



POSGRADOS

MAESTRÍA EN TELEMÁTICA

RPC-SO-01-NO.025-2021

OPCIÓN DE TITULACIÓN:

ARTÍCULOS PROFESIONALES DE ALTO
NIVEL

TEMA:

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

AUTORA:

ANA VALERIA TITUAÑA CANCHIG

DIRECTOR:

MILTON NAPOLEON TIPÁN
SIMBAÑA

QUITO – ECUADOR
2022



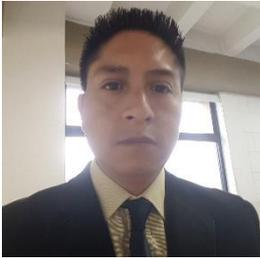
Autora:



Ana Valeria Tituaña Canchig

Ingeniero Electrónico mención Telecomunicaciones
Candidata a Magíster en Telemática por la Universidad
Politécnica Salesiana – Sede Quito.
atituanac@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

TITUAÑA CANCHIG ANA VALERIA

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

DEDICATORIA

El presente proyecto dedico de manera especial a mi padre Marcelo Tituaña por brindarme su apoyo y consejos constantes, a mi madre Anita Canchig por el empuje que me da para no rendirme, gracias a ellos he podido superar cada uno de los obstáculos presentados, por la confianza puesta sobre mi persona, especialmente cuando he contado con su mejor apoyo desde que inicie con este proyecto.

A mi querida hija Victoria por ser esa motivación, alegría y cariño que son detonantes de mi felicidad, de mi esfuerzo, de mis ganas de buscar lo mejor para ella. Aun siendo tan pequeña me has enseñado a sacar las fuerzas de donde no existe. A mis abuelitos, hermanos y tíos con sus palabras, y sus obras que así se sea poco o mucho me han ayudado a no desmayar y continuar.

A mis compañeros, amigos presentes y pasados, quienes sin esperar nada a cambio compartieron su conocimiento, alegrías y tristezas, a todas aquellas personas que me brindaron ese apoyo, para poder finalizar esta maestría con éxito

AGRADECIMIENTO

Agradezco a Dios por su amor y bondad infinitas, por permitirme sonreír ante todos mis logros que son resultados de su ayuda. A mis padres por estar pendiente en cada uno de mis pasos, por su ayuda tanto moral como económica, no me han permitido que decaída, sino contar con ese apoyo constante y salir adelante, logrando culminar mi maestría.

A una persona que no pensé encontrar, pero llegó a ser una gran amistad, a mi amiga y compañera Belén Flores, por escucharme y darme esos consejos valiosos que permitieron que no me desanime y siga adelante, por mostrarme la mejor versión de mí y alcanzar así mis metas.

A la Universidad Politécnica Salesiana que nos abrió sus puertas para ser excelentes profesionales y a los diferentes docentes que brindaron sus conocimientos y su apoyo para seguir adelante. Al doctor Milton Tipán por su confianza, guía, conocimiento, y paciencia para la culminación de este proyecto y a mi amigo Gabriel Pinto por su amistad y tiempo compartidos en toda esta etapa de la maestría y proyecto de titulación

TABLA DE CONTENIDO

Resumen	6
Abstract.....	7
1. Introducción.....	8
2. Determinación del Problema.....	10
3. Marco teórico referencial.....	12
3.1 Fibra óptica de pocos modos.....	12
3.2 Rejilla de Bragg Inclinada (TFBG)	13
3.3 Método de propagación del haz.....	17
4. Materiales y metodología.....	23
5. Resultados y discusión.....	24
6. Conclusiones.....	30
Referencias	31

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

AUTOR(ES):

ANA VALERIA TITUAÑA CANCHIG

RESUMEN

La capacidad de las redes de fibra óptica multimodo se ve disminuida considerablemente por el retardo modal diferencial al incrementar la velocidad o la distancia. El artículo contribuye a esa línea y propone una rejilla de Bragg inclinada realizada en una fibra óptica de dos modos, la cual actúa como convertidor de modo del LP11 al LP01, sus parámetros ópticos y físicos fueron optimizados obteniéndose una rejilla de 5 cm con un ángulo de inclinación de la rejilla $\theta_b = 5$ lográndose una diferencia de intensidad de conversión de 1000 veces, que usada como filtro modal produce una compensación del retardo modal diferencial.

Palabras clave:

TFBG, FMF, DMD, BPM.

ABSTRACT

The capacity of multimode fiber optic networks is greatly diminished by differential modal delay with increasing speed or distance. The article contributes to this line and proposes an inclined Bragg grating made on a two-mode optical fiber, which acts as a mode converter from LP11 to LP01, its optical and physical parameters were optimized, obtaining a 5 cm grating with an angle grid tilt $\theta_b = 5$ achieving a conversion intensity difference of 1000 times, which, when used as a modal filter, produces a differential modal delay compensation.

Keywords:

TFBG, FMF, DMD, BPM.

1. INTRODUCCIÓN

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

Las fibras de compensación, los ecualizadores, los conjugados de fase óptica y las rejillas ópticas de Bragg (FBG) se utilizan actualmente para tratar fenómenos lineales como la atenuación y la dispersión cromática que degradan la información transmitida, lo que puede reducir la dispersión entre pulsos y la interferencia entre símbolos. Si se utilizan FBG, la dispersión se puede reducir en sistemas de transmisión a larga distancia en 100Km, esta tecnología prometedora es asequible, puede usarse no solo como compensadores de dispersión cromática y modal, sino también como sensores de temperatura, voltaje, campo eléctrico y filtros ópticos. (Toba et al., 2020)(Li & Brown, 2006).

En este artículo, se propone una rejilla de Bragg inclinada (Tilted Fiber Bragg Grating, TFBG), diseñada mediante simulación numérica basada en el modelo de propagación de haz (Beam Propagation Method, BPM), para 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 inclinada 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

La dispersión de modos es un fenómeno que afecta a la comunicación por fibra óptica con fibra multimodo. A medida que la luz viaja a través de la fibra, la señal se retrasa, dando como resultado un ancho de banda a una distancia reducidos o limitados, y provocando interferencias entre símbolos (InterSymbol Interference, ISI), es decir cada pulso de señal que entra por un extremo del cable se deforma algo en el otro extremo, haciéndose más ancho (perdiendo su amplitud y aumentando su tiempo) porque tiene que esperar a que todos los rayos que lo formaron lleguen al suyo, para poder recuperar se necesita varios mecanismos de ajuste (P. G. Campoverde Rosero, 2021).

El descubrimiento de la formación de rejillas Bragg el índice de refracción en la fibra óptica es otra opción para poder compensar la dispersión modal que ha abierto toda una nueva clase de dispositivos de procesamiento de luz que se caracterizan por bajas pérdidas de inserción y funciones de transferencia espectral muy flexibles, gracias a que utilizan un patrón periódico de luz ultravioleta formado por la interferencia de dos haces para realizar una copia permanente del patrón periódico en regiones de la fibra donde se produce una reacción fotoquímica entre los fotones ultravioleta y el vidrio pueden ocurrir (Albert, Shao, & Caucheteur, 2012).

