



UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA
SEDE QUITO
CARRERA DE TELECOMUNICACIONES

**DISEÑO DE UNA REJILLA DE BRAGG CHIRP MEDIANTE EL
ALGORITMO DE BÚSQUEDA ARMÓNICA**

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

AUTORES: GIOMARA ABIGAIL LLUMIQUINGA HERNÁNDEZ

LUIS ROLANDO RIMACUNA PAHUANQUIZA

TUTOR: MILTON NAPOLEÓN TIPÁN SIMBAÑA

Quito-Ecuador

2022

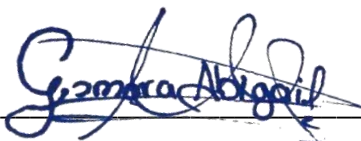
CERTIFICADO DE RESPONSABILIDAD Y AUTORÍA DEL TRABAJO DE TITULACIÓN

Nosotros, Giomara Abigail Llumiquinga Hernández con documento de identificación N° 1717605990 y Luis Rolando Rimacuna Pahuanquiza con documento de identificación N° 1721221784; 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.

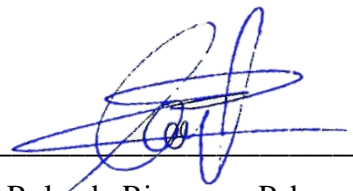
Quito, 01 de septiembre del año 2022

Atentamente,



Giomara Abigail Llumiquinga Hernández

1717605990



Luis Rolando Rimacuna Pahuanquiza

1721221784

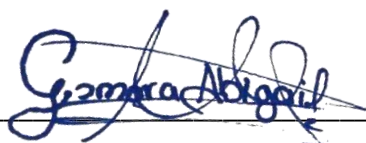
**CERTIFICADO DE CESIÓN DE DERECHOS DE AUTOR DEL TRABAJO DE
TITULACIÓN A LA UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA**

Nosotros, Giomara Abigail Llumiquinga Hernández con documento de identificación No. 1717605900 y Luis Rolando Rimacuna Pahuanquiza con documento de identificación No. 1721221784 , 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 Chirp 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, 01 de septiembre del año 2022

Atentamente,



Giomara Abigail Llumiquinga Hernández

1717605900



Luis Rolando Rimacuna Pahuanquiza

1721221784

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 CHIRP MEDIANTE EL ALGORITMO DE BÚSQUEDA ARMÓNICA, realizado por Giomara Abigail Llumiquinga Hernández con documento de identificación N° 1717605990 y por Luis Rolando Rimacuna Pahuanquiza con documento de identificación N° 1721221784, 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, 01 de septiembre del año 2022

Atentamente,



Ing. Milton Napoleón Tipán Simbaña, MSc.

1713583126

DEDICATORIA

El presente artículo de investigación se lo dedico con todo el corazón a mi difunto abuelito Gabriel Hernández, por ser mi segundo papá y primer maestro de vida, a mi abuelita Ángela Oña, que con su amor y sabiduría me ha enseñado a ser quien soy hoy, y ha sido un pilar fundamental en todo este camino, a mi madre Ximena Hernández, por inculcarme buenos valores y velar por mi educación y a toda mi familia que han estado presente en cada uno de mis logros.

Giomara Abigail Llumiyinga Hernández

Agradezco a Dios por haberme otorgado una familia maravillosa, quienes siempre han creído en mí y por este motivo dedico este artículo de investigación a cada uno de mis seres queridos, en especial a mi abuelito Luis Pahuanquiza, por ser más que un padre conmigo e inculcarme siempre buenos valores y consejos, a mi abuelita Virginia Guamantica, quien gracias a su apoyo incondicional y amor, me ha ayudado a forjarme como la persona que soy en la actualidad, a mi madre Adriana Pahuanquiza, pues sin ella nunca lo habría logrado, ya que siempre ha velado en mi educación y bienestar, además por darme el ejemplo de superación, perseverancia y humildad.

Luis Rolando Rimacuna Pahuanquiza

AGRADECIMIENTO

Nuestro profundo agradecimiento a Dios por ser un pilar fundamental y gran guía a lo largo de toda nuestra carrera profesional.

A nuestros abuelos y madres que han estado presentes con su amor y sabiduría en cada paso en nuestras vidas.

