

Verificación del perfil de índice de refracción de una fibra óptica monomodo por el método de elementos finitos y la técnica de campo cercano

Ruth del Socorro Meneses, Sigifredo Solano G., Pedro Ignacio Torres T.

Escuela de Física

Universidad Nacional de Colombia Sede Medellín

Resumen

Utilizando el método de elementos finitos y la técnica de campo cercano se verificó el perfil de índice de refracción de una fibra óptica monomodo. Se muestran los resultados obtenidos con fibras comerciales de las utilizadas para comunicaciones en nuestro medio.

El método de prueba utilizado consiste, primero, en la simulación del perfil de índice de refracción de la fibra mediante un programa con elementos finitos que soluciona, con los parámetros comerciales de la fibra, la ecuación de Helmholtz para la obtención del perfil de intensidades del modo fundamental de propagación y, segundo, la captura mediante una cámara CCD de la distribución de intensidades del modo fundamental propagando a través de la fibra con la técnica de campo cercano. La comparación entre el resultado experimental y la simulación permite verificar el perfil de índice de refracción de las fibras utilizadas.

Abstract

Using the Finite Elements Method and Near-field technique was verified the refractive index profile of monomodo optic fiber. This article shows the results obtained with commercial fibers, used for communications in our environment.

Proof method used contains: First, in simulation the profile of fiber through finite elements program that solves with the commercial parameters of the optic fiber the Helmholtz equation for the intensity profile obtainig of the fundamental mode of propagation, and second, the capture through a CCD camera of fundamental mode intensity distribution propagating through the fiber with near-field technique. Comparison between experimental result and the simulation permits to verify the refractive index profile of the used fibers.

Palabras claves: Fibra óptica, índice de refracción, Campo cercano, elementos finitos

I. Introducción

El conocimiento del perfil de índice de refracción de una fibra óptica permite obtener las características de propagación en los sistemas ópticos de comunicación y en consecuencia algunos parámetros indispensables para comunicaciones por fibra óptica, como son: los diámetros del núcleo y el revestimiento, la atenuación y la respuesta de la banda base (Kopron, 1.984).

La caracterización geométrica de la fibra óptica está relacionada con la necesidad de evitar las pequeñas pérdidas que se presentan en el empalme de fibras diferentes. En las fibras monomodo, los parámetros relevantes son aquellos que tienen que ver con el campo modal: su diámetro, no circularidad y concentricidad (von der Weid, 1988).

Muchas de las técnicas experimentales utilizadas para la obtención del perfil de fibra óptica suelen ser bastante costosas (Gisin, *et.al.* , 1993; Miller y Chenwedth, 1979). Caccavale (1998) ha utilizado la técnica de campo cercano y el método de diferencias finitas para reconstruir el perfil de índice de refracción de guías de onda planas, mostrando que es posible disminuir apreciablemente los costos. Siguiendo este derrotero proponemos aquí el método de elementos finitos para la obtención del perfil de índices de refracción y su aplicación a fibras para comunicaciones. El principio de medición utiliza el hecho de que la cantidad de luz que emerge de un punto del núcleo de la fibra es proporcional a la diferencia del valor del índice de refracción entre este punto y el revestimiento. Por esto, una cámara CCD permite detectar punto a punto la intensidad del patrón de intensidad de campo cercano. Para aplicar este método se requiere un acoplamiento cuidadoso de la luz a la fibra para evitar la propagación de modos por el revestimiento durante la medición.

El patrón transversal de una señal que se propaga en una fibra óptica con el modo fundamental es circularmente simétrico y de forma gaussiana (von der Weid, 1988). De la distribución de intensidad del modo fundamental se puede obtener el valor del campo eléctrico. El interés por el modo fundamental se debe a que es el más sencillo de verificar experimentalmente. Para solucionar la ecuación de Helmholtz se utilizó el método de los elementos finitos mediante la discretización del frente de onda del haz luminoso, alimentando un programa de simulación con los datos de la hoja de características de las fibras ópticas utilizadas principalmente en comunicaciones por las compañías instaladoras de nuestro medio.

