



**UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA**  
**SEDE QUITO**  
**CARRERA DE TELECOMUNICACIONES**

**DISEÑO DE UNA REJILLA DE BRAGG CON DESPLAZAMIENTO DE FASE  
MEDIANTE EL ALGORITMO DE BÚSQUEDA ARMÓNICA**

Trabajo de titulación previo a la obtención del  
Título de Ingenieros en Telecomunicaciones

**AUTORES:** LUIS ADRIÁN PEÑA PACHACAMA  
GABRIELA ALEXANDRA MONTENEGRO MARTÍNEZ

**TUTOR:** MILTON NAPOLEÓN TIPÁN SIMBAÑA

Quito-Ecuador  
2022

## CERTIFICADO DE RESPONSABILIDAD Y AUTORÍA DEL TRABAJO DE TITULACIÓN

Nosotros, Luis Adrián Peña Pachacama con documento de identificación N° 1724685936 y Gabriela Alexandra Montenegro Martínez con documento de identificación N° 0401628466; manifestamos que:

Somos los autores y responsables del presente trabajo; y, autorizamos a que sin fines de lucro la Universidad Politécnica Salesiana pueda usar, difundir, reproducir o publicar de manera total o parcial el presente trabajo de titulación.

Quito, 2 de septiembre del año 2022

Atentamente,



---

Luis Adrián Peña Pachaca  
1724685936



---

Gabriela Alexandra Montenegro Martínez  
0401628466

## **CERTIFICADO DE CESIÓN DE DERECHOS DE AUTOR DEL TRABAJO DE TITULACIÓN A LA UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA**

Nosotros, Luis Adrián Peña Pachacama con documento de identificación No. 1724685936 y Gabriela Alexandra Montenegro Martínez con documento de identificación No. 0401628466, expresamos nuestra voluntad y por medio del presente documento cedemos a la Universidad Politécnica Salesiana la titularidad sobre los derechos patrimoniales en virtud de que somos autores del artículo académico : “Diseño de una rejilla de Bragg con desplazamiento de fase mediante el algoritmo de búsqueda armónica”, el cual ha sido desarrollado para optar por el título de: Ingenieros en Telecomunicaciones, en la Universidad Politécnica Salesiana, quedando la Universidad facultada para ejercer plenamente los derechos cedidos anteriormente.

En concordancia con lo manifestado, suscribimos este documento en el momento que hacemos la entrega del trabajo final en formato digital a la Biblioteca de la Universidad Politécnica Salesiana.

Quito, 2 de septiembre del año 2022

Atentamente,



---

Luis Adrián Peña Pachacama  
1724685936



---

Gabriela Alexandra Montenegro Martínez  
0401628466

## **CERTIFICADO DE DIRECCIÓN DEL TRABAJO DE TITULACIÓN**

Yo, Milton Napoleón Tipán Simbaña con documento de identificación N° 1713583126 docente de la Universidad Politécnica Salesiana, declaro que bajo mi tutoría fue desarrollado el trabajo de titulación: DISEÑO DE UNA REJILLA DE BRAGG CON DESPLAZAMIENTO DE FASE MEDIANTE EL ALGORITMO DE BÚSQUEDA ARMÓNICA realizado por Luis Adrián Peña Pachacama con documento de identificación N° 1724685936 y por Gabriela Alexandra Montenegro Martínez con documento de identificación N° 0401628466, obteniendo como resultado final el trabajo de titulación bajo la opción artículo académico que cumple con todos los requisitos determinados por la Universidad Politécnica Salesiana.

Quito, 2 de septiembre del año 2022

Atentamente,



---

Ing. Milton Napoleón Tipán Simbaña, MSc.  
1713583126

## DEDICATORIA

El presente artículo académico principalmente se lo dedico a mi amada madre Inés Martínez(+) que desde el cielo siempre me cuida y me guía para que todo salga bien y a mi abuelita Isabel Pabón que me termino de cuidar con todo su amor , ya que ellas fueron mi pilar fundamental para culminar mi carrera ; a mi papá , hermano y cuñada por brindarme su amor y apoyo incondicional y nunca me dejaron sola inculcándome los valores familiares enseñándome que a pesar de los problemas siempre hay que salir adelante con más ganas y motivación .

Gabriela Alexandra Montenegro Martínez

Este trabajo de titulación está dedicado para mis padres Luis Peña y María Pachacama quienes han estado pendientes de cada uno de los pasos que he dado en mi vida y son la inspiración para seguir adelante. Para mi hermana, mis tíos, primos y abuelos que con sus palabras de confianza y cariño me han ayudado a continuar en mi proceso de aprendizaje. Y una especial dedicatoria para mi abuelito Mariano Pachacama, que, aunque ya no me acompaña físicamente sé que está al pendiente de mí y me guía para que todo me salga bien.

Luis Adrián Peña Pachacama

## AGRADECIMIENTO

Nuestro más sincero agradecimiento a Dios por bendecirnos y guiarnos a lo largo de nuestra carrera profesional y vida personal.