A nuestro tutor por su dedicación, paciencia y apoyo incondicional en todo este proceso de investigación.

Giomara Abigail Llumiyinga Hernández

Luis Rolando Rimacuna Pahuanquiza

DISEÑO DE UNA REJILLA DE BRAGG CHIRP MEDIANTE EL ALGORITMO DE BÚSQUEDA ARMÓNICA

DESIGN OF A BRAGG CHIRP GRATING USING THE HARMONIC SEARCH ALGORITHM

Giomara A. Llumiquinga ¹, Luis R. Rimacuna ², Milton N. Tipán ³

Resumen

El diseño de sistemas WDM requieren separaciones de las longitudes de onda cada vez más reducidas por lo que para evitar interferencias en las señales transmitidas la potencia de lóbulos laterales de los espectros ópticos necesitan reducirse. En este artículo, se presenta el uso del algoritmo de búsqueda armónica para optimizar los picos de los lóbulos laterales a niveles deseados del espectro de reflexión óptico de una Chirp FBG. Los resultados muestran que los parámetros del algoritmo luego de su caracterización son $HMS = 13$, $HMCR = 0.93$ y $PAR = 0.3$, consiguiéndose una mejora de aproximadamente 130 veces con los parámetros establecidos inicialmente.

Palabras clave: HS, FBG, Chirp, optimización.

Abstract

The design of WDM systems requires smaller and smaller wavelength spacings so that to avoid interference in the transmitted signals the sidelobe power of the optical spectra needs to be reduced. In this paper, the use of the harmonic search algorithm to optimize the sidelobe peaks to desired levels of the optical reflection spectrum of a Chirp FBG is presented. The results show that the parameters of the algorithm after characterization are $HMS = 13$, $HMCR = 0.93$ and $PAR = 0.3$, achieving an improvement of approximately 130 times with the initially set parameters.

Keywords: HS, FBG, Chirp, optimization.

¹Carrera de Telecomunicaciones, Universidad Politécnica Salesiana, Quito, Ecuador, e-mail: gllumiquinga@est.ups.edu.ec

²Carrera de Telecomunicaciones, Universidad Politécnica Salesiana, Quito, Ecuador, e-mail: lrillacuna@est.ups.edu.ec

³Carrera de Telecomunicaciones, Universidad Politécnica Salesiana, Quito, Ecuador, e-mail: mtipans@ups.edu.ec

1. Introducción

En el campo de las comunicaciones ópticas la aplicación de la rejilla de Bragg (Fiber Bragg Grating, FBG) ha tomado un espacio primordial, ya que al encontrarse incrustadas en la fibra óptica ha sido usada para compensación de dispersión cromática, filtrado óptico, entre otras aplicaciones, evitando así el uso de otros dispositivos como: espejos de volumen o rejillas de difracción, que tienen altas pérdidas de energía. Por otro lado, una FBG posee una perturbación en el índice de refracción en una determinada región del núcleo, es así que cuando la luz de un espectro incide en la FBG una parte se refleja y otra se transmite [1]. Una FBG refleja solo la longitud de onda que se encuentra dentro de la condición de ajuste de fase, esta a su vez es selectiva en frecuencia, teniendo una respuesta espectral con ancho de banda finito [2], los lóbulos laterales también se hacen presentes en el espectro de la FBG, los cuales al ser de gran tamaño son causantes de interferencia y degradación en el rendimiento de la señal al encontrarse junto a otras, en especial en sistemas de multiplexación por división de longitud de onda (Wavelength Division Multiplexing, WDM) [3] [4].

