



# POSGRADOS

## MAESTRÍA EN TELEMÁTICA

---

RPC-SO-01-NO.025-2021

OPCIÓN DE TITULACIÓN:

ARTÍCULOS PROFESIONALES DE ALTO NIVEL

TEMA:

DISEÑO DE UNA REJILLA NO  
UNIFORME DE BRAGG BASADA  
EN FIBRA ÓPTICA DE DOS  
MODOS PARA LA REDUCCIÓN  
DEL RETARDO MODAL

AUTOR(ES)

GABRIEL ELIAS PINTO GUTIERREZ

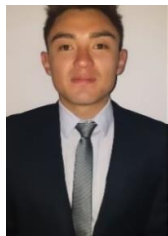
DIRECTOR:

MILTON NAPOLEÓN TIPÁN  
SIMBAÑA

QUITO – ECUADOR  
2022



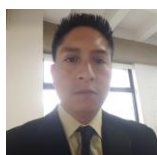
**Autor(es):**



**Gabriel Elias Pinto Gutiérrez**

Ingeniero Electrónico mención Telecomunicaciones  
Candidato a Magíster en Telemática por la Universidad Politécnica  
Salesiana – Sede Quito.  
gpintog@est.ups.edu.ec

**Dirigido por:**



Milton Napoleón Tipán Simbaña  
Ingeniero en Electrónica y Telecomunicaciones  
Magíster en Conectividad y Redes de Telecomunicaciones  
mtipans@ups.edu.ec

Todos los derechos reservados.

Queda prohibida, salvo excepción prevista en la Ley, cualquier forma de reproducción, distribución, comunicación pública y transformación de esta obra para fines comerciales, sin contar con autorización de los titulares de propiedad intelectual. La infracción de los derechos mencionados puede ser constitutiva de delito contra la propiedad intelectual. Se permite la libre difusión de este texto con fines académicos investigativos por cualquier medio, con la debida notificación a los autores.

DERECHOS RESERVADOS

2022 © Universidad Politécnica Salesiana.

QUITO– ECUADOR – SUDAMÉRICA

**Gabriel Elias Pinto Gutiérrez**

**DISEÑO DE UNA REJILLA INCLINADA DE BRAGG BASADA EN FIBRA ÓPTICA DE DOS  
MODOS PARA REDUCCIÓN DEL RETARDO MODAL**

## **DEDICATORIA**

Quiero expresar mi más grande gratitud a Dios, quien con su bendición me llena de paz y sabiduría en el camino de la vida, A mis padres Gabriel y Rocio quienes han sembrado esfuerzo, valentía, paciencia y me han permitido llegar a cumplir hoy un sueño más, junto a toda mi familia por estar siempre presentes.

De igual manera mis agradecimientos a la Universidad Politécnica Salesiana del Ecuador, a mis profesores en especial al MSc. Milton Tipan quien con la enseñanza y guía de sus valiosos conocimientos hicieron que pueda crecer día a día como profesional.

## **AGRADECIMIENTO**

A Dios, por las bendiciones derramadas tanto en nuestra vida cotidiana como en la vida universitaria y profesional.

A la Universidad Politécnica Salesiana y todos los docentes que han sido partícipes de la carrera Maestría en Telemática, protagonistas fundamentales del desarrollo y formación intelectual, impartiendo sus conocimientos y habilidades para convertirnos en seres de progreso y capaces de hacerle frente al campo laboral.

# TABLA DE CONTENIDO

---

Resumen .....	7
Abstract .....	8
1. Introducción .....	9
2. Determinación del Problema.....	11
3. Marco teórico referencial.....	13
3.1 Rejilla de Bragg de fibra no uniforme .....	13
3.2 Método de propagación de haz.....	17
4. Materiales y metodología.....	21
5. Resultados y discusión.....	22
6. Conclusiones.....	27
Referencias .....	28

# DISEÑO DE UNA REJILLA NO UNIFORME DE BRAGG BASADA EN FIBRA ÓPTICA DE DOS MODOS PARA LA REDUCCIÓN DEL RETARDO MODAL

AUTOR(ES):

GABRIEL ELIAS PINTO GUTIERREZ

## RESUMEN

La tasa de información en las redes de fibra óptica multimodo disminuye considerablemente su rendimiento por el retardo modal diferencial ya que limita el ancho de banda del cableado, la dispersión limita la velocidad y el efecto de dispersión aumenta con la longitud del enlace de la fibra óptica, varias técnicas ópticas han sido propuestas para resolver este problema. El presente artículo propone una rejilla de Bragg no uniforme sobre una fibra óptica de dos modos, está actúa como convertidor de modo LP11 al LP01, sus parámetros ópticos y físicos son optimizados logrando una rejilla de 18mm, índices de refracción del núcleo y revestimiento respectivamente son ( $n_{\text{núcleo}} = 1.4490$  y  $n_{\text{revestimiento}} = 1.4454$ ), el perfil de índice de refracción perturbado es ( $A = 0.005$ ), coeficiente de atenuación de la distribución del cambio de índice que depende del material del núcleo es ( $\alpha = 0.2\mu\text{m}^{-1}$ ), un índice de refracción de variación de amplitud de ( $\Delta n_{Ac}(z) = 0.8$ ) y un factor de Chirp,  $C \leq 10^{-5}\text{m}^{-1}$ .

**Palabras clave:**

MMF, FMF, FBG, Chirp.

## ABSTRACT

---

The information rate in multimode fiber optic networks decreases with great performance due to the differential modal delay since it limits the bandwidth of the cabling, the dispersion limits the speed and the dispersion effect increases with the length of the fiber optic link. , several optical techniques have been proposed to solve this problem. This article proposes a non-uniform Bragg grating on a two-mode optical fiber, it is acting as a mode converter from LP11 to LP01, its optical and physical parameters are optimized, achieving a 18mm grating, refractive indices of the core and cladding respectively are ( $n_{\text{core}} = 1.4490$  y  $n_{\text{cladding}} = 1.4454$ ), the perturbed refractive index profile is ( $A = 0.005$ ), attenuation coefficient of the index change distribution depending on the core material is ( $\alpha = 0.2\mu\text{m}^{-1}$ ), an amplitude variation refractive index of ( $\Delta n_{Ac}(z) = 0.8$ ) and a Chirp factor,  $C \leq 10^{-5}\text{m}^{-1}$

**Palabras clave:**

MMF, FMF, FBG, Chirp.



# 1. INTRODUCCIÓN

Las comunicaciones por fibra óptica monomodo (Single Mode Fiber, SMF) están llegando al límite de su capacidad, por lo que se buscan alternativas para aumentar cada vez más la tasa de transmisión de información a través de nuevas fibras ópticas o incrementar las actuales como las fibras ópticas multimodo (Multimode Fiber, MMF). La comunicación óptica coherente ha proporcionado las mejoras más recientes en lo referente a la capacidad, consiguiendo alcanzar un rendimiento cercano al límite teórico impuesto sobre las SMF. (Cabrera, 2009)

Hoy en día, los fenómenos lineales como la atenuación y dispersión cromática son temas que alberga mucha investigación ya que degradan la información transmitida para ello se usa fibras de compensación, ecualizadores, conjugador de fase óptica y rejillas de Bragg, de tal manera se reduce el ensanchamiento entre pulsos y la interferencia entre símbolos a causa de las grandes distancias que recorre a través de la fibra, si se aplica una FBG puede reducirse la dispersión en sistemas de transmisión largos como por ejemplo 100 Km, es una técnica prometedora que tiene precios asequibles, no solo funciona como compensadores de dispersión cromática y modal, además como sensores de temperatura, esfuerzo y campo eléctrico (Toba et al., 2020). Las rejillas ópticas de fibra de Bragg (Fiber Bragg Grating, FBG) son importantes en el campo de la comunicación óptica, en particular en aplicaciones como monitoreo y filtrado (Li & Brown, 2006).