A la Universidad Politécnica Salesiana por habernos aceptado, ser parte de ella y abrirnos sus puertas para seguir nuestra carrera, así como también a todos nuestros docentes por brindarnos sus sabios y amplios conocimientos, junto con su apoyo para culminar cada etapa de la misma.

A nuestro tutor por brindarnos su apoyo incondicional y su ayuda diaria siendo una guía para la finalización de nuestro proyecto de investigación.

A nuestros familiares por su amor y apoyo incondicional, siendo una parte fundamental de inspiración para la culminación de esta meta.

Gabriela Alexandra Montenegro Martínez

Luis Adrián Peña Pachacama

# DISEÑO DE UNA REJILLA DE BRAGG CON DESPLAZAMIENTO DE FASE MEDIANTE EL ALGORITMO DE BÚSQUEDA ARMÓNICA

## DESIGN OF A PHASE-SHIFTED BRAGG GRATING USING THE HARMONIC SEARCH ALGORITHM

Luis A. Peña<sup>1</sup>, , Gabriela A. Montenegro<sup>2</sup>, , Milton N. Tipán<sup>3</sup>, 

### Resumen

En este artículo una rejilla de Bragg de fibra con cambio de fase es diseñada, usando el método de la matriz de transferencia y optimizada mediante el algoritmo de búsqueda armónica para reducir los lóbulos secundarios de su espectro, para ello una caracterización de los parámetros de la rejilla y del algoritmo son realizados. Los resultados muestran una mejora de aproximadamente 12 veces en la función de costo.

**Palabras clave:** Algoritmo de Búsqueda Armónica, Metaheurística, Optimización, PS-FBG.

### Abstract

In this article a phase-shifted fiber Bragg grating is designed, using the transfer matrix method and optimized by the harmonic search algorithm to reduce the secondary data lobes of its spectrum, for this a characterization of the parameters is the grid and of the algorithm are made. The results show an improvement of approximately twelvefold in the cost function.

**Keywords:** Harmony Search Algorithm, Metaheuristic, Optimization, PS-FBG.

---

<sup>1</sup> Carrera de Telecomunicaciones, Universidad Politécnica Salesiana, Quito, Ecuador, email: lpenap@est.ups.edu.ec

<sup>2</sup> Carrera de Telecomunicaciones, Universidad Politécnica Salesiana, Quito, Ecuador, email: gmontenegrom1@est.ups.edu.ec

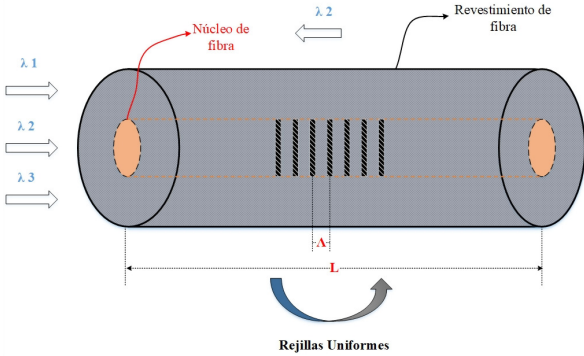
<sup>3</sup> Carrera de Telecomunicaciones, Universidad Politécnica Salesiana, Quito, Ecuador, email: mtipans@ups.edu.ec

## 1. Introducción

Dentro del campo de la comunicación y la detección a través de sensores se encuentra la rejilla de Bragg de fibra (Fiber Bragg Grating, FBG), una de las tecnologías que ha ido en crecimiento y avance [1–3]. La FBG tiene una perturbación periódica de su índice de refracción en el núcleo, lo que genera un elevado patrón de interferencia óptica, de esta manera esta rejilla es un elemento óptico pasivo que puede transmitir y reflejar diferentes ondas de manera selectiva en ciertas longitudes [4]. La longitud de onda reflejada, también conocida como la longitud de onda de Bragg viene dada por la Ec 1. [5]:

$$\lambda_b = 2n_{eff}\Lambda \quad (1)$$

Donde  $\lambda_b$  es la longitud de onda de Bragg,  $n_{eff}$  es el índice de refracción efectivo en el núcleo de la fibra y  $\Lambda$  es el período de la rejilla. En la Figura 1 se muestra el principio de funcionamiento básico de una FBG en la cual  $\lambda_b = \lambda_2$  [5].



**Figura 1.** Principio de la rejilla de Bragg de fibra.

En la actualidad, las FBG son utilizadas para la compensación de los efectos no lineales de la dispersión en las redes de fibra óptica y la generación de multiplexación por división de longitud de onda ultradensas (Ultra Dense Wavelength Division Multiplexing, UDWDM) que se usarán en gran parte de infraestructuras de telecomunicaciones. Sin embargo, las FBG uniformes generan potencias grandes de lóbulos laterales, lo que genera interferencias en las señales que se transmiten ya que se encuentran cercanas, en especial en receptores ópticos [6] [2] [7].

Para solventar el problema, se han desarrollado diferentes técnicas como la de apodización, la cual consiste en variar el índice de refracción usando alguna función, entre ellas se tiene la apodización pura automática a través de una máscara de fase, una máscara de fase con eficiencia de difracción variable [8], interferometría de pulso UV en las extremidades de la FBG [9],

apodización y en una FBG con chirp linealmente (Linearly Chirped Fiber Bragg Gratings, LCFBG) [10] [11].