II Teoría

La propagación de la luz por una fibra óptica se obtiene con las ecuaciones de Maxwell teniendo en cuenta que los modos de transmisión en comunicaciones deben ser linealmente polarizados o débilmente guiados. Esto se logra haciendo que los índices de refracción del núcleo y del recubrimiento sean ligeramente diferentes, en este caso se puede aplicar la relación aproximada (Gloge, 1971):

$$\Delta = \frac{(n_{co} - n_{cl})}{n_{eff}} \ll 1 \quad (1)$$

con n_{eff} el índice de refracción efectivo y n_{co} y n_{cl} son los índices de refracción del núcleo y del recubrimiento respectivamente. Con esta aproximación se llega a la ecuación de onda escalar de Helmholtz:

$$(\nabla^2 + k_0^2 n^2(x, y) - \beta^2) \Psi(x, y) = 0 \quad (2)$$

Donde x e y son las coordenadas de la sección transversal de la fibra; $\Psi(x, y)$ representa el campo eléctrico o magnético; $k_0 = 2\pi/\lambda$; $\beta = k_0 n_{\text{eff}}$ y $n(x, y)$ es el perfil de índices de refracción de la fibra.

La forma variacional de la ecuación de Helmholtz puede escribirse como integrales de línea para los modos TE, E^x y TM, E^y . Una vez transformada a integrales de superficie para cada modo, se pueden obtener las funcionales como la suma de las contribuciones de muchas regiones homogéneas de tal manera que $\psi(x, y)$ minimiza la funcional (Torres y Guzmán, 1994).

Así, para un perfil de índices, los parámetros geométricos de la fibra y la longitud de onda utilizada la solución numérica de la ecuación de onda permite determinar sus raíces y sus vectores propios. El método de elementos finitos discretiza el núcleo y el revestimiento en elementos triangulares y le asigna a cada centro geométrico de la retícula triangular su respectivo índice de refracción característico y genera de allí los valores de campo. El orden del método depende del número de nodos contenidos en cada elemento. La función de interpolación y las funcionales pueden expresarse como matrices llegando a un problema matricial generalizado de valores propios (Torres, 1994):

$$[A]\{\psi\} = \beta^2 [B]\{\psi\} \quad (3a)$$

Para los modos TE y E^x y

$$[A]\{\psi\} = k_0^2 [B]\{\psi\} \quad (3b)$$

Para los modos TM y E^y

La simetría de la sección circular de la fibra nos permite comparar el campo radial obtenido de la simulación con el hallado experimentalmente mediante la relación:

$$E_r = \sqrt{I} \quad (4)$$

Siendo I el perfil de distribución de intensidades y E_r el campo radial. El diagrama de flujo de la figura 1 indica los pasos principales del algoritmo para programa de simulación y para la obtención del campo a partir de la intensidad o viceversa.

Utilizando el programa de simulación por el método de elementos finitos se obtiene primero los vectores propios del modo fundamental con los parámetros de la fibra comercial y la longitud de onda del láser utilizado; y se comparan con el campo eléctrico obtenido experimentalmente, mostrando la diferencia mediante la función:

$$\varepsilon(x, y) = \sum_i \left| \frac{E_m(x_i, y_i) - E_c(x_i, y_i)}{E_c(x_i, y_i)} \right| \Delta x_i \Delta y_i \quad (5)$$

E_m es el campo eléctrico medido y E_c el campo eléctrico obtenido en la simulación (ambos normalizados a su valor máximo).