En este artículo, se propone una rejilla de Bragg no uniforme con Chirp (Fiber Bragg Grating Chirp, FBGC), diseñada mediante simulación numérica basada en el modelo de propagación de haz (Beam Propagation Method, BPM), sobre una fibra óptica de pocos modos (Few Mode Fiber, FMF) para compensar la dispersión modal de una fibra óptica multimodo (Multimode Fiber, MMF), la cual se realiza mediante un fuerte acoplamiento modal a través de la conversión de modo del LP11 al modo LP01. (Sevila, 2017)

El artículo se ha organizado de la siguiente manera. El capítulo 2, presenta el problema del retardo modal diferencial en MMF. El capítulo 3, muestra el marco teórico de la rejilla no uniforme y el método de propagación de haz. En el capítulo 4, se indica los materiales y métodos usados en la investigación. En el capítulo 5, se muestran los resultados de las simulaciones, así como su análisis respectivo. Finalmente, en el capítulo 6 se describen las conclusiones.

## 2. DETERMINACIÓN DEL PROBLEMA

El esparcimiento del pulso causa la dispersión de los modos que se transmiten a través de la fibra por la diferencia de tiempos al propagarse reduce su capacidad al transmitir datos, a causa de que se genera interferencia Inter símbolo (InterSymbol Interference, ISI), es decir que la capacidad de transmisión disminuye con la distancia; las técnicas anteriormente propuestas en métodos ópticos han sido lentes y fibras compensadoras. Sin embargo, estas requieren diseño de lentes especiales, mecanismos complejos de ajuste o longitudes grandes para compensar ((P. G. Campoverde Rosero, 2021).

Las rejillas de Bragg es otra manera de compensar la dispersión modal, son utilizadas para refractar, filtrar o dispersar la luz sin abandonar el núcleo de la fibra cuyo índice de refracción ha sido modificado de manera periódica, evita el uso de espejos de volumen y rejillas de difracción, las cuales generan pérdidas de energía, además su longitud es corta y está en el rango de los micrómetros hasta la decena de centímetros. (Mexicana, 1997)

Por lo demás, nuevas fibras como la fibra de pocos modos (Few Mode Fiber, FMF) han surgido como una oportunidad tecnológica para incrementar la capacidad en transmisión, ya que se puede multiplicar la capacidad del enlace por cada modo adicional, teniendo baja atenuación similar a la SMF. Además, se ha demostrado convertidores de modo, multiplexores, demultiplexores, ópticos, que permiten nuevas técnicas de multiplexación basada en modos y aplicar técnicas de múltiples entradas y múltiples salidas (Multiple Input Multiple Output, MIMO) para mejorar la comunicación.(Lee & Erdogan, 2001)

Por todo lo planteado, es importante disponer de un dispositivo FMF-FBG con lo que se tenga pérdidas mínimas y pequeña longitud para generar un acople y compensación en la dispersión modal al ser conectada a una MMF y pueda producir un aumento en el resultado distancia ancho de banda, permitiendo lograr mayor

---

alcance del enlace, así como mayores tasas de bits, actualizando los sistemas de generaciones previas.

## 3. MARCO TEÓRICO REFERENCIAL

### 3.1 REJILLA DE BRAGG DE FIBRA NO UNIFORME

En fibras ópticas multimodo, la luz se propaga en modos discretos, con una amplitud y fase individual, así como una constante de propagación distinta, si la fibra restringe el paso a unos pocos modos esta es una fibra óptica de pocos modos (Few modes Fiber, FMF). En una fibra ideal el índice de refracción es constante a lo largo de la dirección de propagación, no obstante, la diferencia de fase entre los modos se ajusta debido a las diferentes constantes de propagación que hacen que el haz de luz cambie continuamente. En condiciones prácticas, el índice de refracción no es constante en la dirección de propagación, por lo tanto, algunos de los modos pueden intercambiar potencia, lo que normalmente se reconoce como acoplamiento de modos; las probables fuentes de acoplamiento son imperfecciones de fabricación en la fibra o perturbaciones externas, como micro y macro curvaturas o algún tipo de tensión (Schulze et al., 2015).

La frecuencia normalizada de corte  $V$  permite estimar el número aproximado de modos que cruzaran la fibra esta está dada por la ecuación (1). Donde  $a$  es el radio del núcleo,  $n_{nucleo}$  es el índice de refracción del núcleo y  $n_{revestimiento}$  es el índice de refracción del revestimiento de la fibra y  $\lambda$  es la longitud de onda (Nueva et al., 2012)

$$V = \frac{2\pi a}{\lambda} \sqrt{n_{nucleo}^2 - n_{revestimiento}^2} \quad (1)$$

Los índices de refracción de una fibra se altera con el propósito que permita el acoplamiento de modos ya que en una fibra ideal estos son ortogonales, las alteraciones pueden estar distribuidos a lo largo de la fibra o estar confinados localmente produciendo eventos de acoplamiento múltiples o únicos; el

acoplamiento es el resultado cuando la integral de superposición de los modos involucrados es distinta de cero, debido a que los modos no son ortogonales debido a la variación del índice de refracción de la fibra (Guan et al., 2021).

Una Rejilla de Bragg de Fibra está caracterizada de manera general por su índice de refracción distribuido en el eje de propagación  $n(z)$  a través de la fibra, como se indica en la ecuación (2). En la cual,  $z$  es la distancia a lo largo del eje longitudinal de la fibra,  $n_o$  es el índice de refracción antes de la suspensión de rejilla,  $f_A(z)$  es la función de apodización,  $\Delta n_{Ac}(z)$  es el índice de refracción para la modulación de amplitud,  $\Lambda$  es el periodo de rejilla como se indica en la figura 3.1,  $\theta(z)$  es la fase de la rejilla,  $\Delta n_{dc}(z)$  es el promedio del cambio del índice de refracción y  $n_{eff}$  el promedio efectivo del índice de refracción. (Wu et al., 2012)

$$n(z) = n_o + \Delta n_{dc}(z) + f_A(z) \Delta n_{Ac}(z) \cos\left(\frac{2\pi}{\Lambda} z + \theta(z)\right) \quad (2)$$