Mediante las fibras de pocos modos se ha descubierto aplicaciones importantes y generales que permiten que la tecnología pueda aumentar principalmente para la estabilización de los diodos láser de bomba que se utilizan en los amplificadores de fibra dopados con erbio, para conjuntos distribuidos de sensores de tensión, acústicos y de temperatura, para multiplexación de longitud de onda, para aplanamiento de ganancia en sistemas de comunicación óptica, para compensación de dispersión y como espejos de cavidad para láseres de fibra Lee & Erdogan, 2001).

Lo que hace que los FMF-FBG sean importantes es que la función de transferencia espectral se puede acoplar con precisión y una simpleza empleando sistemas de fabricación con alta capacidad, logrado obtener un ancho de banda mayor a una distancia más larga con una tasa de bits alta, un ejemplo claro son las fibras estándar utilizadas en telecomunicaciones como CORNING SMF-28 (Albert, Shao, & Caucheteur, 2012).

3. MARCO TEÓRICO REFERENCIAL

3.1 FIBRA ÓPTICA DE POCOS MODOS

Los modos de propagación linealmente polarizados (Linearly Polarized, LP) pueden estudiarse cuando la diferencia de índice de refracción entre el núcleo y el revestimiento es pequeña, así los campos eléctricos y magnéticos que se propagan por la fibra se pueden describir de manera sencilla matemáticamente y además son lineales. El modo LP01 se denomina modo fundamental porque se propaga en todas las condiciones independientemente de la geometría o longitud de onda aplicada a la fibra (Cabrera, 2009), La intensidad de campo eléctrico del modo LP01 se observa en la *Figura 3.1*.

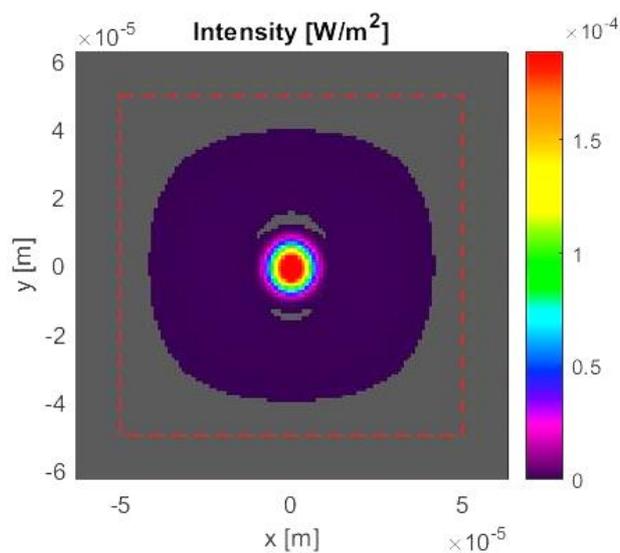


Figura 3.1 Intensidad del Modo de propagación LP01.

La fibra de pocos modos está restringida a transportar modos menores a 12, dando una velocidad de transmisión más alta y hasta 50 veces más distancia que multimodo ya que tiene una atenuación similar a la SMF y un núcleo mucho más pequeño que la multimodo (Cabrera, 2009). Para una fibra de dos modos se propagan el modo adicional LP₁₁, este puede formar 2 haces de luz con una variación del tipo seno o coseno dependiendo de cómo estén orientado las zonas de luz. La *Figura 3.2*, muestra la intensidad de campo eléctrico de este modo.

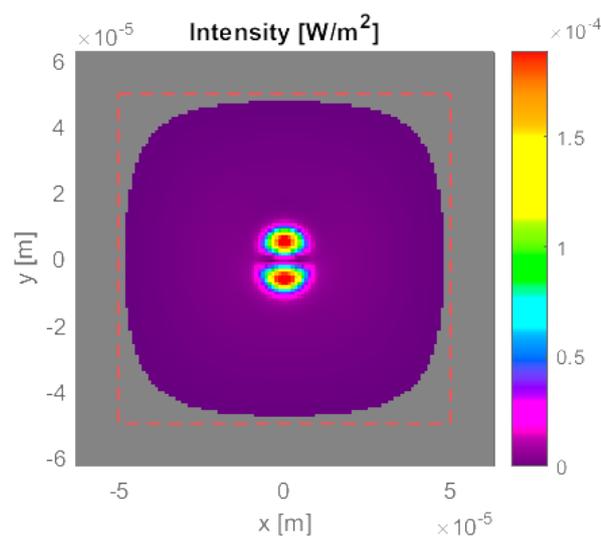


Figura 3.2 Intensidad del Modo de propagación LP₁₁.

3.2 REJILLA DE BRAGG INCLINADA (TFBG)

Una rejilla de Bragg inclinada es definida con una modulación periódica del índice de refracción a lo largo de una sección pequeña del núcleo de una fibra óptica con la habilidad de reflejar un pico espectralmente angosto de la luz guiada por la fibra. Este índice depende de la longitud de onda, intensidad de la luz y propiedades de la fibra (Zhao, 2011), esta modificación del índice de refracción en la extensión del curso de la propagación en el núcleo de la fibra se obtiene mediante la exposición del núcleo óptico a los rayos UV (Falih, 2017).

Para determinar el acoplamiento y el ancho de banda de la luz que se refleja fuera de la rejilla Bragg inclinada debe ser necesario que la inclinación de los planos de la rejilla sean guiados de forma inversa en el núcleo de la fibra siendo la unión holgada y guiados en el recubrimiento, como eficiente. En este tipo de rejillas, el vector de la rejilla K está incidiendo en un ángulo θ_b con respecto al eje de la fibra (Cabrera, 2009) como se muestra en la *Figura 3.3*, donde la magnitud del vector de onda de la incidencia v_i y dispersión v_s , deben ser iguales.

$$\cos \theta_b = \frac{|K|}{v_i + v_s} = \frac{|K|}{2v} \quad (1)$$

Esto muestra que el ángulo (θ_b) de dispersión está limitado por la longitud de onda y el índice de refracción como se muestra en la ecuación (1), por ende una rejilla inclinada no tiene solo diferentes longitudes de onda mostrándose a distintos ángulos, sino a diversos modos de igual longitud de onda. De igual forma nacen pequeños ángulos con diferentes constantes de propagación (Shen, 2018).