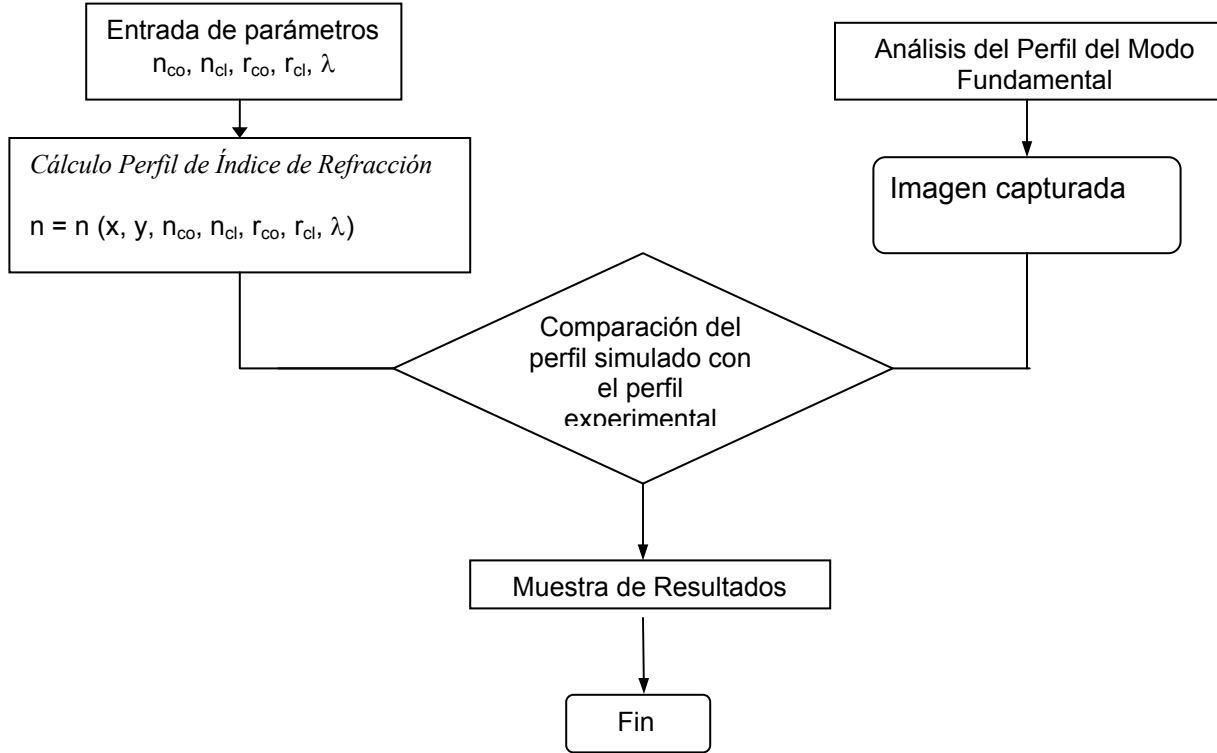


Figura 5. Diagrama de flujo del programa de comparación del perfil de índice de una fibra.

III. Montaje experimental

La técnica de campo cercano nos permite capturar en un extremo, mediante la cámara CCD, el patrón de intensidad que emerge de la fibra a la que se le ha introducido por el otro extremo un fino haz de luz. De la medida del perfil de intensidad de este modo se obtiene la intensidad del campo eléctrico de los diferentes modos que constituyen la señal. La forma más sencilla de hacer la comparación entre campo simulado y el experimental es utilizando la distribución de intensidades del modo fundamental. Un criterio para determinar el modo fundamental es su distribución gaussiana.

En la figura 2 se muestra el montaje experimental con la técnica de campo cercano transmitido. En el montaje se utilizó una fuente láser de He-Ne y se filtró el modo fundamental.

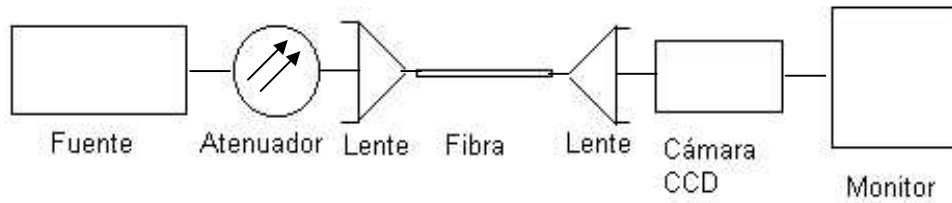


Figura 2. Montaje experimental para obtener el modo fundamental de una fibra óptica por el método de campo cercano