Del mismo modo algoritmos de optimización, heurísticas y metaheurísticas han sido aplicados, así la implementación de un algoritmo diferencial basado en capas demuestra ser efectivo en el diseño de algunos dispositivos FBG no uniformes [12], la implementación de la metaheurística de enjambre de partículas de comportamiento cuántico fue usado en la reconstrucción del espectro de una FBG [13] y un algoritmo de automatización con enfoque teórico en la apodización de la luz que destaca el poder de reflectividad [14]. Así también, el algoritmo búsqueda armónica (Harmonic Search Algorithm, HSA) ha demostrado tener varias ventajas como la rapidéz y reducción de parámetros en la configuración, el método se probó en una FBG bajo tensión axial uniforme, con resultados teóricos viables para la optimización del espectro [15].

Este artículo propone el uso del HSA para reducir el tamaño de los lóbulos laterales que se encuentran alrededor del lóbulo principal en el espectro de reflexión de la señal producida por una rejilla de Bragg de fibra con cambio de fase (Phase Shifted Fiber Bragg Grating, PS-FBG).

En lo que resta del artículo se ha dividido. En la sección 2, el método de matrices para la PS-FBG, el algoritmo de búsqueda armónica y la configuración de la simulación son presentados. La sección 3, presenta los resultados y el análisis de los mismos. Finalmente, en la sección 4, las conclusiones.

## 2. Materiales y Métodos

### 2.1. Método de matriz de transferencia para una PS-FBG

En este primer paso, para que los valores continuos tomen valores discretos, se usa como punto de partida la conocida matriz de transferencia  $\Gamma$  de una rejilla de Bragg, que conecta los campos  $[E(z); R(z)]$  en el punto  $z$  con los campos iniciales  $[E(0); R(0)]$ , como en la Ec 3 y Ec 4. Se sabe también que  $\Lambda$  es el período de la FBG como se muestra en la Figura 1 y en la Ec 2 se describe los coeficientes de acoplamiento sobre estos dos modos que se encuentran en la red [16].

$$\delta = \sqrt{j^2 - \alpha^2} \quad (2)$$

Siendo:

- $\delta$ : Coeficiente de acoplamiento archivados en la red.
- $j$ : Constante de propagación hacia adelante.
- $\alpha$ : Constante de propagación hacia atrás.

$$\Gamma = \begin{bmatrix} \cosh(\delta z) - \frac{i\Delta\alpha}{\delta} \sinh(\delta z) & -\frac{i j}{\delta} \sinh(\delta z) \\ \frac{i j}{\delta} \sinh(\delta z) & \cosh(\delta z) + \frac{i\Delta\alpha}{\delta} \sinh(\delta z) \end{bmatrix} \quad (3)$$



$$\begin{bmatrix} E(z) \\ R(z) \end{bmatrix} = \Gamma \begin{bmatrix} E(0) \\ R(0) \end{bmatrix} \quad (4)$$

Donde:

$E$  y  $R$ : Campos iniciales.

$z$ : Longitud del índice de refracción de la FBG.

$\Gamma$ : Matriz de transferencia para cada sección, la cual conecta dos campos sobre campos de propagación hacia adelante y hacia atrás antes de cada sección.

$j$ : Constante de propagación hacia adelante.

$\alpha$ : Constante de propagación hacia atrás.

$\cosh(\delta z)$ ,  $\sinh(\delta z)$ : Ángulos de incidencia con respecto a los coeficientes de acoplamiento y longitud de la fibra.

En la Ec 5, y siguiendo el proceso  $\Gamma_{total}$ , muestra la matriz de transferencia de todo el FBG, la cual se describe como en la Ec 6.

$$\begin{bmatrix} Ei(z) \\ Ri(z) \end{bmatrix} = \Gamma_i \begin{bmatrix} Ei(z - \Delta) \\ Ri(z - \Delta) \end{bmatrix} \quad (5)$$

$$\Gamma_{total} = \Gamma_1 \Gamma_2 \cdots \Gamma_{N-1} \Gamma_N = \begin{bmatrix} \Gamma_{11} & \Gamma_{12} \\ \Gamma_{21} & \Gamma_{22} \end{bmatrix} \quad (6)$$

Siendo:

$N$ : Posición en la que se encuentran los factores internos de la matriz.

$\Gamma_i$ : Matriz de transferencia para la  $i$ -ésima sección.