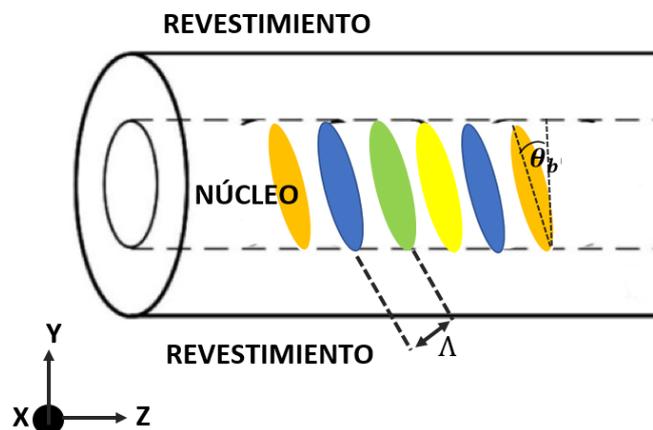


Figura 3.3 Rejilla Bragg inclinada

En la ecuación (2) el primer requisito es que el período en la rejilla Λ va a determinar la longitud de onda resonante λ en el cual debe coincidir con la fase. El segundo requisito son los índices de refracción del núcleo son $n_{ef} f_{LP11}$, $n_{ef} f_{LP01}$ de los modos involucrados en dos modos (Herrera & Torres Trujillo, 2004).

$$\lambda = \Lambda (neff_{LP11} - neff_{LP01}) \quad (2)$$

La ecuación (3) está descrito la eficiencia de acoplamiento que depende de la división del campo modal y el perfil de modulación del índice de refracción en el cual función de la integral de transposición de campo eléctrico debe ser diferente de cero.

$$k_{uv} = \frac{n \omega \epsilon_0}{2} \iint \Delta n(x, y) E_u(x, y) E_v(x, y) dx dy \quad (3)$$

Donde:

k_{uv} es el coeficiente de acoplamiento de dos modos involucrados, n es el índice de refracción del núcleo de la fibra, ω es la frecuencia angular de la luz, ϵ_0 es la constante dieléctrica, $\Delta n(x, y)$ es la amplitud de la perturbación inducida en el índice de refracción por los rayos UV, $E_u(x, y)$ y $E_v(x, y)$ son campos eléctricos normalizados (Wu et al., 2012).

Para modelar matemáticamente de acuerdo con la ecuación (4), es necesario localizar una parte de la luz ultravioleta UV, esto se debe a las disminución exponencial sobre la fibra es el $\Delta n(x, y)$ (Wu et al., 2012). La división del índice de refracción con respecto al núcleo de la fibra se torna no uniforme después de la iluminación UV, lo que significa que tiende a decrecer como una función exponencial dada por:

$$\Delta n(x, y) = A \exp[-\alpha (y + \sqrt{r^2 + x^2})] \quad (4)$$

Donde:

x, y son las coordenadas, A es el índice máximo de cambio en el borde superior del núcleo, α es el coeficiente de atenuación de la distribución del cambio y r es el radio del núcleo de la fibra (Lee & Erdogan, 2001).

Una FBG está determinada por su índice de refracción distribuida en $n(z)$ a lo largo de la fibra como muestra la ecuación (5)

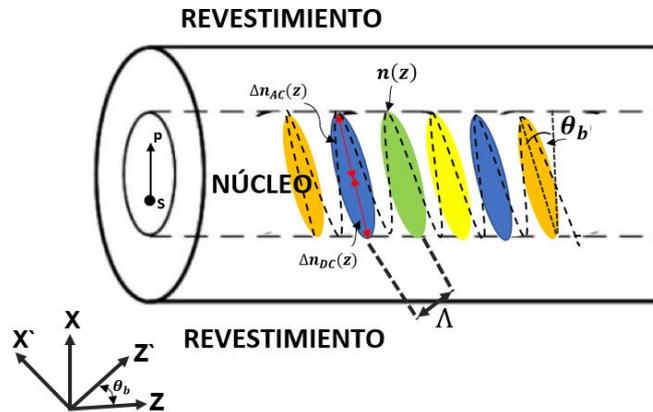


Figura 3.4 Diagrama de una rejilla de fibra inclinada escrita en una fibra óptica en ejes (x, z) y sus definiciones para el análisis

$$n(z) = n_o + \Delta n_{DC}(z) + f_A(z) * \Delta n_{AC}(z) \cos\left(\frac{2\pi}{\Lambda} z + \theta_b(z)\right) \quad (5)$$

Donde:

Z es la distancia a lo largo del eje longitudinal de la fibra, n_o es el índice de refracción previo a la rejilla, $f_A(z)$ es la función de apodización, en la *Figura 3.4* $\Delta n_{DC}(z)$ es la amplitud de la modulación del índice de refracción, Λ es el periodo de rejilla de diseño, $\theta_b(z)$ es el periodo variando lentamente en Z y $\Delta n_{AC}(z)$ es el cambio promedio (Wu, 2012).

El promedio efectivo del índice de refracción es:

$$n_{eff} = n_o + \Delta n_{DC}(z) \quad (6)$$

En el caso de la rejilla inclinada

$$\Delta n(x, y) = \Delta n \cos\left(\frac{4\pi}{\Lambda}(x \cos(\theta_b) + y \sin(\theta_b))\right) \quad (7)$$

Donde:

x, y son las coordenadas, λ es periodo de la rejilla y θ_b es el ángulo de inclinación

3.3 MÉTODO DE PROPAGACIÓN DEL HAZ

En la actualidad, varios sistemas utilizan transmisión óptica que aprovechan la tecnología de fibras de vidrio para la propagación de la luz mediante guías de ondas, para analizar el mismo se utiliza el método de propagación del haz (Beam Propagation method, BPM). Está es una técnica que permite una aproximación para simular la propagación de la luz en guías de ondas ópticas que varían lentamente, está fundamentada en ecuaciones diferenciales, conocidos como modelos unidireccionales. Estos modelos comprenden solo una derivada de primer orden en la variable z que representa el eje longitudinal de la guía de onda y se resuelven con un valor inicial, en el que no comprende el tiempo (Cabrera, 2009). 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 Diference).

Las fibras ópticas como guías de onda con geometría cilíndrica, utiliza un análisis de rayos que permiten obtener las condiciones las cuales se propaga un haz de luz dentro de una fibra óptica, como es la condición de propagación que establece una reflexión total interna (Veetikazhy et al., 2021). El análisis más formal se lleva a cabo mediante la óptica de ondas, en donde, al igual que en guías de onda dieléctricas, pueden encontrarse las soluciones que representarán los modos de propagación en la fibra óptica, para lo cual se necesita modelar, específicamente FBGs, permitiendo resolver la fórmula matemática en la que determina la ecuación de onda generada (J. E. Santos Correa, 2016).

En una guía de onda ideal los modos son ortogonales y no hay ningún mecanismo que permita el intercambio de energía entre ellos. Sin embargo, cuando la estructura de la guía presenta una perturbación se fuerza a un acoplamiento entre los modos.