Debido que para la fibra monomodo a la longitud de onda del laser He-Ne es multimodo es importante eliminar de la señal los modos superiores que necesariamente deben propagarse en la fibra. Esto se logra primero, acoplando exactamente el haz del láser en la sección de la fibra finamente cortada para excitar el menor número posible de modos y segundo enrollando varios metros de fibra sobre un cilindro de pequeño diámetro para generar altas pérdidas por curvatura, principalmente la de los modos superiores que se propagan fuera del eje de la fibra hasta obtener el perfil gaussiano del modo fundamental.

El modo fundamental es capturado con la cámara CCD y la imagen es almacenada en archivo. La figura 3 muestra una imagen típica del modo capturado.

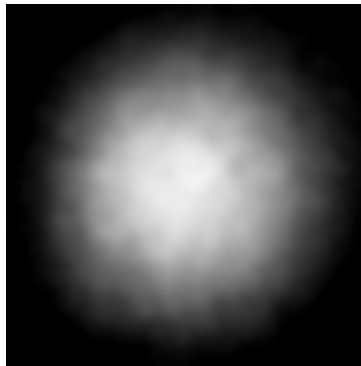


Figura 3. Imagen en niveles de gris del modo fundamental obtenido con el montaje de la figura 2.

Se realiza un preprocesamiento para eliminar el ruido y luego del mejoramiento se procesa y analiza mediante un programa de computador que importa la imagen almacenada en disco. El programa le permite al usuario realizar un barrido angular y con el índice de paso deseado; elegir el perfil, comparar con el perfil de intensidades obtenido de la simulación y presentar gráficamente los resultados de los perfiles y sus diferencias como se ve en la figura 4.

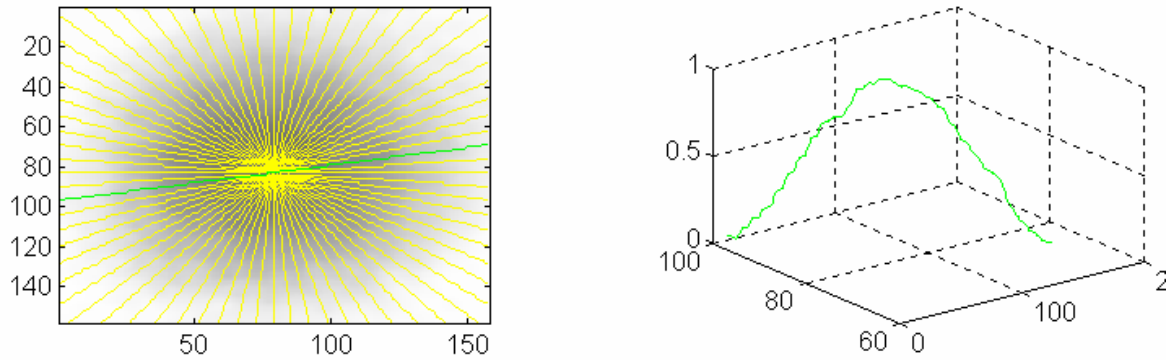


Figura 4 Perfil de intensidades en la dirección indicada del modo fundamental obtenido experimentalmente.

IV Resultados y conclusiones

En el programa de simulación al utilizar el método de elementos finitos, aprovecha la simetría del modo fundamental y sólo se requiere discretizar un cuadrante como la que se muestra en la figura 5 sin necesidad de la sección transversal completa. Esto permite disminuir el tiempo de cálculo y el uso de recursos del computador. Al programa se le entrega los radios del núcleo r_{co} y los valores máximo (n_1) y mínimo (n_2) del índice de refracción de la fibra dada por el fabricante y la longitud de onda del láser utilizado.