Se han desarrollado varias técnicas para reducir o eliminar los lóbulos laterales, entre ellos el uso de la modulación o la aplicación de un cambio de índice de refracción introducido por la exposición envolvente a la luz ultravioleta es una técnica utilizada para reducir el índice de refracción en los extremos de la FBG o apodización, algunas de las funciones de apodización más populares incluyen: Hamming, Barlett, Hann, Harris, Nutall y más. [5]. Por otro lado, técnicas de optimización han sido usadas, entre ellos algoritmos metaheurísticos, como el algoritmo Bat (Bat Optimization Algorithm, BOA), conocido por el uso de murciélagos virtuales, que es un conjunto de soluciones candidatas, donde el operador se mueve por el espacio del problema, con el objetivo de lograr una solución óptima, esta técnica se ha utilizado para analizar y construir mallas de triangulación de fibra espectral (TS-FBG) [6]. De igual forma, la implementación del algoritmo de recocido simulado (Simulated Annealing, SA) en una FBG de fibra óptica cónica junto con la Teoría de Modos Múltiples (CMT) y el Método de Matriz de Transmisión (TMM) ha permitido optimizar la respuesta de histéresis del grupo TFBG y las propiedades espectrales de este tipo de rejilla. El algoritmo busca la forma óptima de la transición del cono registrado a la rejilla, así como su función de apodización, la cual es importante porque minimizan las oscilaciones en el grupo que ralentizan la respuesta espectral [7].

Comparado con otros algoritmos metaheurísticos, el algoritmo de búsqueda armónica tiene diversas ventajas, como su bajo uso de parámetros de configuración y velocidad [8], teniendo en cuenta estas ventajas, este algoritmo se ha aplicado para resolver un gran número

de problemas complejos de optimización, obteniendo resultados satisfactorios [9].

Esta investigación, busca reducir el tamaño de los lóbulos laterales ubicados alrededor del lóbulo principal en el espectro de la señal generada por una FBG con chirp (CFBG), haciendo uso de la metaheurística basada en el algoritmo de búsqueda armónica, esto permitirá reducir la interferencia cuando varias señales sean transmitidas juntas.

El artículo se ha organizado de la siguiente manera. En la sección 2, se propone el uso de la teoría de modos acoplados, matriz T y algoritmo de búsqueda armónica en la CFBG. En la sección 3, se detallan los resultados obtenidos para el diseño de la CFBG y la aplicación del algoritmo HS en la optimización del espectro. Finalmente, en la sección 4 se determina la conclusión.

2. Materiales y Métodos

2.1. Rejilla de Bragg Chirp

Existen varios tipos de rejillas de Bragg, que pueden ser uniformes o no uniformes según el período de modulación del índice de refracción. Una FBG se compone de distintos índices de refracción, el del núcleo n_{co} y del revestimiento n_{cl} , como se muestra en la Figura 1 [10].

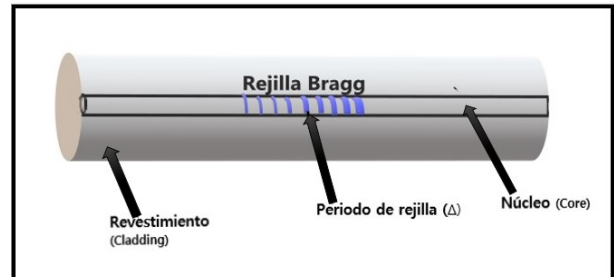


Figura 1. Rejilla de Bragg.

La longitud de trabajo de la FBG λ se obtiene según la Ec. 1, donde n_{eff} es el índice de refracción efectivo del núcleo de la fibra y Δ es el período de la rejilla [11].

$$\lambda = 2n_{eff}\Delta \quad (1)$$

En el caso de una rejilla que tiene una variación suave de su período (Chirp), esta provoca un cambio en la longitud de onda a través de la rejilla, ya que cada parte refleja un espectro diferente. [12] [13]. Su espectro de reflexión es más amplio que el de una rejilla uniforme, se caracteriza principalmente por un mayor ancho de banda que puede ir desde unos pocos nanómetros hasta decenas de nanómetros [2] [12]. La rejilla de Bragg con chirp puede ser modelada mediante

la teoría de modos acoplados (Coupled Mode Theory, CMT), siendo eficaz para encontrar su respuesta espectral [14].

En la aproximación del modo ideal a la CMT, se puede asumir que la componente transversal del campo eléctrico se puede escribir como una superposición de los modos ideales j –ésimos, como se indica en la Ec. 2 [14].

$$\vec{E}_t(x, y, z, t) = \sum_j [A_j(z) \exp(j\beta_j z) + B_j(z) \exp(-j\beta_j z)] \cdot \vec{e}_{jt}(x, y) \exp(-i\omega t) \quad (2)$$

Los campos de modo transversal $\vec{e}_{jt}(x, y)$ pueden describir modos de radiación polarizados linealmente (Linearly Polarized, LP) o del núcleo de la fibra. Donde $A_j(z)$ y $B_j(z)$ son los valores de amplitud de las oscilaciones armónicas en las direcciones $+z$ y $-z$, $\beta_j = (2\pi/\lambda)n_{eff}^j$ es la constante de propagación del modo j [14].