En una estructura de guía que tiene una perturbación está se impulsa a un acoplamiento entre los modos, por lo que una guía de onda ideal sus modos son ortogonales (pares e impares) en la propagación de acuerdo como se muestra en la Figura 3.5



Figura 3.5 Modelo de FBG con dos modos de propagación a lo largo del eje Z

Las TFBG están inscritas como anillos circulares de fibra óptica cuya dependencia azimutal de los campos de modo son funciones sinusoidales, el efecto de polarización de la fuente surge debido a la inclinación. Los modos de vector completo se pueden clasificar en p y s, que corresponden a modos polarizados lineales en x e y en condiciones de guía débil, respectivamente, así para el n-ésimo y m-ésimo modo, los campos de modo se pueden escribir como (Wu, 2012)

$$e_{xm} = e_{rm}(r) \cos(\mu\phi), \quad h_{xm} = h_{rm}(r) \sin(\mu\phi) \quad (8)$$

$$e_{ym} = e_{\phi m}(r) \sin(\mu\phi), \quad h_{ym} = h_{\phi m}(r) \cos(\mu\phi) \quad (9)$$

$$e_{zm} = e_{zm}(r) \cos(\mu\phi), \quad h_{zm} = h_{zm}(r) \sin(\mu\phi) \quad (10)$$

donde $\mu = 0, 1, 2, \dots$ es el orden azimutal. Sean $\cos \rightarrow \sin$ y $\sin \rightarrow -\cos$ en la ecuación e_{xm} es la intensidad de campo en el eje x, e_{ym} es la intensidad de campo eléctrico en el eje y, e_{zm} es la intensidad de campo eléctrico en el eje z, r es el radio, h_{xm} es la intensidad de campo magnético en el eje x, h_{ym} es la intensidad de campo magnético en el eje y, h_{zm} es la intensidad de campo magnético en el eje z, como indican las ecuaciones (8), (9) y (10)

Las rejillas de fibra se pueden expandir en términos de los campos normalizados de potencia de los modos, entonces se logra obtener expresiones para los modos s y p, así en la ecuación (11) se utiliza un solo superíndice "p" para identificar los modos p/s, "+" denota los modos p y "-" denota los modos s.

$$E_t(r_t, z) = \sum_{p=\pm} \sum_n [R_n^p(z) + S_n^p(z)] e_n^p(r_t) \quad (11)$$

$$H_t(r_t, z) = \sum_{p=\pm} \sum_n [R_n^p(z) + S_n^p(z)] h_n^p(r_t) \quad (12)$$

Insertando la ecuación (12) en las ecuaciones de Maxwell y utilizando la ortogonalidad de los modos es decir, $\langle \mathbf{e}_m^p, \mathbf{h}_m^q \rangle = 0$ cuando $m \neq n$ o $p \neq q$,

$\langle \mathbf{e}, \mathbf{h} \rangle = 1/2 \iint (\mathbf{e} \times \mathbf{h}) \cdot \hat{z} dS$ podemos derivar la amplitud de la ecuación para

$a_m^p(z)$ como indica la ecuación (13) y (14):

$$\frac{da_m^p}{dz} - j\beta_m^p a_m^p = -j \sum_{p=\pm} \sum_n [R_{mn}^{pq} u_n^q + S_{mn}^{pq} v_n^q] \quad (13)$$

$$\frac{dv_m^p}{dz} - j\beta_m^p v_m^p = +j \sum_{p=\pm} \sum_n [R_{mn}^{pq} v_n^q + S_{mn}^{pq} u_n^q] \quad (14)$$

Los coeficientes de acoplamiento están dados de acuerdo a la ecuación (15) y (16)

$$R_{mn}^{pq} \approx \frac{\epsilon_0 \omega}{2 \langle e_{wm}^p, h_{wm}^p \rangle} \iint \bar{n}(r) P(r) \Delta n(z') \cdot (e_{wm}^p \cdot e_{wm}^q + e_{zm}^p \cdot e_{zm}^q) dS \quad (15)$$

$$S_{mn}^{pq} \approx \frac{\epsilon_0 \omega}{2 \langle e_{wm}^p, h_{wm}^p \rangle} \iint \bar{n}(r) P(r) \Delta n(z') \cdot (e_{wm}^p \cdot e_{wm}^q - e_{zm}^p \cdot e_{zm}^q) dS \quad (16)$$

donde $\bar{n}(r)$ es la distribución del índice de refracción de la fibra; $P(r)$ es la dependencia r de índice de modulación (e.g. $P(r) = 1$ dentro del área perturbada, $P(r) = 0$ fuera del área perturbada); $\Delta n(z')$ es la variación del índice en el núcleo de la fibra que viene dada por la Ecuación (17).

En la ecuación (15) y (16) se supone que la variación en el índice de refracción es pequeña en comparación con el índice de la fibra ideal (i.e. $\Delta n \ll \bar{n}$), lo cual es válido en redes prácticas de fibra óptica. La variación del índice en el núcleo de la fibra viene dada por

$$\Delta n(z) = \sigma(z) + 2S(z) \cos[2R(z + x \tan \theta_b) + \phi(z)] \quad (17)$$

donde $x = r \cos(\phi)$, $\sigma(z) = \bar{\sigma}(z \cos \theta_b)$, $S(z) = \bar{S}(z \cos \theta_b)$ y $\phi(z) = \bar{\phi}(z \cos \theta_b)$ describen la perturbación DC de variación lenta en el índice de refracción de fondo de la rejilla, así como la amplitud de la rejilla y el chirp, respectivamente. Dado que la longitud de la rejilla es mucho mayor que el diámetro del núcleo de la fibra y tiene variación lenta, puede aproximarse a $z' = z \cos(\theta_b) + x \sin(\theta_b) \approx z \cos(\theta_b)$

Sí se excita el primer modo por una fuente externa, e introduciendo nuevas variables $x(z)$, $x_n(z)$, $y(z)$, $y_n(z)$

$$x(z) = [u_1(z)\exp(+j\bar{\beta}_1 z)]\exp[+j\phi(z)/2] \quad (18)$$

$$y(z) = [v_1(z)\exp(-j\bar{\beta}_1 z)]\exp[-j\phi(z)/2] \quad (19)$$

$$x_n(z) = [u_n(z)\exp(+j\bar{\beta}_n z)]\exp[+j\phi(z)/2] \quad (20)$$

$$y_n(z) = [v_n(z)\exp(-j\bar{\beta}_n z)]\exp[-j\phi(z)/2] \quad (21)$$

Donde $n \neq 1$ en la ecuación (21) y $\bar{\beta}_n = \text{Re}(\beta_n)$. Actualmente, la variable de sustitución toma dos expresiones en las ecuaciones (27), (28), (29) y (30), respectivamente. Donde $[u_1(z)\exp(+j\bar{\beta}_1 z)]$ extrae los términos de rápida oscilación, $\exp[+j\phi(z)/2]$ simplifica las ecuaciones de modo acoplado. Insertar la ecuación (19) y (21) en la ecuación (13) y (14) manteniendo solo los términos emparejados de fase, la ecuación de amplitud para $x(z)$, $x_n(z)$, $y(z)$, $y_n(z)$, se derivan como se muestra en las ecuaciones (22),(23),(24) y (25)

$$\begin{aligned} \frac{dx}{dz} = & -j \sum_{n \neq 1} X_{1n}^- x(z)y_n(z)\exp[+j\Delta_n^+ Z] - j \sum_{n \neq 1} K_{1n}^- x(z)x_n(z)\exp[+j\Delta_n^- Z] \\ & - jk_1(z)x(z) - jX_{11}x(z)y(z)\exp[+j\Delta_1^+ Z] \end{aligned} \quad (22)$$

$$\begin{aligned} \frac{dy}{dz} = & +j \sum_{n \neq 1} X_{1n}^+ x(z)x_n(z)\exp[-j\Delta_n^+ Z] - j \sum_{n \neq 1} K_{1n}^- x(z)y_n(z)\exp[-j\Delta_n^- Z] \\ & + jk_1(z)x(z) - jX_{11}x(z)x(z)\exp[-j\Delta_1^+ Z] \end{aligned} \quad (23)$$

$$\begin{aligned} \frac{dx_n}{dz} = & -jk_n(z)x_n(z) - jX_{n1}^- x(z)y(z)\exp[+j\Delta_n^+ Z] \\ & - jK_{n1}^+ X(z)x(z)\exp[-j\Delta_n^- Z]\exp[+j\phi(z)] \end{aligned} \quad (24)$$

$$\begin{aligned} \frac{dy_n}{dz} = & +jk_n(z)y_n(z) + jX_{n1}^+ x(z)x(z)\exp[-j\Delta_n^+ Z] \\ & + jK_{n1}^- X(z)y(z)\exp[+j\Delta_n^- Z]\exp[-j\phi(z)] \end{aligned} \quad (25)$$