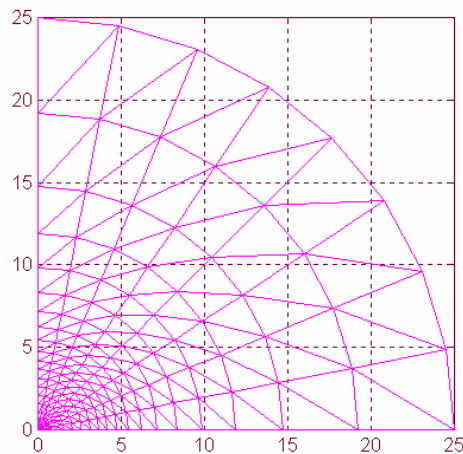


Figura 5. Elementos de discretización del frente de onda para el programa de simulación

La tabla 1 resume los datos de las fibras y los resultados obtenidos para tres tipos de fibra: Las utilizadas por las Empresas Públicas de Medellín y Unielectric Ltda y también con la fibra que produce la compañía Corning Co. En la figura 6 se muestra el resultado gráfico para la fibra óptica monomodo Corning donde se compara, mediante la ecuación de error (5), el perfil de intensidades del modo fundamental simulado con el obtenido experimentalmente.

Fibra utilizada por EE.PP.MM		Fibra utilizada por UNIELECTRIC Medellín	
$r_{CO} = 4.35 \mu m$	$\lambda = 0.6328 \mu m$	$r_{CO} = 4.15$	$\lambda = 0.6328 \mu m$
$n_1 = 1.4516$	$\beta = 14.4$	$n_1 = 1.4509$	$\beta = 14.397$
$n_2 = 1.4473$	$K_0 = 9.929$	$n_2 = 1.4456$	$K_0 = 9.928$
$n_1 - n_2 = 0.0043$	$V = 4.823$	$n_1 - n_2 = 0.0044$	$V = 4.651$
Fibra CORNING		NOTA.	
$r_{CO} = 4.15 \mu m$	$\lambda = 0.6328 \mu m$	Radio máximo para la simulación: $25 \mu m$	
$n_1 = 1.4681$	$\beta = 14.57$	V: Frecuencia normalizada	
$n_2 = 1.4675$	$K_0 = 9.929$		
$n_1 - n_2 = 0.0006$	$V = 1.729$		

Tabla 1. Fibras utilizadas en el montaje para la obtención del IR. Se muestran los parámetros comerciales y las constantes obtenidas con el programa de simulación.

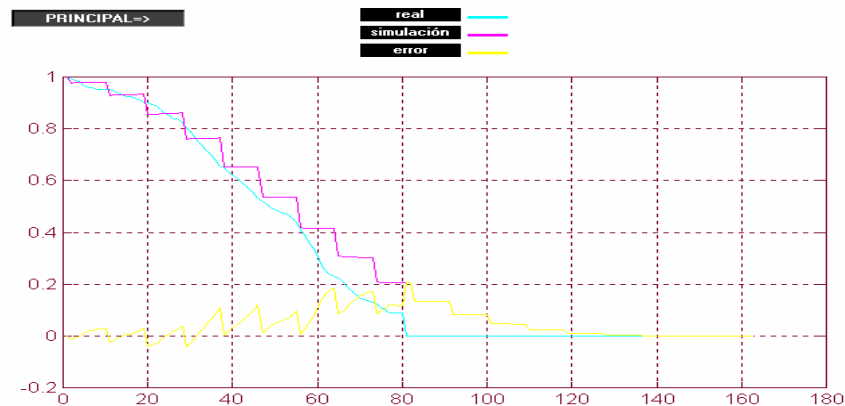


Figura 6 Comparación de los campos simulado y medido para la fibra Cornig

El número de elementos apropiados utilizados en la simulación se obtiene haciendo que el factor de confinamiento sea lo más alto posible. La obtención del perfil de índices se hace como se ilustra en el diagrama de flujo de la figura (1). El programa de simulación se ejecuta modificando cada vez el perfil hasta ajustar al perfil experimental. La gráfica 6 se obtuvo con el perfil de paso de la figura 7 que muestra sólo la mitad del perfil necesario para el primer cuadrante utilizado en la simulación. El eje de las abscisas muestra el número de puntos utilizados en la discretización tanto del núcleo como del revestimiento.

