para Modos HE} \end{cases},$$

Estas ecuaciones muestran que bajo la aproximación de guía débil, todos los modos caracterizados por el conjunto

de n y m satisfacen la misma ecuación característica. Esto significa que los modos son degenerados. Estos modos degenerados son denominados modos *linealmente polarizados*, LP_{nm} y en general se tiene que

1. Cada modo LP_{0m} se deriva de un modo HE_{1m} ;
2. Cada modo LP_{1m} se obtiene de los modos TE_{0m} , TM_{0m} y HE_{2m} ;
3. Cada modo LP_{nm} ($n \geq 2$) se obtiene de un modo $HE_{\nu+1,m}$ y $EH_{\nu-1,m}$.

TABLA III. Simulación de los Modos LPnm.

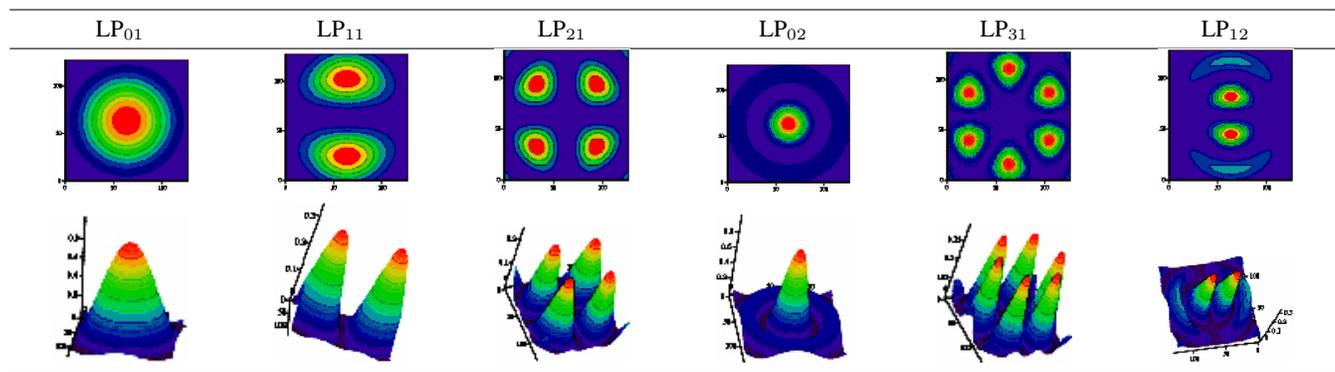
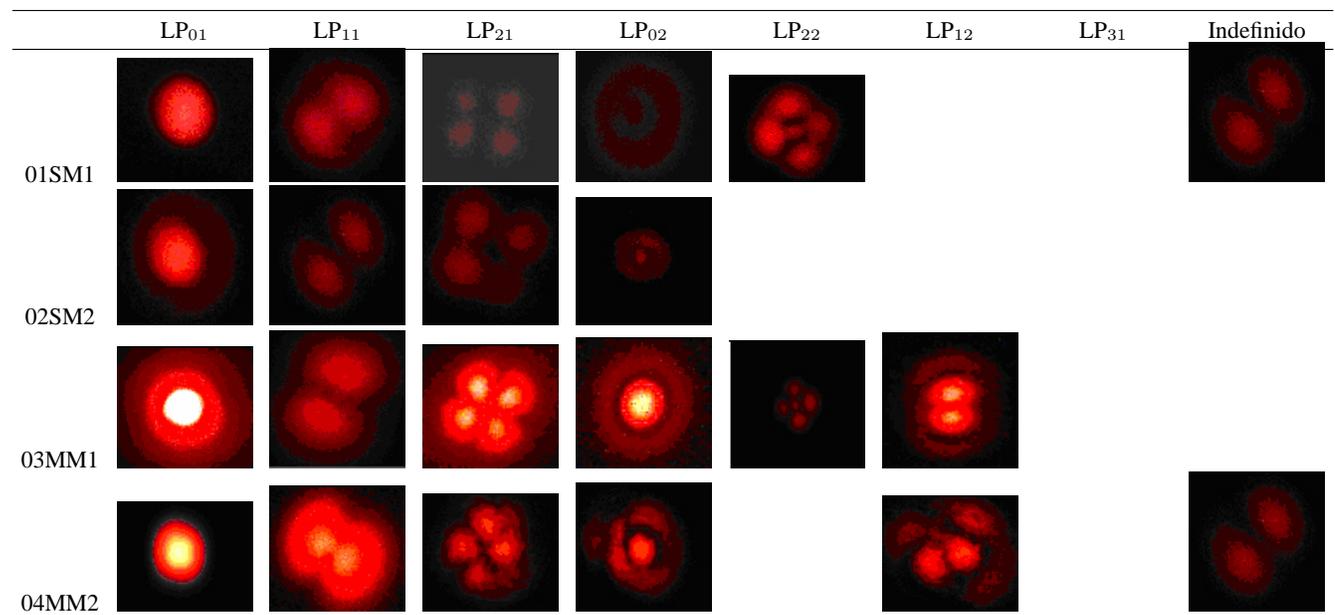


TABLA IV. Modos de propagación observados en fibras monomodo y multimodo.