Ahora bien, si incluimos puntos de desfase múltiples en la entrada de la fibra óptica, se puede describir la matriz desfasada como en la Ec 7 y por tanto la matriz de transferencia de una FBG de fase podría escribirse como  $\Gamma'$  en la Ec 8 [17].

$$\Gamma_{\Phi}^k = \begin{bmatrix} \exp(\frac{-i\phi_i}{2}) & 0 \\ 0 & \exp(\frac{i\phi_i}{2}) \end{bmatrix} \quad (7)$$

Donde:

$\Gamma_{\Phi}^k$ : Valor de cambio de fase, la cual describe la matriz de cambio de fase por medio de componentes  $i$ -ésimos de cada sección.

$$\begin{aligned} \Gamma' &= \Gamma_1 \Gamma_2 \cdots \Gamma_{i-1} \Gamma_{\Phi}^k \Gamma_i \cdots \Gamma_{n-1} \Gamma_{\Phi}^k \Gamma_n \cdots \Gamma_{N-1} \Gamma_N \\ &= \begin{bmatrix} \Gamma'_{11} & \Gamma'_{12} \\ \Gamma'_{21} & \Gamma'_{22} \end{bmatrix} (N > n > i > 1, \Phi > 1) \end{aligned} \quad (8)$$

Donde:

$\Gamma'$ : Matriz de transferencia de cambio de fase aleatorio  
 $\Gamma'_{11}, \Gamma'_{12}, \Gamma'_{21}, \Gamma'_{22}$ : Parámetros de la matriz de transferencia

## 2.2. Metaheurística de búsqueda armónica

El Algoritmo de Búsqueda Armónica (Harmony Search Algorithm, HSA) es una metaheurística que imita el proceso de improvisación musical. Además, establece un modelo numérico para obtener un arreglo por debajo del par o un arreglo casi perfecto dentro del tiempo limitado. La improvisación del cálculo de HSA es actualizar la memoria según la variedad del número arbitrario, cambio de tono y cálculo de variedad arbitraria [18]. Es una técnica de consulta arbitraria mundial. Sea como fuere, el cálculo HSA en sus variaciones también tienen algunas debilidades, como la memoria en el límite de control, la discapacidad visual de mirar, la baja tasa de unión y la propensión a deteriorarse [19].

El HSA es un algoritmo metaheurístico debido a que cuenta con estrategias para diseñar o mejorar los procedimientos heurísticos con miras a obtener un alto rendimiento, este algoritmo fue propuesto por Geem et al. en el 2001 [19] [20]. El desarrollo de la programación del HSA puede ser reducido de esta forma:

---

**Algoritmo 1** Algoritmo de Búsqueda Armónica [21], [19]

---

**Paso 1:**

Establecer los parámetros HMS, HMCR, PAR y  $k$ .

**Paso 2:**

Inicio de la búsqueda armónica.

Cálculo del valor de cada vector solución en la en la función objetivo.

**Paso 3:**

Se improvisa una nueva armonía(solución):

**For**  $j=1$  to  $NI$  **do**

**if**  $\text{rand}() \leq \text{HMCR}$

$X_{j\text{new}} = X_{jr}, (r \in \{1, 2, \dots, \text{HMS}\})$  **if**  $\text{rand}() \leq \text{PAR}$  **then**  
 $X_{j\text{new}} = X_{j\text{new}} + \text{bw} \times \text{rand}$   
 Adjustment

**else**

|  $X_{j\text{new}} = X_{jL} + \text{rand} \times (X_{jU} - X_{jL})$

**end**

**endFor**

**Paso 4:**

Actualizar HM,

**Paso 5:**

Si el número de iteraciones es finalizado,

el mejor vector solución en HM es localizado,

de otra manera regresar al paso 3.

---

El HSA original funciona como se indica anteriormente, hay que tomar en cuenta los siguientes parámetros especificados en este paso: El tamaño de memoria de armonía (Harmony Memory Size , HMS) el cual define una cantidad de elementos cuyo mejor desarrollo en el proceso de optimización pueden ser almacenados en la utilidad para el proceso de evolu-

ción; memoria de armonía teniendo en cuenta la tasa (Harmony Memory Considering the Rate, HMCR) este parámetro es la representación probabilística de construir un levantamiento actualizado a partir de los elementos que se han almacenado en la memoria de armonía (HM); tasa de ajuste de tono (Pitch Adjustment Rate, PAR) el cual fija la probabilidad de regresar a cambiar una solución que ya fue generada; y el número de improvisaciones ( $k$ ), o criterio de parada, [18], en este caso definido por el número de iteraciones (Number of Iterations, NI).

### 2.3. Configuración de la optimización de la PS-FBG

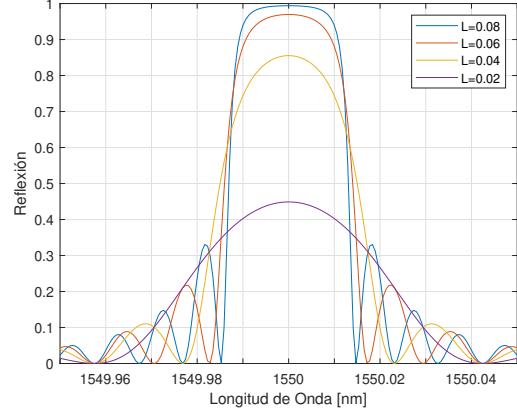
Una PS-FBG fue simulada en Matlab R2021b, por medio de TMM tomando en cuenta que la fabricación está realizada sobre una fibra óptica SMF-28, a una longitud de onda de trabajo de  $1550nm$ , el diámetro del núcleo es de  $8,2\mu m$  y posee un  $n_{eff}$  de 1,4682 [22]. Con el fin de reducir los lóbulos laterales se colocó un nivel de referencia de la potencia de los lóbulos laterales  $Plob_{ref}$  para una longitud de referencia  $L_{Ref}$ , lo que da un espectro de referencia  $Espec_{ref}$ , que permitirá verificar el funcionamiento adecuado de la metaheurística HSA, según la función de optimización  $f_{cost}$ , dada en la Ec 9, la cual es el error relativo entre la potencia del lóbulo lateral de referencia y la simulada  $Plob_{sim}$ .