Si se tiene en cuenta retener únicamente los términos relacionados con la amplitud del modo particular y omitir los términos con dependencia de z , ya que dichos términos no aportan mucho a la ganancia y pérdida de la amplitud. El resultado es la ecuación diferencial de la Ec. 3, para las amplitudes del campo eléctrico [14].

$$\begin{aligned} du/dz &= j\hat{\sigma}u(z) + j\kappa v(z) \\ dv/dz &= -j\hat{\sigma}v(z) - j\kappa u(z) \end{aligned} \quad (3)$$

Donde, la amplitud de la onda propagante, u , es $u(z) = A(z) \exp(i\delta z - \phi/2)$ y de la onda contrapropagante, v , es $v(z) = B(z) \exp(-i\delta z + \phi/2)$ [14]. El coeficiente de autoacoplamiento continuo ($\hat{\sigma}$), está definida por la Ec. 4, donde δ es el desajuste de la condición de Bragg y $d\phi/dz$ es el término chirp [14].

$$\hat{\sigma} = \delta + \sigma - 1/2 * d\phi/dz \quad (4)$$

Para una rejilla de bragg monomodo se tiene las siguientes ecuaciones definidas en la Ec. 5, donde σ es el coeficiente de acoplamiento promedio del periodo, mientras que κ es el coeficiente de acoplamiento constante para la red uniforme [14].

$$\begin{aligned} \sigma &= \frac{2\pi}{\lambda} g [\delta n_{dc}(z) + C\delta n_{ac}(z)] \\ \kappa &= \kappa^* = \frac{\pi}{\lambda} g \delta n_{ac}(z) \end{aligned} \quad (5)$$

Donde g es la integral de superposición del modo guiado en la región de fotosensibilidad, $\delta n_{dc}(z)$ es el cambio de índice DC sobre la longitud de la rejilla, $\delta n_{ac}(z)$ es el cambio de índice AC y $C\delta n_{ac}(z)$ es el

cambio de índice DC debido a la apodización, cabe recalcar que el parámetro C explica el cambio adicional reducido por UV del índice promedio a lo largo de la fibra [14].

Para las rejillas no uniformes, se pueden resolver las ecuaciones de modos acoplados mediante métodos numéricos. En este caso se va a utilizar el enfoque uniforme por partes para calcular los espectros de la rejilla, ya que este método es fácil de implementar, además de preciso y más rápido, en este, la rejilla se divide en varias secciones uniformes, en la cual cada sección uniforme se combina multiplicando las matrices vinculadas a cada sección [14].

Para la Ec. 6 teniendo en cuenta que la rejilla se puede dividir en M secciones uniformes, la amplitud del campo después de pasar por la sección i se puede determinar como u_i y v_i , con condición inicial $u_0 = u(L) = 1$ y $v_0 = v(L) = 0$, donde $u(0) = u_M$ y $v(0) = v_M$, lo que da como resultado la matriz \mathfrak{S}_i que es la propagación a través de cada sección uniforme i [14].

$$\begin{bmatrix} u_i \\ v_i \end{bmatrix} = \mathfrak{S}_i \begin{bmatrix} u_{i-1} \\ v_{i-1} \end{bmatrix} \quad (6)$$

La Ec. 10 muestra la matriz para la reflexión de la rejilla, \mathfrak{S}_i , en la cual Δz es la longitud de la i -ésima sección uniforme, los valores locales en la i -ésima sección son los coeficientes de acoplamiento $\hat{\sigma}$ y κ [15]. Cabe recalcar que el parámetro γ_B es imaginario en las longitudes de onda donde $|\hat{\sigma}| > \kappa$ y se representa de la siguiente forma en la Ec. 7 [15].

$$\gamma_B \equiv \sqrt{\kappa^2 - \hat{\sigma}^2} \quad (7)$$

En la Ec. 8 se puede encontrar la amplitud de salida, una vez que se conocen todas las matrices para las secciones individuales [14].