$$n_{eff} = n_o + \Delta n_{dc}(z) \quad (3)$$

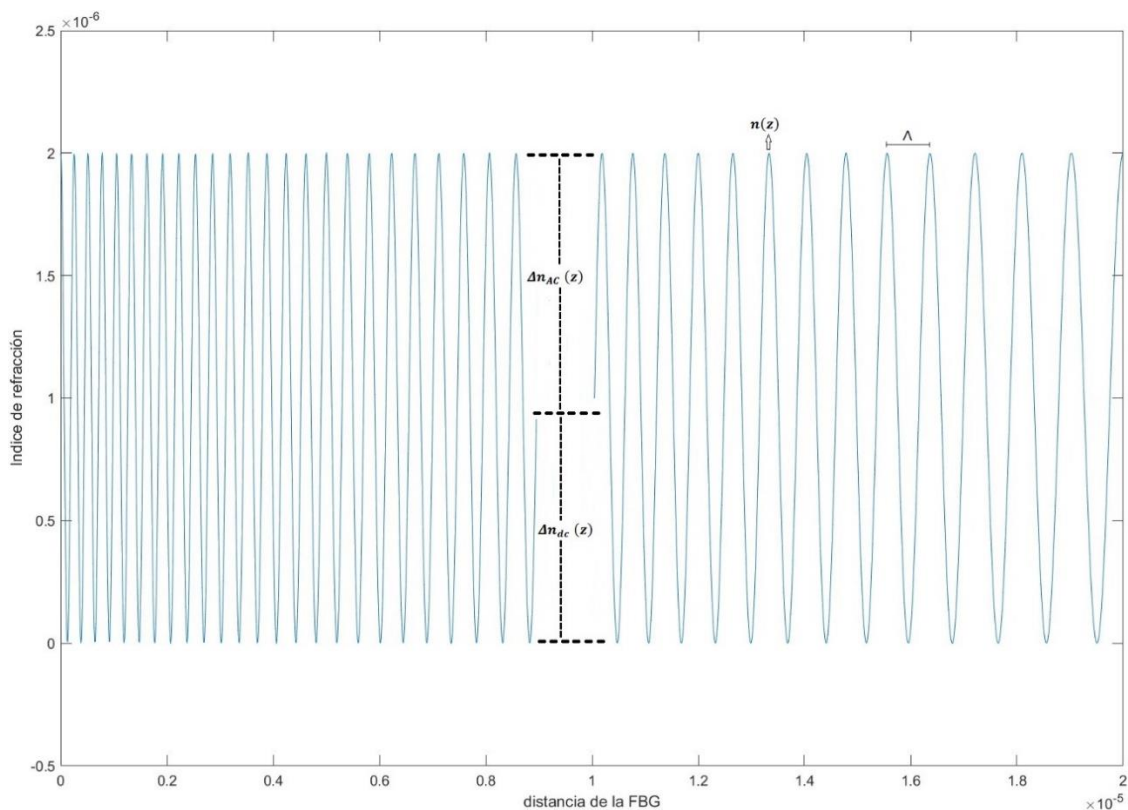


Figura 3.1 Índice de refracción vs distancia de la FBG

La fase de la rejilla  $\theta(z)$  varía lentamente en el eje de propagación y es descrita por la ecuación (4), donde  $C$  es el parámetro Chirp ( $m^{-1}$ ),  $\Lambda$  es el periodo de rejilla a lo largo del eje  $z$  (Enns et al., 1998).

$$\theta(z) = \frac{2\pi}{\Lambda} C z^2 \quad (4)$$

Para la mayoría de las aplicaciones de comunicaciones ópticas los receptores solo detectan el modo fundamental LP01. Sin embargo, cuando se trabajan con fibras MMF es necesario acoplar al modo LP01, modos de orden superior como por ejemplo LP11 para transferir potencia y reducir la dispersión modal, mejorando el desempeño de la transmisión, esto se consigue mediante convertidores de modos. La figura 3.2 y 3.3 muestran los campos de los modos LP01 que posee un solo lóbulo y LP11 posee dos lóbulos, respectivamente.

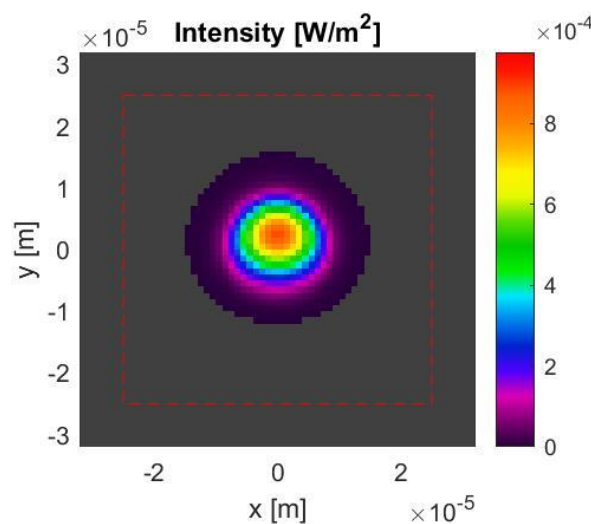


Figura 3.2 Intensidad del Modo de propagación LP01

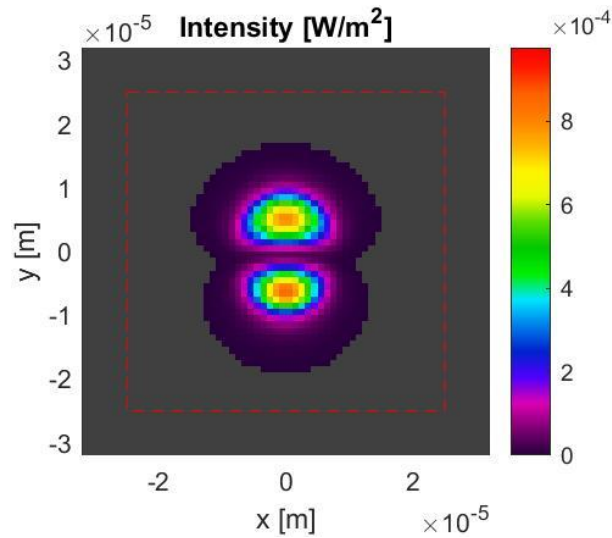


Figura 3.3 Intensidad del Modo de propagación LP11

Para alcanzar un acople y conversión en una FBG existen dos condiciones precisas que son las ecuaciones (5) y (6):

$$\lambda = \Lambda (neff_{LP11} - neff_{LP01}) \quad (5)$$

La coincidencia de fase que define la longitud de onda de resonancia  $\lambda$  y esta depende del periodo de rejilla  $\Lambda$ , y los índices efectivos de los modos involucrados  $neff_{LP11}, neff_{LP01}$ , como se indica en la ecuación (5) (Herrera & Torres Trujillo, 2004).

$$k_{uv} = \frac{n \omega \epsilon_0}{2} \iint \Delta n(x, y) E_u(x, y) E_v(x, y) dx dy \quad (6)$$

La ecuación (6) que es la integral de superposición de campo eléctrico, está debe ser distinta de cero, lo cual determina la eficiencia de acoplamiento y depende de la distribución del campo modal, así como del perfil de modulación del índice de refracción. Donde  $k_{uv}$  es el coeficiente de acoplamiento de dos modos involucrados,  $n$  es el índice de refracción del núcleo de la fibra,  $\omega$  es la frecuencia angular de la luz,  $\epsilon_0$  es la constante dieléctrica,  $\Delta n(x, y)$  es el perfil de índice de refracción perturbado por la radiación ultravioleta UV,  $E_u(x, y)$  y  $E_v(x, y)$  que son campos eléctricos normalizados (Wu et al., 2012).