$$\min f_{cost} = \left| \frac{Plob_{sim} - Plob_{ref}}{Plob_{ref}} \right| \quad (9)$$

Para lo cual, los parámetros iniciales del algoritmo de optimización utilizados fueron HMS=15, HMCR=0,95 y PAR=0,25, donde  $Plob_{sim}$  depende del ángulo de fase, la longitud de la rejilla y la variación del índice de refracción efectivo ( $\Phi, L, \Delta n_{eff}$ ) de la PS-FBG. Estos parámetros fueron evaluados para saber cuál de ellos afecta en mayor medida a la potencia de los lóbulos laterales y mantiene el espectro simétrico. Luego los parámetros HMS, HMCR y PAR fueron caracterizados mediante un análisis estadístico para obtener un mejor desempeño del algoritmo.

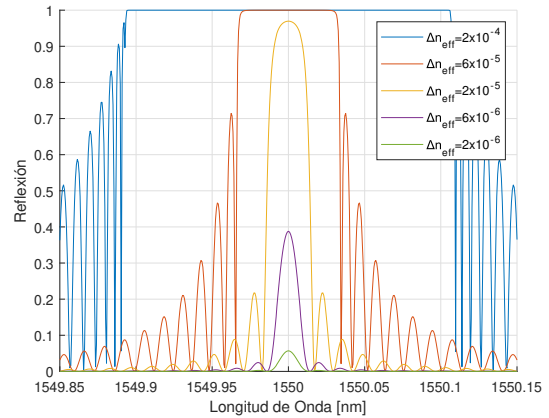
## 3. Resultados y Discusión

En primer lugar se procedió a la caracterización de los parámetros de la PS-FBG, mediante la variación de  $L$  entre 0.02 hasta 0.08 metros, rango donde se apreciaba el efecto que tenía sobre el espectro; los parámetros del desfase  $\Phi$  se mantuvo en 0 y  $\Delta n_{eff} = 2 \times 10^{-5}$ , un crecimiento en potencia del lóbulo principal y los secundarios en el espectro es observado en la Figura 2, además se mantiene la forma simétrica de su espectro.



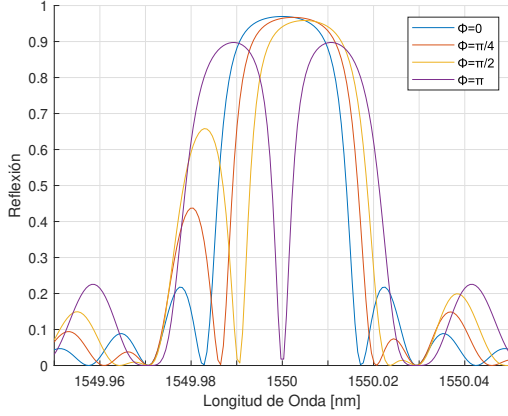
**Figura 2.** Variación de la longitud de la rejilla ( $L$ ) con:  $\Phi = 0rad$  y  $\Delta n_{eff} = 2 \times 10^{-5}$

Luego, se procedió a cambiar el  $\Delta n_{eff}$  entre los valores  $2 \times 10^{-5}$  hasta  $2 \times 10^{-6}$ , manteniendo  $\Phi = 0rad$  y  $L = 0.06m$ , este último para que el espectro no este saturado. Un incremento rápido en la amplitud de los lóbulos principal y laterales del espectro es observado, así como un desplazamiento del mismo en la longitud de onda de trabajo lo que no mantiene el espectro simétrico, esto es mostrado en la Figura 3.



**Figura 3.** Variación del  $\Delta n_{eff}$  con:  $\Phi = 0rad$  y  $L = 0.06m$

Entonces, se varía  $\Phi$  para los valores en radianes de  $0rad$  hasta  $\pi rad$ , manteniendo  $\Delta n_{eff} = 2 \times 10^{-5}$  y  $L = 0.06m$  para evitar la saturación de la PS-FBG como se observa en la Figura 4. Un desplazamiento del espectro hacia la derecha se mantiene para  $0 rad < \Phi < \pi rad$ , sin embargo en  $\Phi = \pi rad$  el espectro se divide en la mitad, esto implica que el uso del espectro reflectivo actuará como filtro óptico elimina banda, manteniendo simétrico el espectro.