De las condiciones de acoplamiento de fase $\Delta_n^\pm \sim 0$, los acoplamientos en reflexión y transmisión son $\{x\} \leftrightarrow \{y, y_n\}$ y $\{x\} \leftrightarrow \{x_n\}$, respectivamente. Entonces, las ecuaciones pueden ser resueltas por integración numérica con el método de Runge-Kutta o transformado a ecuaciones en diferencias por BPM en el intervalo $\left[-\frac{L}{2}, +\frac{L}{2}\right]$ con una condición inicial $x\left(\frac{L}{2}\right) = 1, y\left(\frac{L}{2}\right) = y_n\left(\frac{L}{2}\right) = 0$ para transmitir TFBGs

$y \equiv 0, y_n \equiv 0$, las ecuaciones restantes para $x(z), x_n(z)$ puede ser resuelto en el intervalo $\left[-\frac{L}{2}, +\frac{L}{2}\right]$ con una condición inicial $x\left(\frac{L}{2}\right) = 1, x\left(\frac{L}{2}\right) = x_n\left(\frac{L}{2}\right) = 0$, donde L es longitud de rejilla, N es el número de modos utilizados en la expansión del campo.

4. MATERIALES Y METODOLOGÍA

Para obtener una representación matemática de las propiedades de la rejilla se utiliza la teoría de modos acoplados en donde la función exponencial de la Ecuación (4) modela la rejilla inclinada de Bragg (Few Mode Fiber-TFBG, FMF-TFBG) en la fibra óptica con amplitudes de las ondas incidentes y reflejadas, se utiliza el software Open Source BPM herramienta de código abierto Matlab V 1.1. para analizar los modos mediante el uso del método de BPM, observando la transición del índice de refracción de la FBG creada por la producción en la FO al usar la luz ultravioleta como muestra en la Figura 4.1. Los parámetros para el diseño de una FMF-TFBG son la longitud de onda resonante es $\lambda = 1546,2 \text{ nm}$, 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 $A = 0.0005$, la atenuación es $\alpha = 0.2 \text{ dB/m}$, radio del núcleo es $r_{\text{núcleo}} = 9\mu\text{m}$, $r_{\text{revestimiento}} = 72.5\mu\text{m}$, un variación de amplitud en el índice de refracción de $\Delta n_{Ac}(z) = 0.3$, un ángulo $\theta_b = 5^\circ$, logrando el retardo modal mediante el acoplamiento de modos.

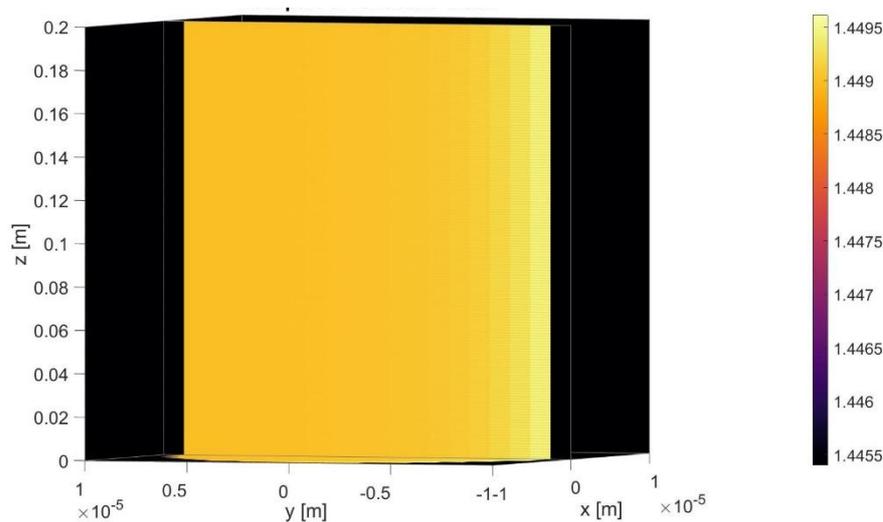


Figura 4.1 Parte real del índice de refracción en Y

5. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Los resultados obtenidos en el modelo matemático con los parámetros mencionados en el capítulo 4, al variar la amplitud en el índice de refracción de $\Delta n_{Ac}(z) = 0.1$ y el ángulo $\theta_b = 7.5^\circ$ se presentan en la *Figura 5.1*, donde se puede observar que al momento de ingresar LP11 en la fibra, el modo LP11 par (la línea de color amarillo) está con intensidad muy baja $10^{-15} [w/m^2]$ sin ningún acoplamiento, mientras que el modo LP11 impar (la línea de color naranja) sube totalmente, combinándose con LP01 (la línea de color azul) con una intensidad aproximadamente de $10^{-3} [w/m^2]$, provocando un acoplamiento débil, ya que LP11 impar debe bajar y LP01 debe subir para que puede existir la unión requerida.

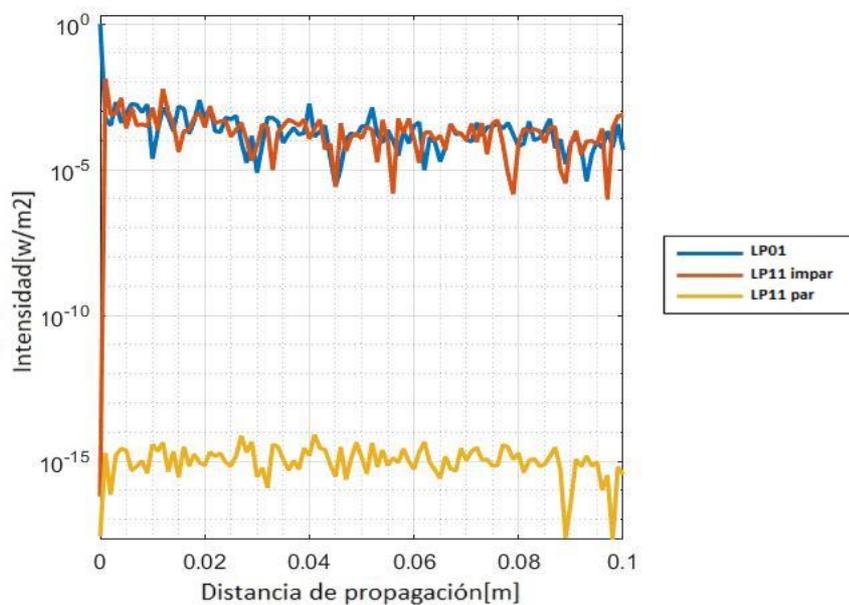


Figura 5.1 Modos superpuestos sin ningún acoplamiento.