$$\begin{bmatrix} u_M \\ v_M \end{bmatrix} = \mathfrak{S} \begin{bmatrix} u_0 \\ v_0 \end{bmatrix}; \mathfrak{S} = \mathfrak{S}_M \cdot \mathfrak{S}_{M-1} \dots \mathfrak{S}_1 \quad (8)$$

Se debe tomar en cuenta la precisión que se requiere al momento de calcular cada sección uniforme. Para la mayoría de las rejillas con chirp y apodizadas, basta con usar hasta 100 secciones. El parámetro M no se puede hacer arbitrariamente grande, ya que las aproximaciones de la CMT que conducen a la Ec. 3 no serán válidas cuando una sección de la rejilla uniforme tenga pocos periodos de rejilla, por lo que se requiere la Ec. 9, donde L es la longitud de una red de fibra [15].

$$L \gg \Delta z \gg \Lambda \quad (9)$$

$$\mathfrak{S}_i = \begin{bmatrix} \cosh(\gamma_B \Delta z) - i \frac{\hat{\sigma}}{\gamma_B} \sinh(\gamma_B \Delta z) & -i \frac{\kappa}{\gamma_B \sinh(\gamma_B \Delta z)} \\ i \frac{\kappa}{\gamma_B \sinh(\gamma_B \Delta z)} & \cosh(\gamma_B \Delta z) + i \frac{\hat{\sigma}}{\gamma_B} \sinh(\gamma_B \Delta z) \end{bmatrix} \quad (10)$$

Para implementar el método uniforme por partes en las rejillas apodizadas y con chirp, se debe colocar valores constantes como Λ , σ y κ a cada sección uniforme, donde estos valores pueden ser dependientes de z ($\Lambda(z)$, $\sigma(z)$ y $\kappa(z)$), evaluado en el centro de cada sección [15].

2.2. Algoritmo de Búsqueda Armónica

El algoritmo de búsqueda de armonía (Harmony Search, HS) es un algoritmo de agregación, ya que puede hacer uso de un conjunto de varias armonías en paralelo. Este se centra en la improvisación musical manejando variables discretas o continuas y presenta diversas características, las cuales han ayudado a que se convierta en una herramienta de optimización de rápida convergencia, dentro de estas está la menor carga computacional, puesto que, realiza cálculos simples y eficaces [16].

En el algoritmo HS se debe tomar en cuenta los siguientes parámetros para su funcionamiento [17]:

- **Tamaño de la memoria armónica (Harmony Memory Size, HMS):** Define una cantidad de elementos cuyo mejor desarrollo en el proceso de optimización pueden ser almacenados en la utilidad para el proceso de evolución.
- **Memoria armónica considerando la tasa (Harmony Memory Considering the Rate, HMCR):** Es la representación probabilística de construir un levantamiento actualizado a partir de los elementos que se han almacenado en la memoria armónica (Harmony Memory, HM).
- **Tasa de ajuste del tono (Pitch Adjustment Rate, PAR):** Fija la probabilidad de regresar a cambiar una solución que ya fue generada.
- **Número de improvisaciones (NI):** Este parámetro es conocido también como el criterio de parada.
- **Ancho de banda de ajuste del tono (bw)**

Para el desarrollo de programación del algoritmo HS, se debe seguir los siguientes pasos: [16, 18].

Paso 1

Establecer los parámetros iniciales del algoritmo HS.

Paso 2

Iniciar la memoria armónica desde una distribución de probabilidad en los rangos LB_i y UB_i de manera uniforme, la cual se genera de la siguiente forma, $x_i^j = LB_i + r \cdot (UB_i - LB_i)$, donde el parámetro x_i consiste de N variables de decisión, $j = 1, 2, \dots, HMS$; el parámetro $r \sim U(0, 1)$, en el que r es un número aleatorio y $U(0, 1)$ es la función que forma el número aleatorio uniforme entre 0 y 1, finalmente, el parámetro LB_i es el límite de decisión más bajo de cada variable,

mientras que UB_i es el límite de decisión alto de cada variable.