El  $\Delta n(x, y)$  decrece exponencialmente en la FBG, debido a su fabricación con su iluminación parcial de los rayos UV, está puede ser modelada matemáticamente según la ecuación (7) (Wu et al., 2012).

$$\Delta n(x, y) = A \exp[-\alpha(y + \sqrt{r^2 - x^2})] \quad (7)$$

Donde  $(x, y)$  son coordenadas del eje transversal de la fibra óptica,  $n$  es el índice de refracción del núcleo,  $r$  es el radio del núcleo de la fibra óptica,  $A$  es el índice máximo de cambio en el borde superior del núcleo de fibra que depende de la potencia de un láser UV y fotosensibilidad de la fibra óptica,  $\alpha$  es el coeficiente de atenuación de la distribución del cambio de índice de refracción y depende de la composición del material del núcleo de la fibra. Una FBG cuyo periodo no es constante se conoce como rejilla de fibra de Bragg no uniforme y si este cambia mediante el factor de Chirp está es una rejilla de Bragg con Chirp (FBGC), está se realiza variando axialmente la periodicidad de rejilla y dicha variación es lineal como en la ecuación (8) en la cual  $\Lambda_0$  es la longitud de onda de trabajo y  $\Lambda_1$  es una constante. Otra forma de realizar es considerando una serie de rejillas de Bragg que incrementan su periodo a lo largo del eje  $z$  de propagación (Kritzinger, 2004).

$$\Lambda(z) = \Lambda_0 + \Lambda_1 z. \quad (8)$$

Está variación permite tener mejores características espectrales de respuesta comparada a la FBG uniforme, entre ellas está la disminución de los lóbulos laterales y una onda reflejada más estrecha lo que es crucial en sistemas de multiplexación por división de longitud de onda (Wavelength División Multiplexing, WDM).

## 3.2 MÉTODO DE PROPAGACIÓN DE HAZ

Método de propagación del haz (BPM, Beam Propagation Method) propaga el campo eléctrico a través de diferentes estructuras mediante la solución discreta de la ecuación de onda o de la ecuación de Helmholtz paraxial para el espacio de distribución del campo eléctrico  $E(x, y, z)$  en un plano transversal cualquiera a lo largo de un eje  $z$ . Los dos métodos principales que se aplica en la implementación

de un algoritmo en BPM, son el método de propagación del haz de transformada rápida de Fourier (FFT, Fast Fourier Transform) y el Método de propagación del haz de diferencia finita (FD, Finite Difference). Comúnmente se prefiere el método FD-BPM sobre FFT-BPM para simular la propagación de la luz en elementos ópticos integrados debido a su capacidad para simular estructuras de guía de ondas con discontinuidades en el índice de refracción. (Veettikazhy et al., 2021).

El siguiente método será utilizado para simular la fibra óptica de pocos modos en específico la FBG, debido a que permite resolver la ecuación de onda generada en el dispositivo óptico, presentamos la teoría de la perturbación para el cálculo de la respuesta espectral de una rejilla de Bragg no uniforme. Aquí consideramos dos (pares e impares) hacia adelante y dos hacia atrás modos normales de propagación de la rejilla para el caso especial de rejilla uniforme como se muestra en la figura 3.4 (J. E. Santos Correa, 2016)

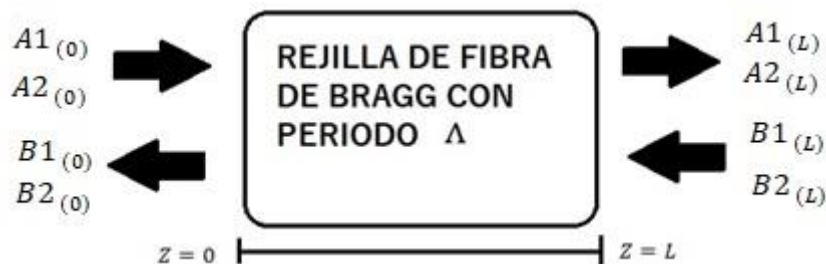


Figura 3.4 Modelo de FBG con dos modos de propagación a lo largo del eje Z

En la región de rejilla,  $A_i(z)$  ( $i = 1,2$ ) son las amplitudes de los dos modos de propagación hacia adelante y  $B_i(z)$  ( $i = 1,2$ ) hacia atrás. El campo eléctrico en la rejilla ( $E_g$ ), se puede expresar como: (J. E. Santos Correa, 2016)

$$E_g = \left[ \{A_1(z) e^{-j\beta_{g1}z} + B_1(z) e^{j\beta_{g1}z}\} \psi_{\beta_{g1}}(x, y) + \{A_2(z) e^{-j\beta_{g2}z} + B_2(z) e^{j\beta_{g2}z}\} \psi_{\beta_{g2}}(x, y) \right] e^{j\omega t} \quad (9)$$

donde  $\psi_{\beta_{gi}}$  son los modos normales de la guía de ondas con índice de refracción promediado, debido a la rejilla perturbación, que corresponden a la constante de propagación  $\beta_{gi}$ , ( $i = 1, 2$ ). Los modos normales en la ecuación anterior se normalizan de acuerdo con la siguiente ecuación:

$$\iint_{-\infty}^{\infty} \psi_{\beta gi}(x, y) \psi_{\beta gj}(x, y) dx dy = \frac{2\omega \mu_0}{|\beta gi|} \delta_{ij} \quad (i, j=1,2) \quad (10)$$

Para  $i=j$ ,  $\delta_{ij} = 1$  y para  $i \neq j$ ,  $\delta_{ij} = 0$

$$\nabla_t^2 \psi_{\beta gi} + [\omega^2 \mu_0 \epsilon_0 \epsilon_r(x, y) - \beta_i^2] \psi_{\beta gi} = 0 \quad (11)$$

$$\text{Aquí } \nabla_t^2 = \nabla^2 - \frac{\partial^2}{\partial z^2} = \frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2}.$$

La ecuación de onda para el componente del campo eléctrico es dada por:

$$\nabla^2 E_g + \omega^2 \mu_0 \epsilon_0 [\epsilon_r(x, y) + \Delta\epsilon_r(x, y, z)] E_g = 0 \quad (12)$$

donde  $\epsilon_r$  es la permitividad relativa y  $\Delta\epsilon_r$  la perturbación de la permitividad dieléctrica a causa de la presencia de rejilla, que es periódica en la dirección  $z$  con promedio cero durante un período. Esta perturbación se puede expandir en series de Fourier:

$$\Delta\epsilon_r(x, y, z) = \sum_{m \neq 0} \Delta\epsilon_m(x, y) e^{-jmz \frac{\pi}{\Lambda}} \quad (13)$$

Donde  $\Lambda$  es el periodo de perturbación. Aquí solamente con un armónico fundamental ( $m=1$ ) es retenido.