De acuerdo a los parámetros en el capítulo 4, se realiza un cambio en la amplitud $\Delta n_{Ac}(z) = 0.3$ y el ángulo $\theta_b = 5^\circ$, se observa en la *Figura 5.2* en donde el modo LP11 impar al ingresar a la fibra su intensidad va aumentando, mientras que el modo LP01 va disminuyendo, en el cual se obtiene un acoplamiento mayor con una distancia de propagación 0.06 m e intensidad de $10^{-2.5} \text{ m}$, logrando una máxima transferencia de potencia.

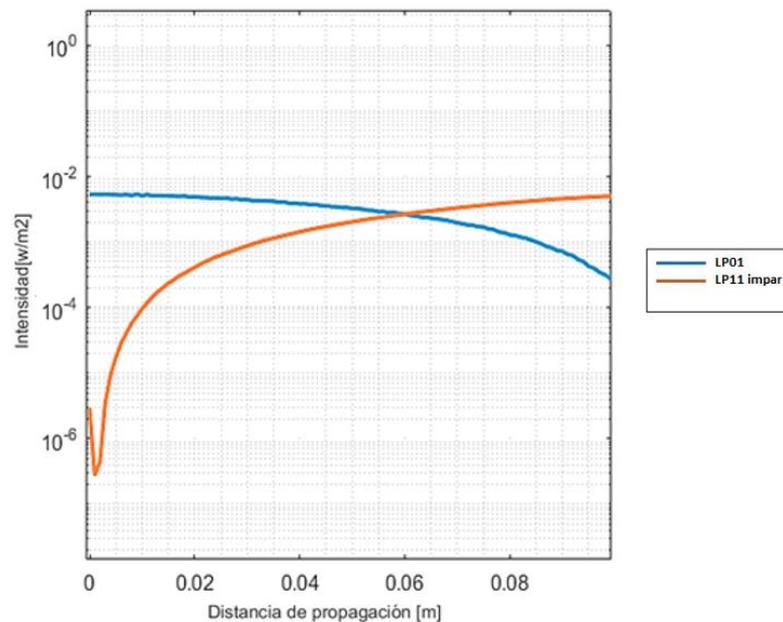


Figura 5.2 Modos superpuestos acoplamiento débil entre modos LP11 y LP01

Para caracterizar una rejilla Bragg inclinada FMF-TBGC se realizó pruebas de simulación con la variación de valores en la longitud de onda resonante, el perfil de índice de refracción perturbado, la variación de amplitud en el índice de refracción y ángulo, para obtener los valores adecuados logrando una máxima transferencia de potencia entre los modos

A continuación se varió el parámetro longitud de onda λ , para lo cual la potencia de transferencia se analizó en el rango de 1542 nm a 1548 nm , los resultados muestran un incremento en la potencia a medida que la longitud incrementa, hasta

un valor de 1546.2 nm , en cual existe una mayor transferencia de potencia entre los modos LP₀₁ y LP₁₁ impar, la potencia empieza a bajar en valores superiores del punto máximo, como se observa en la *Figura 5.3*

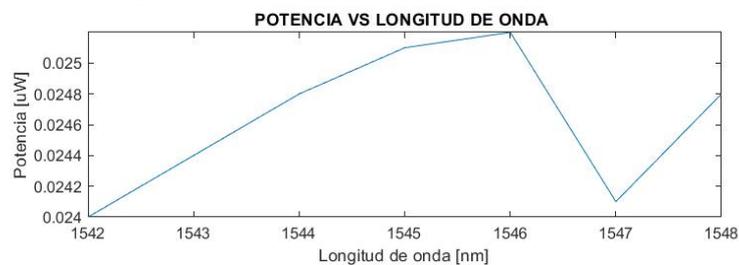


Figura 5.3 Potencia vs longitud de onda

Debido al cambio en la longitud de onda de trabajo, se procedió a encontrar el nuevo periodo de la rejilla, para ello se usó la ecuación (2) para diferentes longitudes de onda, como se observa en la *Figura 5.4*, obteniéndose el periodo de 1214.5 nm para la longitud de onda de máxima transferencia de potencia obtenida.

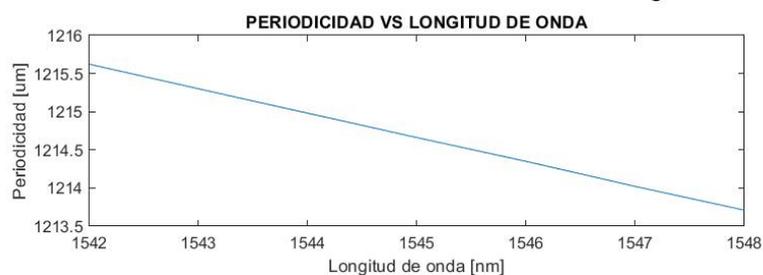


Figura 5.4 Periodo de la rejilla de Bragg vs longitud de onda

A continuación se varió el índice de refracción Δn_{AC} en un rango de 0 a 1, los resultados indican un incremento en la potencia a medida que el índice incrementa, el punto máximo es de 0.3, que indica la mayor cantidad de luz que se propaga a través de la fibra, valores mayores a este la potencia empieza a caer y a permanecer constante debido a que se reduce la velocidad de luz al travesar la FO, provocando un cambio de dirección, como indica la *Figura 5.5*.

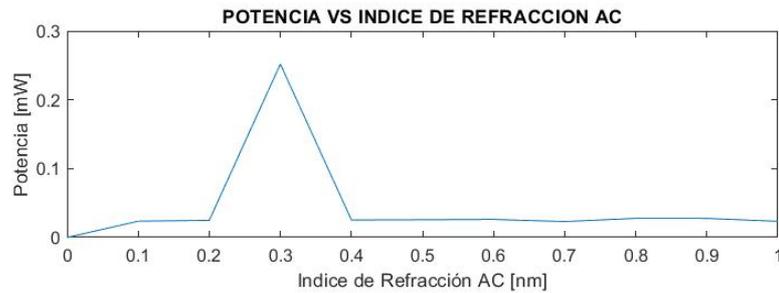


Figura 5.5 Variación de potencia vs índice de refracción de variación de amplitud

Luego, se procedió a variar el ángulo de inclinación de la rejilla, el resultado se muestra en la Figura 5.6, donde se observa que en 5° se tiene mayor transferencia de potencia, correspondiente a $0,025 \mu\text{W}$.