Paso 3

Improvisar una nueva armonía. Para generar un nuevo vector armónico, el cual se puede describir como $x' = (x'_1, x'_2, \dots, x'_N)$, se debe considerar la memoria, el ajuste de tono y la selección aleatoria.

```

for i=1 to N do
  if U(0,1) < HCMR then
    %consideración de la memoria%
     $x'_i = x_i^j$ ,  $j \sim U(1, \dots, HMS)$ 
    %ajuste del tono%
    if U(0,1)  $\leq$  PAR then
       $x'_i = x'_i + r \cdot bw$ 
    end if
  else
    %selección aleatoria%
     $x'_i = LB_i + r \cdot (UB_i - LB_i)$ 
  end if
end for

```

Donde r es un número aleatorio uniforme entre los valores de 0 y 1, además se define cómo el ancho de banda arbitrario de la distancia para variables continuas al parámetro bw .

Paso 4

Actualizar HM.

Paso 5

Si el valor de NI finaliza, se puede localizar el vector solución óptimo en HM, de otra forma se debe regresar al Paso 3.

2.3. Configuración de la simulación de la CFBG

Para la presente investigación se ha simulado una CFBG en el software Matlab R2021b, por medio del método de la matriz T, tomando en cuenta que la fabricación está realizada sobre una fibra óptica SMF-28e, con índices del perfil de refracción del núcleo $n_{co} = 1.4677$, de recubrimiento $n_{cl} = 1.4624$, obtenidos de [19], índice de refracción efectivo $n_{eff} = 1.4682$, variación del índice de modulación $\Delta n_{eff} = 9 \times 10^{-5}$, longitud de $L = 0.1m$, y un parámetro chirp de $C = 2.5nm/m$.

Para la reducción de los lóbulos laterales del espectro de la CFBG se procedió a tomar un espectro de referencias para una longitud determinada, de este se obtuvo el valor máximo del primer lóbulo lateral lob_{ref} que será el valor a obtener en el diseño. La estimación de este valor fue realizada utilizando el algoritmo HS, con los parámetros HMS=10, HMCR=0.95, PAR=0.25, Bw=0.02, 1000 iteraciones y el valor de la longitud en metros de L se varió en el intervalo de $0.05 \leq L \leq 0.15$, con lo cual se obtuvo un espectro simulado y de este el valor máximo del primer lóbulo lateral lob_{sim} , la optimización fue realizada utilizando como función de

costo, el error relativo entre estos dos valores máximos de los lóbulos laterales, como se muestra en la Ec. 11.

$$\min f_{cost} = \left| \frac{lob_{sim} - lob_{ref}}{lob_{ref}} \right| \quad (11)$$

Debido a que el espectro de la FBG es una función de varios parámetros $E_{FBG} = f(L, neff, C, \Delta N_{eff})$, se procedió a caracterizarlo para conocer cual es el parámetro que más afecta a los lóbulos laterales y mantiene simétrico al espectro. Finalmente, los parámetros HMS, HMCR y PAR de la metaheurística fueron caracterizados para obtener una convergencia más tolerante.

3. Resultados y Discusión

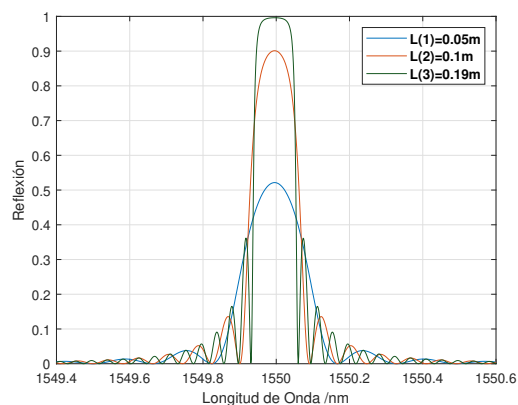


Figura 2. Variación del parámetro L

Para la caracterización de los parámetros de longitud, $neff$, $chirp$, $\Delta neff$ de la CFBG, primero se varió la longitud tomado tres valores referenciales de FBG comerciales, los resultados muestran un incremento en la amplitud del lóbulo principal, así como de los laterales a medida que la longitud incrementa, para un valor mayor a 0.15m, el espectro empieza a saturar el lóbulo principal, como se observa en la Figura 2.