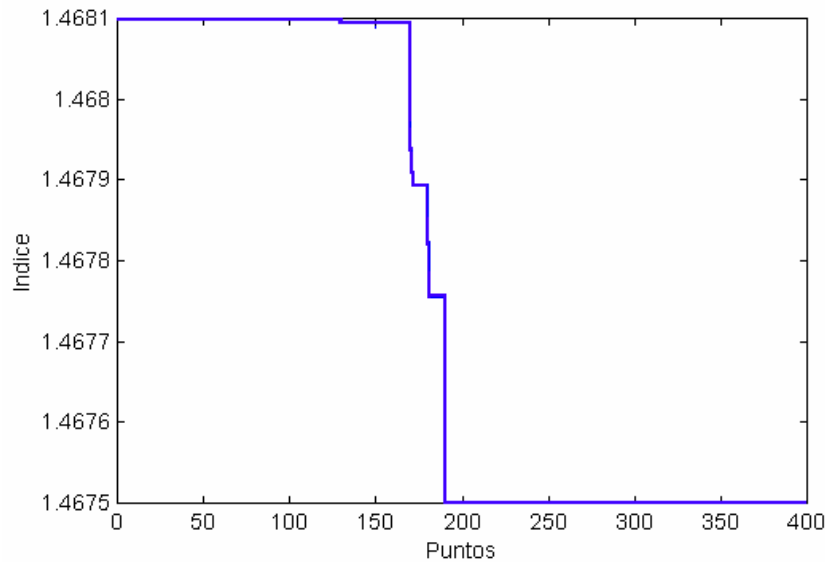


Figura 7. Perfil de índice utilizado para la obtención de la figura 6

Los resultados además de verificar que las fibras utilizadas son de perfil de paso, permite validar el hecho de que con elementos de bajo costo y que normalmente existen en cualquier laboratorio de óptica se puede alcanzar objetivos que por otras técnicas resultaría muy costoso. Para garantizar directamente que se obtiene el modo fundamental en fibras monomodo se debe utilizar longitudes de onda en el rango $1.3 - 15 \mu\text{m}$. En este último caso los problemas a resolver no son tan complicados como el filtrado de los modos. El método se puede aplicar a todo tipo de fibra y tiene una utilidad práctica en nuestro medio por su bajo costo.

Agradecimientos

Esta investigación se lleva a cabo con la ayuda del Comité de Investigación y Desarrollo científico (CINDEC #030802484) de la Universidad Nacional de Colombia. Sede Medellín.

Referencias

Caccavale F. “A Finite Differences Method for the reconstruction of refractive index profiles from Near-Field measurements”. *J.Lightwave Technol.*. Vol. 16. No. 7. July, 1998.

Gisin N., Passy R., Perny B. “Optical Fiber Characterization by Simultaneous Measurement of the Transmitted and Refracted Near Field”. *J. Lightwave Technol.* Vol 11 No 11. Nov. 1993

Gloge D. “Weakly Guiding Fibers” *App. Opt.* Vol. 10 No. 10 Oct, 1971.

Kopron F. P. “Critical review of fiber optical communication technology”. *Seventh in the SPIE Critical review of tecnology series*. Sandiego, California, 1984.

Miller S.E., Chenwedth A.G. “Optical Fiber Telecommunications”, *Academic Press, NY*, 1979

Torres P. “Análisis nodal de amplificadores opticos” M.Sc. Tesis Universidad Nacional de Colombia. Bogota, 1994.

Torres P., Guzman, A.. “Amplificador de Fibra Óptica dopada con Erblio. Análisis por elementos finitos”. *Memorias Cuarto Encuentro Nacional de Óptica*. Universidad Nacional de Colombia. 1994

von der Weid J.P. “Optical fiber characterization” *II curso Internacional sobre fibras ópticas*. Bogotá, Colombia, 1988.