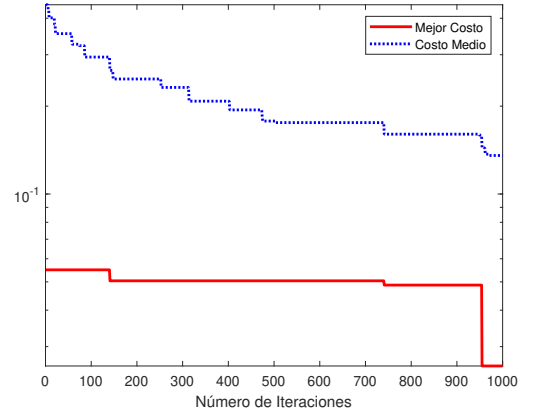


**Figura 4.** Cambio de fase con:  $\Delta n_{eff} = 2 \times 10^{-5}$  y  $L = 0,06m$

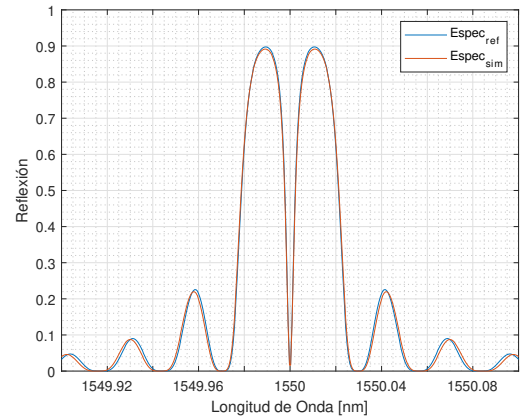
Lo anterior, nos conduce a elegir la longitud de la PS-FBG, como parámetro de control de la potencia del lóbulo lateral para utilizarlo como filtro elimina banda, manteniendo  $\Delta n_{eff} = 2 \times 10^{-5}$  y  $\Phi = \pi rad$ , ya que con  $\Phi = 0 rad$  se tendría una FBG uniforme.

### 3.1. Aplicación del algoritmo HSA en la optimización de los lóbulos laterales

Para la optimización de los lóbulos laterales secundarios de la PS-FBG se genera un espectro de referencia con una longitud de la regilla de  $L = 0,06 m$ ,  $\Delta n_{eff} = 2 \times 10^{-5}$  y  $\Phi = \pi rad$  dando un valor de  $Plob_{ref} = 0,2254$ , usando los parámetros iniciales del algoritmo HSA se obtiene un  $Plob_{sim} = 0,2196$  y una  $L_{sim} = 0,05905 m$ , cuya estimación de la longitud es deficiente debido a que la función de costo alcanza aproximadamente  $1,2 \times 10^{-2}$ , como se observa en la Figura 5 (a), esto hace que el espectro de referencia y el simulado no coincidan adecuadamente observándose una discrepancia en la Figura 5 (b) en los espectros. Para mejorar el proceso de optimización, se procede a la caracterización de los parámetros HMS, HMCR y PAR del HSA. Para ello se varió cada uno de los parámetros tomando diferentes valores y ejecutando el programa 10 veces para cada valor con 1000 iteraciones cada uno, seleccionando un rango de estudio según [15] [23].



(a)



(b)

**Figura 5.** PS-FBG sin caracterización (a) costo y (b) espectro

Los resultados fueron evaluados mediante estadística descriptiva usando los parámetros del promedio, la desviación estándar y la varianza para las diez longitudes obtenidas luego de la simulación por cada valor de los parámetros HSA. La caracterización comienza con la variación del HMS, tomando valores desde 5 hasta 14, manteniendo el resto de los parámetros con los valores iniciales HMCR=0,95 y PAR=0,25. Los resultados se muestra en la Tabla 1 donde se observa que 12 es el valor que hace que se aproxime más al valor de longitud de referencia.

**Tabla 1.** Efecto del HMS en el HSA

HMS	Promedio	Desviación Estándar	Varianza
5	0,05992465	0,00059101	0,000000349
6	0,060147781	0,000662231	0,000000439
7	0,059676402	0,001017668	0,00000104
8	0,060068045	0,000338018	0,000000114
9	0,059512181	0,000720044	0,000000518
10	0,059955342	0,000966767	0,000000935
11	0,06006585	0,000680036	0,000000462
12	0,059808917	0,00033443	0,000000112
13	0,059596202	0,001005515	0,00000101
14	0,060100024	0,000669789	0,000000449

Entonces, se procede a variar el HMCR en el rango de 0,90 hasta 0,99 ya que si la tasa es baja la probabilidad de selección de armonías disminuye [23]. El valor que produce la mejor aproximación a la longitud de referencia es 0,90, los resultados de las simulaciones son mostrados en la Tabla 2.