En base a la ec.(7), se resuelve las ecuaciones diferenciales de propagacion de los modos las cuales seran resueltas mediante el metodo de Beam propagation, mediante diferencias finitas.

$$\frac{\partial^2 E_g}{\partial x^2} = (A_1(z) e^{-j\beta g 1z} + B_1(z) e^{j\beta g 1z}) \frac{\partial^2 \psi_{\beta g 1}}{\partial x^2} e^{j\omega t} + (A_2(z) e^{-j\beta g 2z} + B_2(z) e^{j\beta g 2z}) \frac{\partial^2 \psi_{\beta g 2}}{\partial x^2} e^{j\omega t} \quad (14)$$

$$\frac{\partial^2 E_g}{\partial y^2} = (A_1(z) e^{-j\beta g 1z} + B_1(z) e^{j\beta g 1z}) \frac{\partial^2 \psi_{\beta g 1}}{\partial y^2} e^{j\omega t} + (A_2(z) e^{-j\beta g 2z} + B_2(z) e^{j\beta g 2z}) \frac{\partial^2 \psi_{\beta g 2}}{\partial y^2} e^{j\omega t} \quad (15)$$

$$\begin{aligned}
 \frac{\partial^2 E_g}{\partial z^2} = & \left[ \left( \frac{\partial^2 A_1(z)}{\partial z^2} e^{-j\beta g_1 z} - 2j\beta g_1 \frac{\partial A_1(z)}{\partial z} e^{-j\beta g_1 z} - \beta_{g_1}^2 A_1(z) e^{-j\beta g_1 z} + \right. \right. \\
 & \left. \left. \frac{\partial^2 B_1(z)}{\partial z^2} e^{j\beta g_1 z} + 2j\beta g_1 \frac{\partial B_1(z)}{\partial z} e^{j\beta g_1 z} - \beta_{g_1}^2 B_1(z) e^{j\beta g_1 z} \right) \psi_{\beta g_1} e^{j\omega t} \right] + \\
 & \left[ \left( \frac{\partial^2 A_2(z)}{\partial z^2} e^{-j\beta g_2 z} - 2j\beta g_2 \frac{\partial A_2(z)}{\partial z} e^{-j\beta g_2 z} - \beta_{g_2}^2 A_2(z) e^{-j\beta g_2 z} + \right. \right. \\
 & \left. \left. \frac{\partial^2 B_2(z)}{\partial z^2} e^{j\beta g_2 z} + 2j\beta g_2 \frac{\partial B_2(z)}{\partial z} e^{j\beta g_2 z} - \beta_{g_2}^2 B_2(z) e^{j\beta g_2 z} \right) \psi_{\beta g_2} e^{j\omega t} \right] \quad (16)
 \end{aligned}$$

## 4. MATERIALES Y METODOLOGÍA

Se realizó un modelo computacional geométrico de la rejilla de Bragg con Chirp sobre una fibra óptica de pocos modos (Few Mode Fiber-FBGC, FMF-FBGC) en una fibra óptica con índice de refracción paso para la simulación de la intensidad de campo eléctrico a lo largo de la rejilla para analizar los modos LP01 y LP11 mediante el uso del método de BPM usando la herramienta computacional de software abierto Open Source BPM- Matlab V 1.1. La FBG fue construida sobre la base de una FMF de dos modos cuyo radio del núcleo fue de  $9\mu m$ , sus índices de refracción del núcleo y revestimiento fueron 1.4490 y 1.4454 respectivamente, la frecuencia de corte normalizada de 3.80. El máximo valor del perfil de índice de refracción perturbado fue 0.005, coeficiente de atenuación de la distribución del cambio de índice que depende del material del núcleo es  $0.2\mu m^{-1}$  y una longitud de onda de  $1500nm$ , bajo estos parámetros existirán el modo fundamental LP01, LP11 impar y LP11 par. El cambio del índice de refracción de la FBG producido por la fabricación al usar luz ultravioleta incidente en la fibra óptica fue simulado usando la función exponencial de la ecuación (7), la misma es mostrada en la figura 4.1 y se observa cómo se distribuye el índice de refracción a lo largo de la FMF-FBGC.

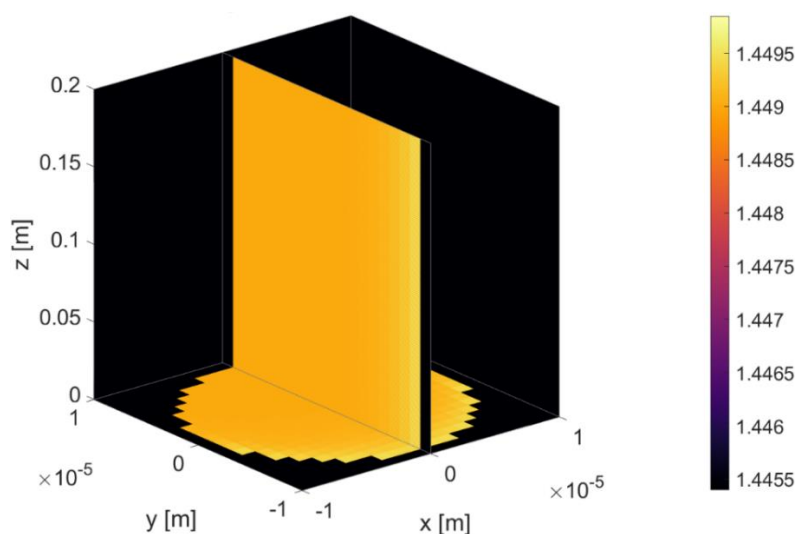


Figura 4.1 Parte real del índice de refracción en Y

## 5. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Se simuló una FMF-FBGC con los siguientes parámetros: radio del núcleo de la fibra ( $r_{nucleo} = 9\mu m$ ), longitud de resonancia ( $\lambda = 1550 nm$ ), el perfil de índice de refracción perturbado es ( $A = 0.005$ ), coeficiente de atenuación de la distribución del cambio de índice que depende del material del núcleo es ( $\alpha = 0.2\mu m^{-1}$ ), índices de refracción del núcleo y revestimiento respectivamente son ( $n_{nucleo} = 1.4490$  y  $n_{revestimiento} = 1.4454$ ), un índice de refracción de variación de amplitud de ( $\Delta n_{Ac}(z) = 0.1$ ), y un periodo de Chirp de ( $C = 6.1185e^{-2}$ ). (Wu et al., 2012).