Entonces, un modo LP es el resultado de una combinación de otros modos degenerados TE, TM, EH o HE [5-7].

Por otra parte, la distribución de intensidad de los modos LP_{nm} en el núcleo de una fibra óptica, con índice constante, puede expresarse como

$$I_{nm} = I_0 J_n^2 \left(\frac{ur}{a} \right) \sin^2(n\phi), \quad \text{para } r \leq a, \quad (10)$$

En donde I_0 representa el pico de intensidad máxima; r y ϕ son variables radiales y angulares transversales al núcleo de la fibra [8]. El parámetro u representa los mismos valores indicados en las ecuaciones de la Tabla I y n es el orden de la función Bessel. En esta misma ecuación, n representa la mitad del número de mínimos (o máximos) que ocurran en el patrón de intensidad (conforme ϕ varía a lo largo de 2π radianes); a su vez m indica el número de máximos en el patrón de intensidad que ocurren en una línea radial entre cero e infinito [5-7].

Los primeros seis modos simulados computacionalmente a partir de la Ec. (10) se muestran en la Tabla III. La distribución de la intensidad de los modos se obtiene con un valor unitario tanto del radio como la intensidad pico y los ejes tienen unidades arbitrarias.

3. Obtencion experimental de los modos LP_{NM}

La Fig. 3a, muestra el arreglo experimental utilizado para la obtención de los modos linealmente polarizados. Este esquema consiste de un diodo láser, objetivos de microscopio y fibra óptica. El diodo láser cuenta con longitud de onda máxima en 639.5 nm y ancho medio de 3 nm con potencia de 5 mW. La radiación de este laser fue introducida con el apoyo de un objetivo de microscopio de 20X. Los modos se observaron en el extremo opuesto de la fibra, para ello se expandió la irradiancia de salida utilizando otro objetivo de microscopio similar, y se proyectó sobre una pantalla, ver Fig. 3b.

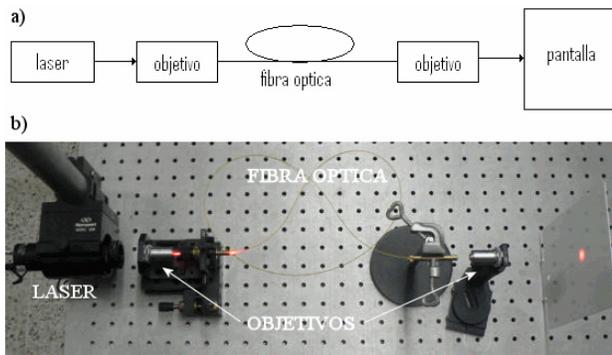


FIGURA 3. a) Diagrama del diseño experimental para observar modos en fibra óptica. b) Montaje experimental para la observación de modos.

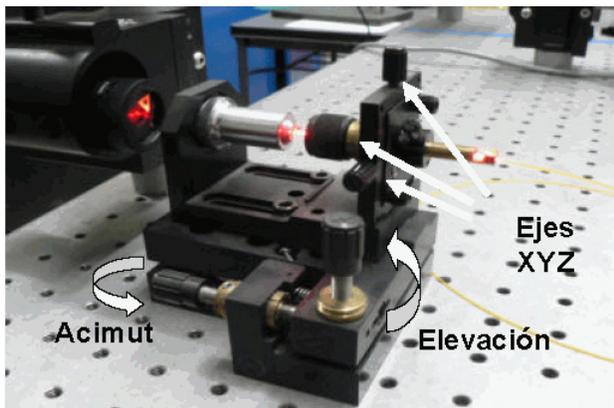


FIGURA 4. Detalle de la montura para la excitación de modos transversales en fibra óptica.

Se utilizaron cuatro fibras de distintos fabricantes, de aproximadamente 1m de longitud. Dos de esas fibras designadas como monomodo (SM_1 , SM_2) y las restantes multimodo (MM_1 , MM_2), con una longitud de corte de 1300 nm, 850/1300 nm respectivamente. Sin embargo, en el desarrollo del experimento se consideraron las cuatro fibras como multimodo, debido a que la longitud de onda de excitación es mucho menor que la longitud de onda de corte nominal.