**Tabla 2.** Efecto del HMCR en el HSA

HMCR	Promedio	Desviación Estándar	Varianza
0,90	0,059843689	0,00028759	0,0000000827
0,91	0,060000246	0,000308788	0,0000000953
0,92	0,060214315	0,000477385	0,000000228
0,93	0,060054921	0,000327918	0,000000108
0,94	0,059721656	0,000318229	0,000000101
0,95	0,059672082	0,000615713	0,000000379
0,96	0,060336991	0,001261289	0,000001591
0,97	0,059798446	0,000550412	0,000000303
0,98	0,059463205	0,00145702	0,000002123
0,99	0,060233083	0,002607189	0,000006797

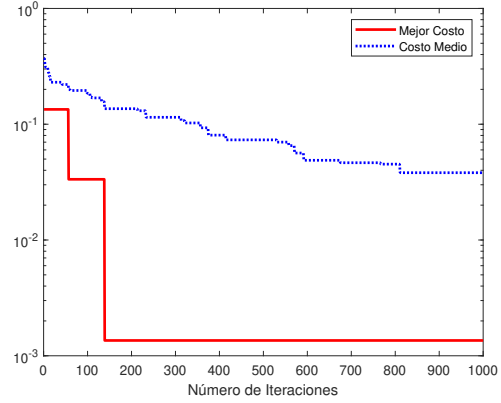
Finalmente, el parámetro PAR se varía generalmente desde 0,1 a 0,5, se simula manteniendo el HMS=12, el HMCR=0,90. Los resultados se muestran en la Tabla 3, el valor de PAR=0,2 es el que logra la mejor aproximación.

**Tabla 3.** Efecto del PAR en el HSA

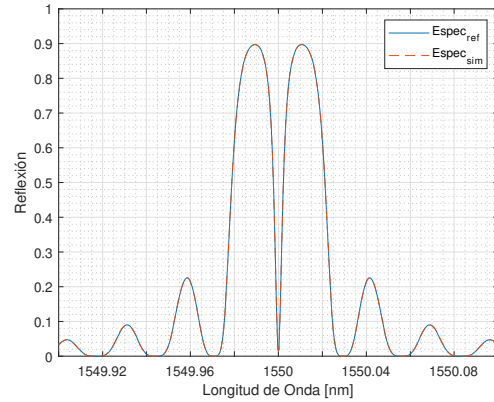
PAR	Promedio	Desviación Estándar	Varianza
0,1	0,060063586	0,000348764	0,000000122
0,2	0,059888584	0,000185067	0,0000000343
0,3	0,060060191	0,00037935	0,000000144
0,4	0,060080204	0,000345652	0,000000119
0,5	0,059969986	0,000314754	0,0000000991

Con los parámetros obtenidos en la caracterización se configuró el algoritmo de optimización con la finalidad de reducir el costo, lograr una mejor estimación de la longitud de la PS-FBG y obtener un mejor espectro simulado que se aproxime de mejor manera al de referencia. La Figura 6 (a) muestra la convergencia del algoritmo de acuerdo a la función de costo, en ella se mira una reducción de hasta casi  $1.05 \times 10^{-3}$  con

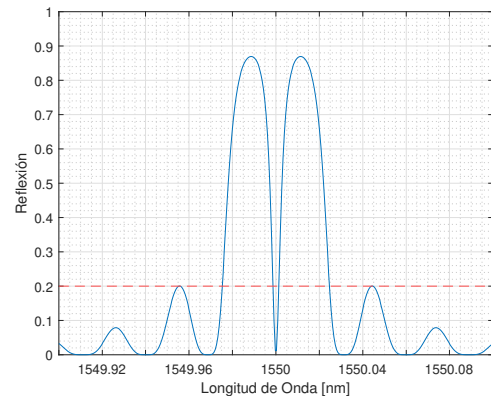
los siguientes parámetros del HSA luego de la caracterización: HMS=12, HMCR=0,90 y PAR=0,20, esto se corrobora en la Figura 6 (b) con la coincidencia casi exacta de los espectros de referencia y el simulado.



(a)



(b)

**Figura 6.** Caracterización de la PS-FBG (a) costo y (b) espectro**Figura 7.** Espectro de la PS-FBG diseñado con amplitud del lóbulo secundario de 0.2

Para comprobar el funcionamiento adecuado del algoritmo, se diseña una FBG cuyo lóbulo secundario tenga una potencia normalizada  $P_{lob_{ref}} = 0,2$  y los parámetros HMS=12, HMC=0,9 y PAR=0,2. Lográndose una  $L_{sim} = 0,055896m$  y el lóbulo secundario alcanza el 0,2 (línea punteada), como se muestra en la Figura 7.

#### 4. Conclusiones

Una PS-FBG ha sido diseñada para una determinada potencia normalizada del lóbulo secundario utilizando el algoritmo de búsqueda armónica, los parámetros de la rejilla de Bragg y del algoritmo HSA fueron caracterizados para obtener un mejor costo de la función de optimización lográndose una mejora de aproximadamente 12 veces. Esto permitirá el diseño de filtros ópticos con características espectrales adecuadas que mejoren la comunicación en sistemas UDWDM