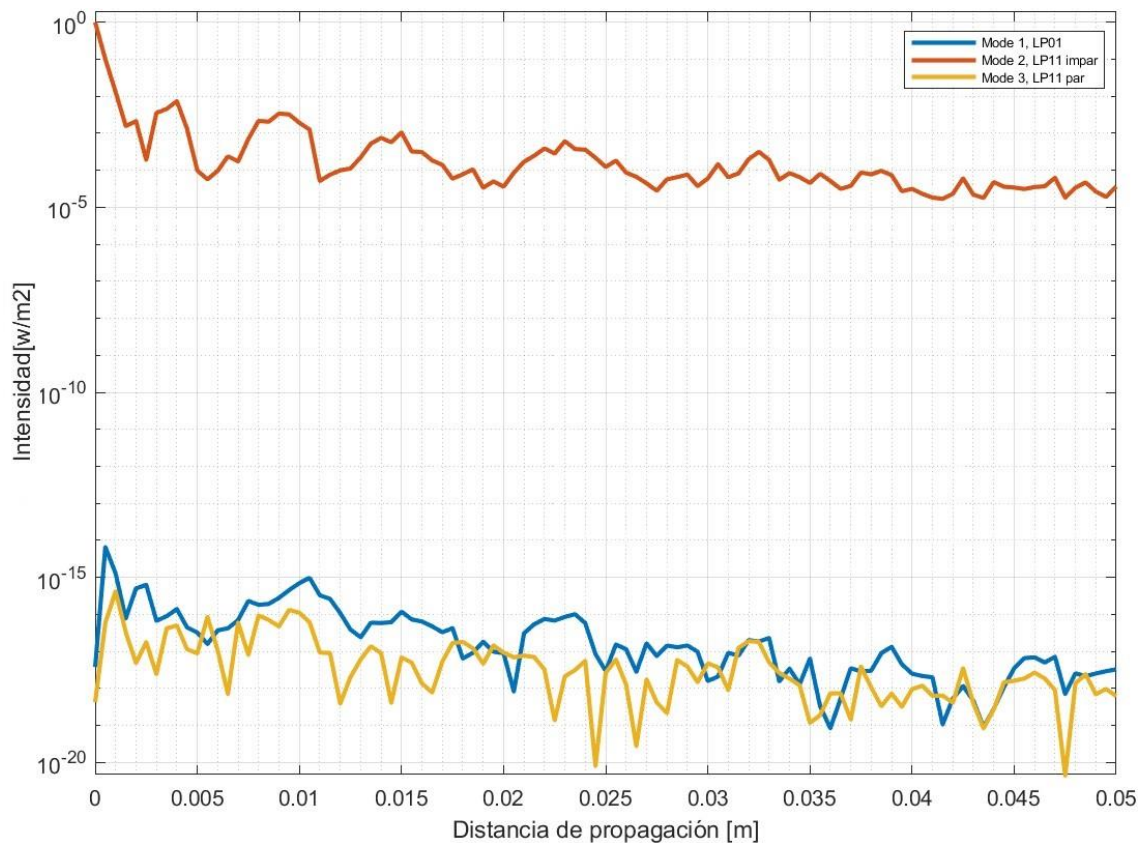


Figura 5.1 Modos superpuestos sin ningún acoplamiento.

En la figura 5.1, se observa los modos LP01, LP11 impar y LP11 par sin lograr un acoplamiento, es decir no existe unión de modos a lo largo de la distancia de propagación, ya que no hay cambio del índice de refracción de la FBG incidente en la fibra óptica.

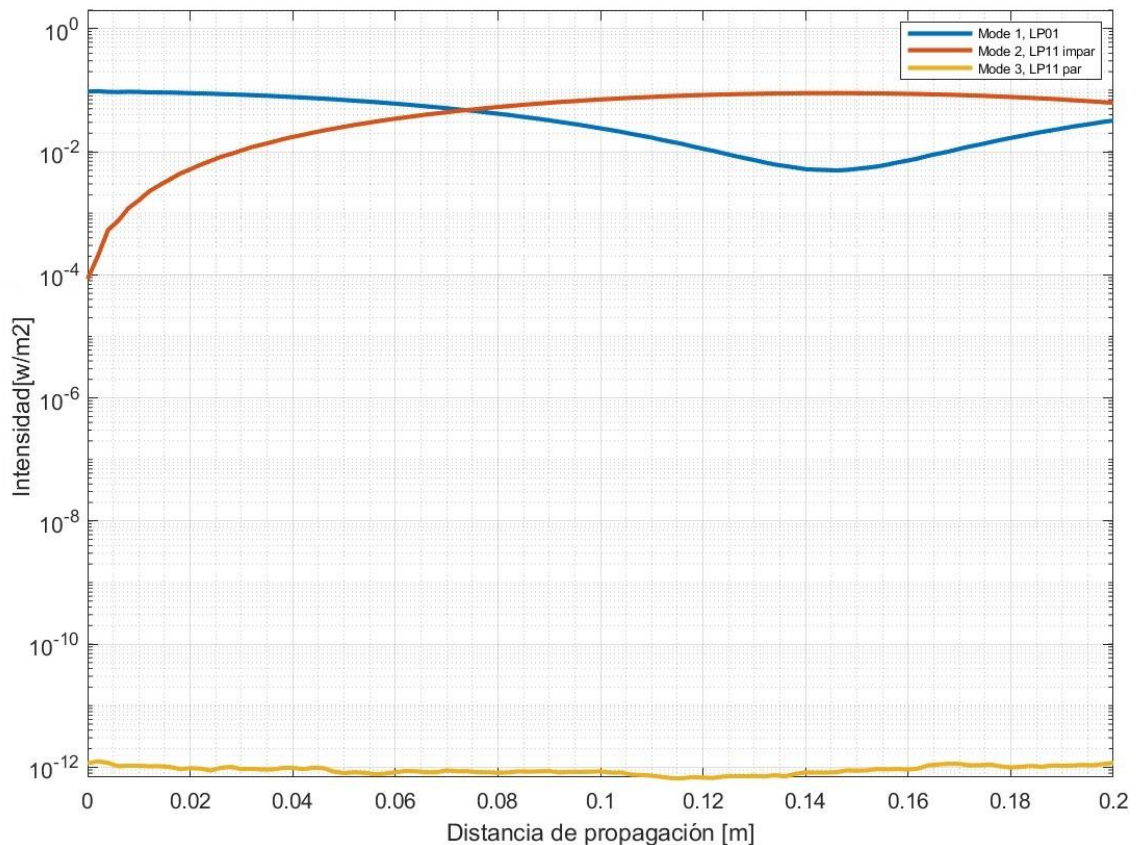


Figura 5.2 Modos superpuestos acoplamiento débil entre modos LP11 y LP01

La fabricación al usar luz ultravioleta incidente en la fibra óptica fue simulada mediante la ecuación (7), de esta manera existe un cambio del índice de refracción en la FBG que permite un acoplamiento débil entre los modos LP01 y LP11 impar, como se indica en la figura 5.2, realizando un cambio en el índice de refracción en la variación de amplitud de ( $\Delta n_{Ac}(z) = 0.3$ ), y un periodo de Chirp de ( $C = 10e^{-2}$ ), se logró conseguir un acoplamiento débil, por lo anterior, se procedió a obtener valores óptimos de los parámetros para lograr la máxima transferencia de potencia entre los modos LP01 y LP11 mediante simulaciones.