La excitación de los modos se realiza de forma manual, utilizando una montura con desplazamientos XYZ, la cual permite variar el ángulo de incidencia de la luz dentro del núcleo al interior de la fibra, ver Fig. 4. Las imágenes se capturan para los diferentes modos LP_{nm} , estos modos se pueden observar en la Tabla IV. En esta tabla se observa el modo fundamental, LP_{01} , tanto en las fibras SM como en las MM junto con los modos LP_{11} , LP_{21} , LP_{02} . En algunos casos resultó complicada la obtención de los modos de orden alto, es por ello que algunas celdas de la Tabla IV aparecen vacías.

Algunas observaciones adicionales de los modos son las siguientes. En ocasiones, algunos modos parecían encontrar-

se superpuestos (uno encima de otro). En esos casos, es complicado separarlos. Los modos que presentaban este comportamiento fueron los modos LP_{21} , LP_{02} , LP_{22} , que como se observa, estos son de orden consecutivo. En la práctica, los modos más difíciles de obtener son los modos de orden más bajo (LP_{01} y LP_{11}), ya que para lograrlos es necesario que el haz del láser incida de manera perpendicular a la superficie de entrada de la fibra, logrando de esa forma que el haz viaje paralelo al eje de la fibra. Se puede apreciar también que la irradiancia contenida en los modos de una fibra multimodal es mayor, debido al tamaño del diámetro del núcleo.

Experimentalmente, se encontraron casos en los cuales no se lograba distinguir un modo de otro, prueba de ello se muestra en la última columna de la Tabla IV, en la cual, las fibras SM1 y MM2 muestran dos casos de indefinición. Esto último también podría interpretarse como una combinación de modos.

Las diferencias en la observación de los modos se deben a que cada una de las fibras utilizadas contaba con distintas especificaciones, respondiendo de manera diferente a la excitación de los modos. Otro factor de esa variedad es debido al ajuste mecánico en cada una de las fibras, lo cual no es fácil de controlar ya que requiere de una gran precisión al momento de ajustar o excitar un modo.

Los resultados experimentales nos indican que la obtención de estos modos es relativamente sencilla. Sin embargo, existe una alta sensibilidad a perturbaciones externas o ambientales (tales como vibración o corrientes de aire) que pueden afectar la estabilidad de los modos al momento de la observación.

4. Discusión y conclusiones

La fibra óptica es considerada como una tecnología de comunicaciones relativamente nueva. En la actualidad continúa motivando innovaciones, estudios y aplicaciones en diferentes áreas. El comportamiento (teórico-experimental) de la luz en fibras convencionales es fundamental e importante para la comprensión de fenómenos más complejos.

En este trabajo se realizó una revisión teórica de los distintos modos transversales en fibra óptica, analizándose especialmente modos linealmente polarizados (LP_{mn}). Se obtienen experimentalmente los modos linealmente polarizados y se comparan utilizando simulación computacional. El análisis experimental muestra que para fines didácticos y bajo las condiciones mencionadas, se obtienen un mayor número de modos cuando se emplea fibra óptica multimodo. Sin embargo, también existirá un límite para obtener un mayor número de órdenes en los modos, ya que las fibras empleadas fueron diseñadas para trabajar con el menor número de modos posibles.

1. Projects in Fiber Optics, *Applications Handbook*, (Newport Corporation 1999).
2. E. Pérez y Fierro, G. Beltrán-Pérez. *Suplemento del Bol. Soc. Mex. Fis.* (2005) 19.
3. A. Sánchez-Martínez, H.H. Cerecedo-Núñez, O. Ceballos-Sánchez, y J. Méndez-García. *Suplemento del Bol. Soc. Mex. Fis.* (2006) 20.
4. J. Manuel Vilardy, J. Antonio Salleg, J. Eliécer Calderón, y C. Torres Moreno. *Revista Colombiana de Física* **38** (2006) 1.
5. G. Keiser, “*Optical Fiber Communications*” (Mc.Graw-Hill Internacional Editions, Secon Edition, 1991).
6. Takanari Okoshi, “*Optical Fibers*” (Academic Press, 1982).
7. M.J. Adams, “*An Introduction to Optical Wave Guides*” (John Wiley and Sons, 1981).
8. J.A. Buck, “*Fundamentals of Optical Fibers*” (Wiley-Interscience Publication, 1995).