#### Referencias

- [1] X. Zhao, D. Zheng, and F. Wu, "Application of harmony search algorithm on the optimization of fiber Bragg grating reflection spectrum," *2012 the 8th IEEE International Symposium on Instrumentation and Control Technology, ISICT 2012 - Proceedings*, pp. 262–266, 2012.
- [2] M. Toba, F. M. Mustafa, and T. M. Barakat, "New simulation and analysis fiber Bragg grating : narrow bandwidth without side lobes New simulation and analysis fiber Bragg grating : narrow bandwidth without side lobes," 2020.
- [3] H. M. El-gammal, H. A. Fayed, A. A. B. D. El-aziz, and M. H. Aly, "Performance analysis comparative study of uniform , apodized and pi-phase shifted FBGs for array of high performance temperature sensors," no. September, 2015.
- [4] S. Daud and J. Ali, "Operational Principles of Fibre Bragg Grating and No-Core Fibre," in *Fibre Bragg Grating and No-Core Fibre Sensors*, Fibre Bragg Grating and No-Core Fibre Sensors, 2018, no. 2018, ch. 2, pp. 5–13.
- [5] M. Singh, "Analysis of Dispersion Compensation using Fiber Bragg Grating in Optical Fiber Communication System," vol. 126, no. 5, pp. 1–5, 2015.
- [6] N. Mahawar and A. Khunteta, "Design and performance analysis of WDM optical Communication system with EDFA-DCF and FBG for dispersion compensation using 8x5 Gbps data rate," vol. 0, no. Icces, pp. 431–435, 2019.
- [7] C. Ghosh, Q. Alfred, and B. Ghosh, "Spectral Characteristics of Uniform Fiber Bragg Grating With Different Grating Length and Refractive Index Variation," pp. 456–462, 2015.
- [8] J. Albert, K. O. Hill, D. C. Johnson, F. Bilodeau, and M. J. Rooks, "Moire phase masks for automatic pure apodisation of fibre Bragg gratings," vol. 32, no. 24, pp. 2260–2261, 1996.
- [9] E. G. Turitsyna and S. Webb, "Intrinsic apodisation of Bragg gratings written using UV-pulse interferometry," *Electronics letters*, vol. 41, no. 2, pp. 40–41, 2005.
- [10] K. M. Dwivedi, G. Trivedi, and S. K. Khijwania, "Theoretical study and optimization of apodized fiber bragg grating for single and quasi-distributed structural health monitoring applications," in *2020 30th International Conference Radioelektronika (RADIOELEKTRONIKA)*, 2020, pp. 1–6.
- [11] D. Ahlawat, P. Arora, and S. Kumar, "Performance evaluation of proposed wdm optical link using edfa and fbg combination," *Journal of Optical Communications*, vol. 40, no. 2, pp. 101–107, 2019.
- [12] R. Feced, M. N. Zervas, M. A. Muriel, and S. Member, "An Efficient Inverse Scattering Algorithm for the Design of Nonuniform Fiber Bragg Gratings," vol. 35, no. 8, pp. 1105–1115, 1999.
- [13] H. Zou, D. Liang, J. Zeng, and L. Feng, "Quantum-behaved particle swarm optimization algorithm for the reconstruction of fiber bragg grating sensor strain profiles," *Optics Communications*, vol. 285, no. 5, pp. 539–545, 2012. [Online]. Available: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0030401811013095>
- [14] F. Chaoui, O. Aghzout, A. V. Alejos, A. Naghar, F. Falcone, and M. El Yakhoulfi, "Theoretical approach to optimize fiber bragg grating sensor performance using an automated new code," *Optik*, vol. 140, pp. 634–643, 2017. [Online]. Available: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0030402617304989>
- [15] X. Zhao, D. Zheng, and F. Wu, "Application of harmony search algorithm on the optimization of fiber bragg grating reflection spectrum," in *2012 8th IEEE International Symposium on Instrumentation and Control Technology (ISICT) Proceedings*, 2012, pp. 262–266.
- [16] T. Erdogan, "Fiber grating spectra," *Journal of lightwave technology*, vol. 15, no. 8, pp. 1277–1294, 1997.

- [17] J. Xu, C. Huang, X. Liu, G. Feng, S. Zhang, and X. Dong, "Study on characteristics of random phase-shifted fiber bragg grating," *ICOON 2017 - 16th International Conference on Optical Communications and Networks*, vol. 2017-Janua, pp. 1–3, 2017.
- [18] G. Li and H. Wang, "Improved harmony search algorithm for global optimization," *Proceedings of the 30th Chinese Control and Decision Conference, CCDC 2018*, pp. 864–867, 2018.
- [19] J. Zhang and P. Zhang, "A study on harmony search algorithm and applications," *Proceedings of the 30th Chinese Control and Decision Conference, CCDC 2018*, pp. 736–739, 2018.
- [20] A. Ouaddah and D. Boughaci, "Harmony search algorithm for image reconstruction from projections," *Applied Soft Computing Journal*, vol. 46, pp. 924–935, 2016. [Online]. Available: <http://dx.doi.org/10.1016/j.asoc.2016.02.031>
- [21] E. Cuevas and N. Ortega-Sánchez, "El algoritmo de búsqueda armónica y sus usos en el procesamiento digital de imágenes," *Computacion y Sistemas*, vol. 17, no. 4, pp. 543–560, 2013.
- [22] Corning, "PI-1450-AEN.pdf," 2019. [Online]. Available: <https://www.corning.com/media/worldwide/coc/documents/Fiber/PI-1450-AEN.pdf>
- [23] J. A. Molina García, "Algoritmo de búsqueda armónica: Fundamentos y resolución de problemas de optimización con restricciones," 2019.