Para la longitud de onda de trabajo de la FMF-FBGC, está fue analizada en el rango de  $1542nm$  a  $1548nm$  que corresponde a la banda C, ya que existe un intercambio de potencia entre el modo LP01 y LP11 una mayor transferencia de potencia se produce a  $\lambda = 1545.2 nm$ , como se muestra en la figura 5.3



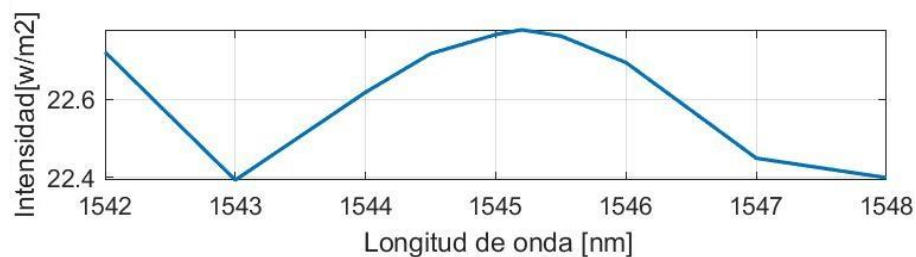


Figura 5.3 Transferencia de potencia del modo LP11 al LP01

Por lo anterior, fue necesario encontrar el periodo de la rejilla, para lo cual se calculó esta según la ecuación (5) para diferentes longitudes de onda, como se observa en la figura 5.4, obteniéndose el periodo de  $1212.01 \text{ nm}$  para la longitud de onda de máxima transferencia de potencia obtenida. También se observa la respuesta lineal que tiene la periodicidad en función de la longitud de onda lo que corrobora una variación lineal del Chirp.

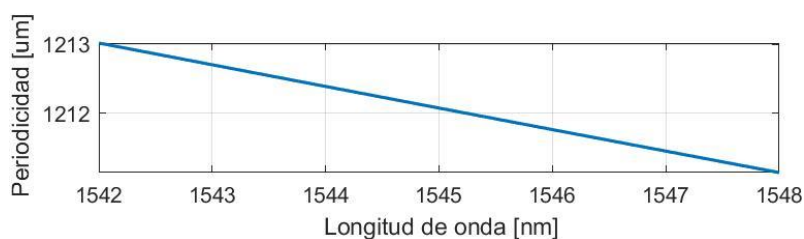


Figura 5.4 Periodo de la rejilla de Bragg vs longitud de onda

En la figura 5.5. se varía en el rango de 0 a 1, definiendo una mayor intensidad en el valor de 0.8, es decir se tiene la mayor cantidad de transferencia de energía, Además, se verifica que para valores mayores a 1 la potencia empieza a decaer y se pierde acoplamiento, debido a que el índice de refracción efectivo no puede reflejar totalmente la luz dentro del núcleo de la fibra.



Figura 5.5 Variación de potencia vs índice de refracción de variación de amplitud



Entonces, el valor del Chirp fue optimizado variando su valor entre  $10^{-8}m^{-1}$  a  $10^4m^{-1}$ , encontrando que para  $C \leq 10^{-5}m^{-1}$  existe acoplamiento y es constante, mientras que para  $C \geq 10^1m^{-1}$  no existe acoplamiento, como se aprecia en la figura 5.6. esto debido a que la variación del chip permite la resonancia de los modos a una determinada frecuencia.

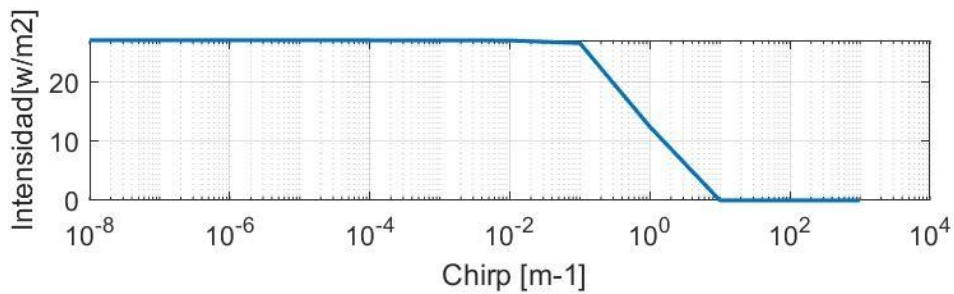


Figura 5.6 Variación de potencia vs Variación del periodo del Chirp

Encontrando los mejores valores para la FMF-FBGC, se ingresó el modo LP11 para demostrar su conversión al modo LP01. La figura 5.7 muestra el acoplamiento y conversión de los modos a lo largo de la rejilla, se valora un comportamiento periódico de los modos analizados debido a las propiedades intrínsecas de la FMF donde se logra la conversión existe longitudes de “bateo” y se da para campos eléctricos no ortogonales, tal que el modo LP11 impar se acopla al modo fundamental LP01.

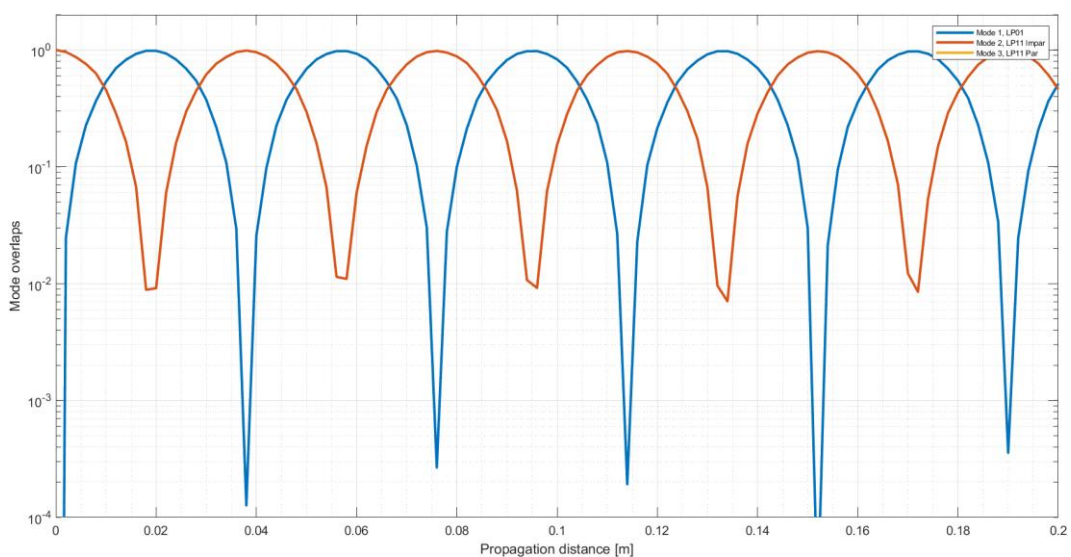


Figura 5.7 Conversión del modo LP11 impar al modo fundamental LP01.