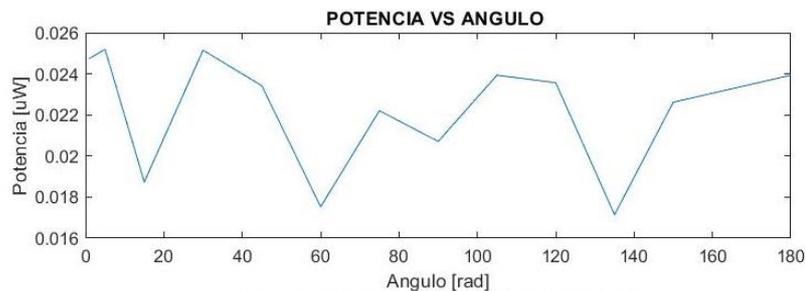


Figura 5.6 Potencia vs ángulo

Además, se realizó el análisis del efecto del ángulo de inclinación de la rejilla con respecto a la longitud de la FMF-TFBG. Se determinó que cuando $\theta_b < 5^\circ$ el acoplamiento es de menor intensidad, mientras que $\theta_b = 5^\circ$ el acoplamiento incrementa, mientras que si $\theta_b > 5^\circ$ el acoplamiento decrece, como se aprecia en la Figura 5.7. También se observó que la distancia de acoplamiento mínima se logra en la primera longitud de bateo de los modos y este depende del ángulo.

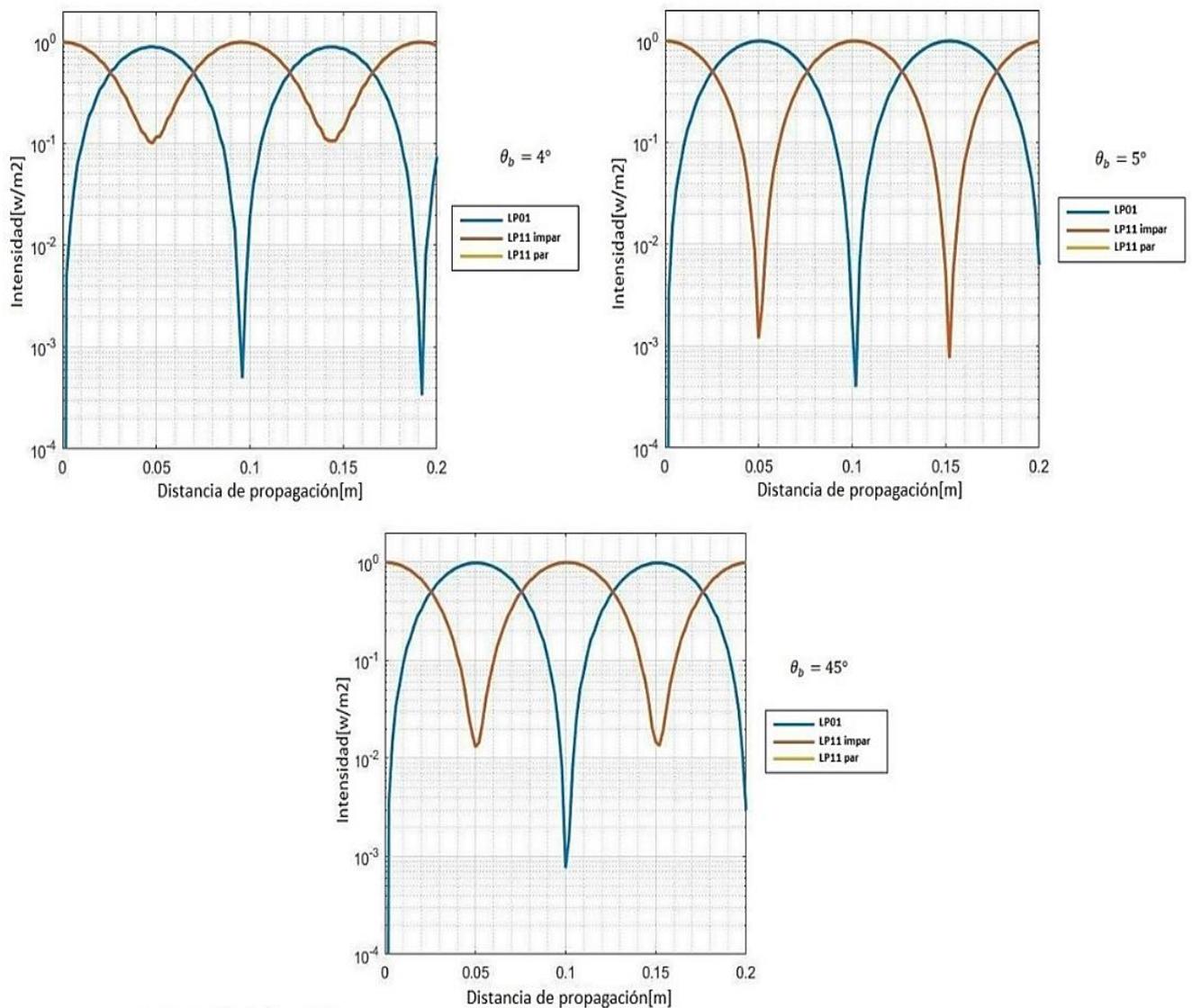


Figura 5.7 Conversión de modo LP11 a LP01 con ángulo de 4°, 5° y 45°

Con los valores antes encontrados, se simuló una rejilla con una distancia de 20 cm en la cual se ingresó el modo LP11 para demostrar su conversión al modo LP01. La Figura 5.8. muestra el acoplamiento de los modos a lo largo de la rejilla. Al inclinar los planos de la rejilla en relación con la perpendicular del eje de la fibra, resulta una perturbación periódica con la luz guiada por el núcleo, provocando que los campos eléctricos son no ortogonales, dando lugar a diferentes longitudes de bateo donde se produce una máxima conversión entre el modo LP11 impar con el fundamental LP01.

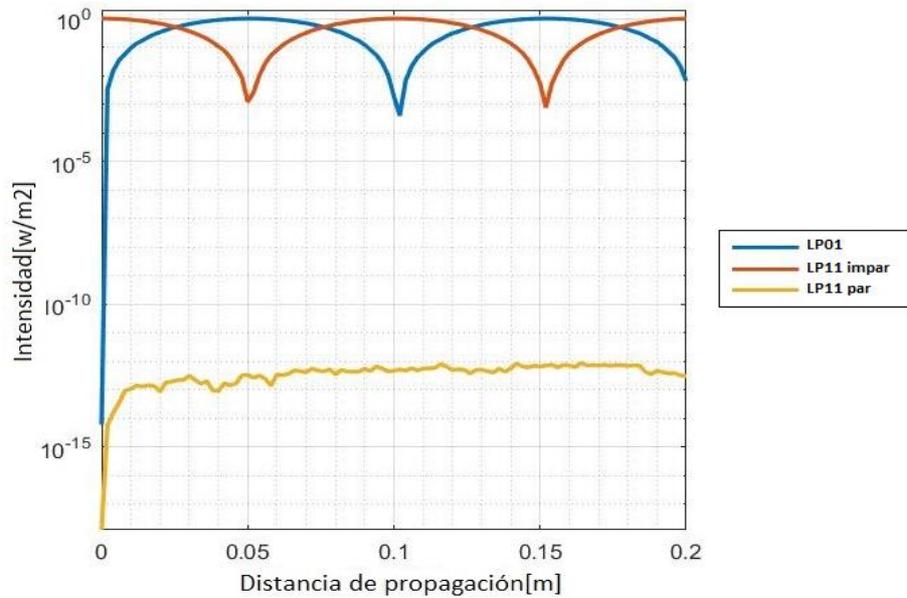


Figura 5.8 Conversión del modo LP11 impar al modo fundamental LP01

Debido a que la primera conversión se da a una longitud de bateo de 5 cm, y tiene la máxima transferencia de energía entre los modos LP11 y LP01, se toma esta longitud como la mínima para obtener una FMF-TFBG lo más pequeña posible. La Figura 5.9, muestra el proceso de conversión de los modos a lo largo de la rejilla diseñada.

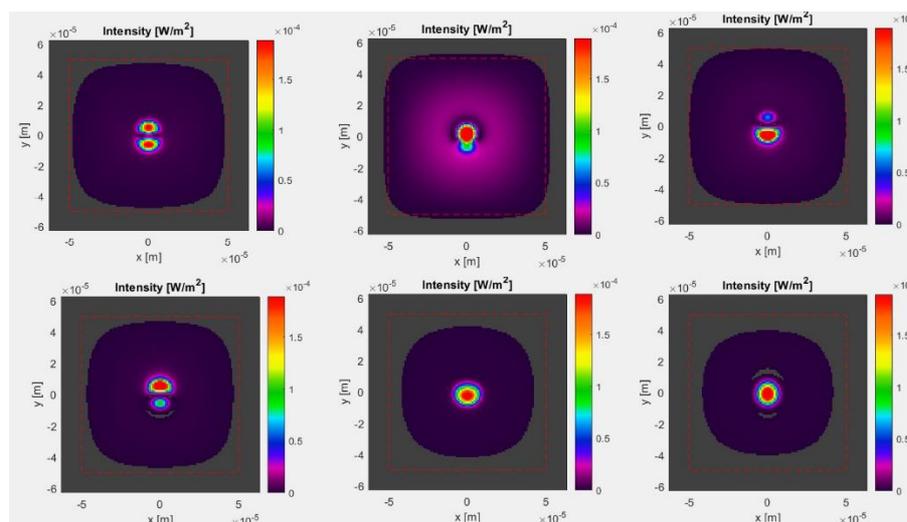


Figura 5.9 Conversión de modos LP11 a LP01 para parámetros optimizados para longitud de 5 cm de FMF-TFBG

6. CONCLUSIONES

Una rejilla Bragg de fibra inclinada (FMF-TFBG) fue diseñada de acuerdo a los parámetros indicados en el capítulo 4, con la ayuda de la herramienta BPM-MATLAB, se demostró que la transferencia de energía depende del ángulo de la rejilla, porque existe un acoplamiento más fuerte, a medida que aumenta el ángulo de inclinación el modo fundamental LP01 y el modo superior LP11 su conversión es más lenta y por ende se va a tener más pérdidas, lo que indica que la característica de la rejilla se ve afectada por las variaciones de los ángulos de inclinación. Para obtener la mayor cantidad de energía transformada de LP11 a LP01, los parámetros adecuados son la distancia de 0.05 mm con una longitud de onda $\alpha = 1545,2 \text{ nm}$, el índice de refracción de $\Delta n_{Ac}(z) = 0.3$ y un ángulo $\theta_b = 5^\circ$, logrando compensar el retardo modal diferencial de una MMF, mejorando la potencia al colocar el filtro modal que permite mejorar las redes que utilizan fibra multimodo, permitiendo que este artículo estimule a más investigaciones sobre la TFBG como sus componentes y aplicaciones

REFERENCIAS

- Acuña Herrera, R. (2014). *Redes de Bragg: fabricación, caracterización y aplicaciones*.
- Albert, J., Shao, L. Y., & Caucheteur, C. (2013). Tilted fiber Bragg grating sensors. *Laser and Photonics Reviews*, 7(1), 83–108. <https://doi.org/10.1002/lpor.201100039>
- Asesor, A. S., & Barmenkov, I. (2016). *2006 11510*.
- Cabrera, A. G. (2009). *Estudio de las rejillas de Bragg grabadas en fibra dopada con tierras raras*.
- Dong, L., Ortega, B., & Reekie, L. (2018). Coupling characteristics of cladding modes in tilted optical fiber Bragg gratings. *Applied Optics*, 37(22), 5099. <https://doi.org/10.1364/ao.37.005099>
- Falih, S. R. A. T. A. (2017). Design and Simulation of Fiber Bragg Grating by Comsol Multiphysics Software. *Int. J. Sci. Res.*, 6(5), 2085–2095. <https://doi.org/10.21275/ART20173865>
- J. Albert, L. Y. Shao, and C. Caucheteur, “Tilted fiber Bragg grating sensors,” *Laser Photonics Rev.*, vol. 7, no. 1, pp. 83–108, 2013, doi: 10.1002/lpor.201100039.
- Lee, K. S., & Erdogan, T. (2011). 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>
- L. Dong, B. Ortega, and L. Reekie, “Coupling characteristics of cladding modes in tilted optical fiber Bragg gratings,” *Appl. Opt.*, vol. 37, no. 22, p. 5099, 1998, doi: 10.1364/ao.37.005099.
- OPTICAL FIBRE BRAGG GRATING ANALYSIS THROUGH FEA AND ITS APPLICATION TO PRESSURE SENSING NITHILA DEDIYAGALA*. (n.d.).
- Shen, J., Ji, Q., Zhang, Y., Ruan, X., Cai, Z., & Li, Z. (2018). Theoretical Design of Band Pass Filter Utilizing Long Period Fiber Grating Having Cladding Refractive Index Perturbation. *Automatic Control and Computer Sciences*, 52(6), 489–495. <https://doi.org/10.3103/S014641161806010X>
- T. Erdogan and J. E. Sipe, “Tilted fiber phase gratings,” *J. Opt. Soc. Am. A*, vol. 13, no. 2, p. 296, 1996, doi: 10.1364/josaa.13.000296.
- 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>
- Vieira, J., Paixão, T., Antunes, P., Facão, M., & Rocha, A. M. (2021). Modelling, fabrication and characterization of long period gratings inscribed by femtosecond laser. *Optik*, 229(January). <https://doi.org/10.1016/j.ijleo.2021.166283>
- 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>
- Yang, J., Tao, C., Li, X., Zhu, G., & Chen, W. (2011). Long-period fiber grating sensor with a styrene-acrylonitrile nano-film incorporating cryptophane A for methane detection. *Optics Express*, 19(15), 14696. <https://doi.org/10.1364/oe.19.014696>

- Zhang, X. Y., Chen, C., Yu, Y. Sen, Wei, W. H., Guo, Q., Chen, Y. Y., Zhang, X., Qin, L., Ning, Y. Q., & Sun, H. B. (2018). High-Order-Tilted Fiber Bragg Gratings with Superposed Refractive Index Modulation. *IEEE Photonics Journal*, 10(1), 1–8. <https://doi.org/10.1109/JPHOT.2017.2784818>
- Zhao, J. (2011). *An Object-oriented Simulation Program for Fibre Bragg Gratings*. October, 316.