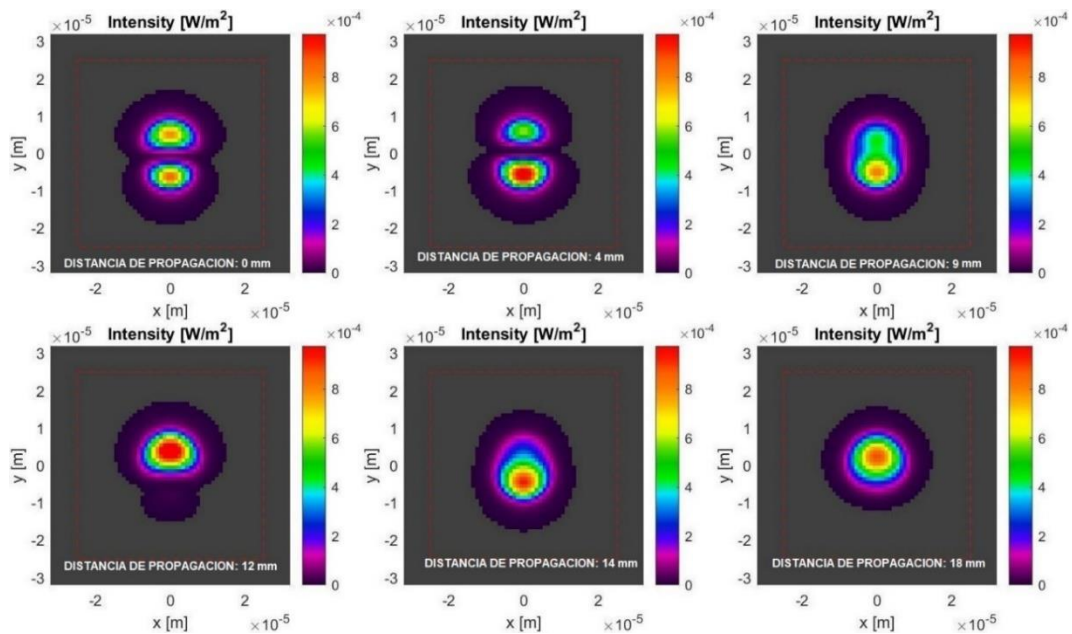


Figura 5.8 Modos superpuestos vs distancia de propagación

En la figura 5.8, se observa el cambio de modo LP11 impar con dos lóbulos partiendo desde 0mm, el acople de los modos en 4mm, 9mm, 12 mm, 14mm y finalmente al modo fundamental LP01 con un solo lóbulo a la distancia de propagación de 18mm, con el objetivo de conseguir una rejilla de menor longitud, se toma la primera longitud de bateo que da a 18mm, lo que implica que ha esta longitud reduce el retardo modal diferencial, logrando con ello además obtener una FMF-FBGC de bajas pérdidas.

## 6. CONCLUSIONES

Una FMF-FBGC inscrita en una fibra óptica de dos modos LP01 y LP11 mediante el método de propagación de haz ha sido simulado usando la herramienta computacional de software abierto Open Source BPM- Matlab V 1.1, con los parámetros óptimos de radio del núcleo ( $r_{nucleo} = 9\mu m$ ), longitud de onda resonante ( $\lambda = 1545.2 nm$ ), índices de refracción del núcleo y revestimiento respectivamente son ( $n_{nucleo} = 1.4490$  y  $n_{revestimiento} = 1.4454$ ), el perfil de índice de refracción perturbado es ( $A = 0.005$ ), coeficiente de atenuación de la distribución del cambio de índice que depende del material del núcleo es ( $\alpha = 0.2\mu m^{-1}$ ), un índice de refracción de variación de amplitud de ( $\Delta n_{Ac}(z) = 0.8$ ), y un periodo de Chirp de ( $C = 10^{-5}m^{-1}$ ). Los cuales fueron optimizados para lograr la máxima transferencia de potencia entre los modos, con esto se logró compensar el retardo modal diferencial de una MMF al colocarla como filtro modal, lo que incrementa su capacidad y permite actualizar redes ligadas de este tipo a tasas de bits mayores. Esta investigación abre el campo para el diseño de filtros modales de más modos lo que permitirá obtener redes basadas en MMF con mejor desempeño.

## REFERENCIAS

- Cabrera, A. G. (2009). *Estudio de las rejillas de Bragg grabadas en fibra dopada con tierras raras*.
- Ennsner, K., Zervas, M. N., & Laming, R. I. (1998). Optimization of apodized linearly chirped fiber gratings for optical communications. *IEEE Journal of Quantum Electronics*, 34(5), 770–778. <https://doi.org/10.1109/3.668763>
- Guan, P., Tang, M., Cao, M., Mi, Y., Liu, M., Ren, W., & Ren, G. (2021). Transverse asymmetry of the index modulation profile in few-mode fiber Bragg grating. *Photonics*, 8(3), 4–11. <https://doi.org/10.3390/photonics8030087>
- Herrera, R. A., & Torres Trujillo, P. I. (n.d.). *REDES DE BRAGG: FABRICACION, CARACTERIZACION Y APLICACIONES*.
- J. E. Santos, K. P. D. G. I., Puerto, K. C., & Dinael, G. (n.d.). *Dialnet-CompensacionDeLaDispersionCromaticaPresenteEnLaFib-6118798*.
- Kritzinger, R. (2004). *MANUFACTURING OF AZIMUTHALLY SYMMETRIC LONG-PERIOD FIBRE GRATINGS USING A CO2 LASER*.
- Lee, K. S., & Erdogan, T. (2001). Fiber mode conversion with tilted gratings in an optical fiber. *Journal of the Optical Society of America A*, 18(5), 1176. <https://doi.org/10.1364/josaa.18.001176>
- Li, Y., & Brown, T. G. (2006). Radiation modes and tilted fiber gratings. *Journal of the Optical Society of America B*, 23(8), 1544. <https://doi.org/10.1364/josab.23.001544>
- Mexicana, R. (1997). *Rejillas de Bragg en núcleo de fibra óptica de vid"io*. 1(2).
- Nueva, U. M., Colombia, G., Mora, B., Arturo, H., & Varela, B. (2012). *Ciencia e Ingeniería Neogranadina*. 22(2), 97–109. <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=91126903006>
- pablo Gabriel Campoverde Rosero, P. A. M. R. (2021). Universidad Politécnica Salesiana Sede Quito. *Tesis*, 1–100. <http://dspace.ups.edu.ec/bitstream/123456789/5081/1/UPS-CYT00109.pdf>
- Schulze, C., Brüning, R., Schröter, S., & Duparré, M. (2015). Mode Coupling in Few-Mode Fibers Induced by Mechanical Stress. *Journal of Lightwave Technology*, 33(21), 4488–4496. <https://doi.org/10.1109/JLT.2015.2475603>
- Sevila, P. M. (2017). *Técnicas de transmisión sobre bra óptica con dispersión modal*.
- Toba, M., Mustafa, F. M., & Barakat, T. M. (2020). New simulation and analysis fiber bragg grating: Narrow bandwidth without side lobes. *Journal of Physics Communications*, 4(7), 1–13. <https://doi.org/10.1088/2399-6528/AB0600>
- Veetikazhy, M., Kragh Hansen, A., Marti, D., Mark Jensen, S., Lykke Borre, A., Ravn Andresen, E., Dholakia, K., & Eskil Andersen, P. (2021). BPM-Matlab: an open-source optical propagation simulation tool in MATLAB. *Optics Express*, 29(8), 11819. <https://doi.org/10.1364/oe.420493>
- Wu, C., Liu, Z., Chung, K. M., Tse, M. L. V., Chan, F. Y. M., Lau, A. P. T., Lu, C., & Tam, H. Y. (2012). Strong LP 01 and LP 11 mutual coupling conversion in a two-mode fiber Bragg grating. *IEEE Photonics Journal*, 4(4), 1080–1086. <https://doi.org/10.1109/JPHOT.2012.2204735>