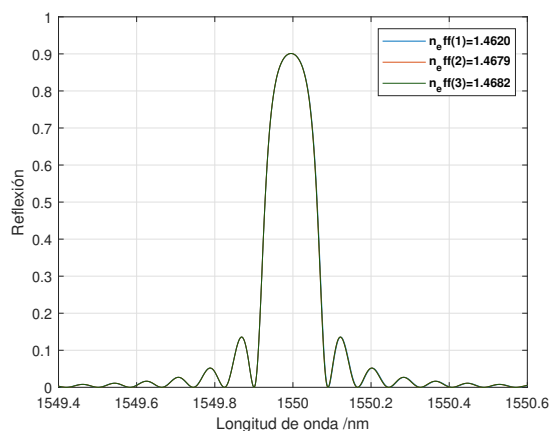


Figura 3. Variación del parámetro $neff$

Luego, se cambió el parámetro $neff$, tomando tres valores alrededor del valor de SMF-28e cuyo índice de refracción efectivo es 1.4682 a 1550nm [20]. Los resultados muestran que no existe cambios significativos en el espectro, como se indica en la Figura 3, por lo que este parámetro no tiene mayor influencia en el estudio.

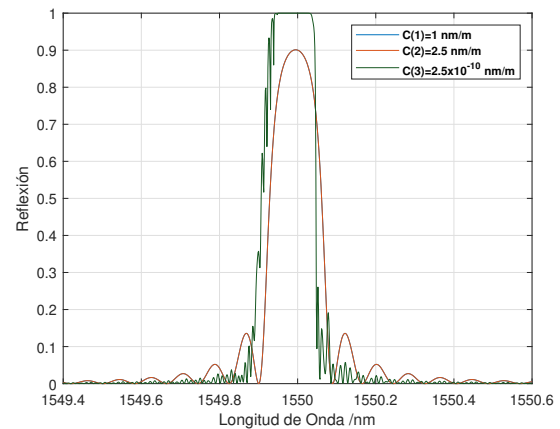


Figura 4. Variación del parámetro Chirp

Entonces, el valor del chirp fue cambiando para valores próximos a 0 y mayores a 1, que fueron elegidos mediante una comparación entre ellos, es así que se seleccionó por medio de dicho análisis y revisión bibliográfica [15], el valor de 2.5 nm/m . Además, debe ser mayor a cero de lo contrario sería una FBG uniforme. Se observa que al tener valores próximos a 0 se da una distorsión de la señal, mostrada en la Figura 4.

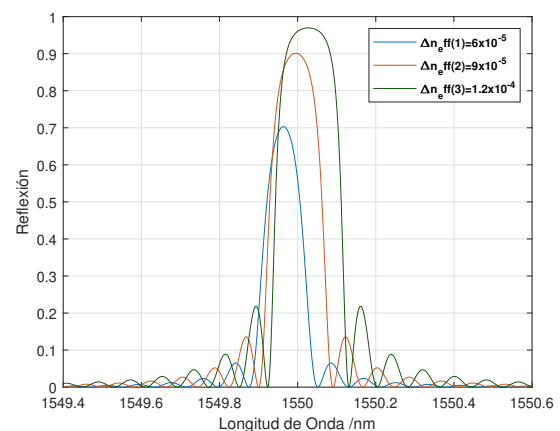


Figura 5. Variación del parámetro ΔN_{eff}

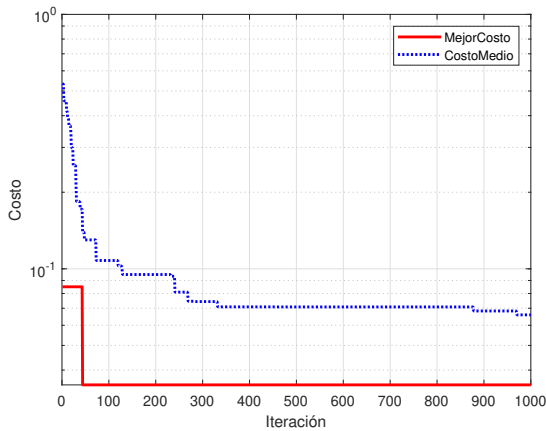
A continuación, se varió el parámetro $\Delta neff$, para lo cual se representó espectros desde 6×10^{-5} hasta 1.2×10^{-4} , en pasos de 3×10^{-5} . El valor seleccionado fue de 9×10^{-5} puesto que, se encuentra centrado a una longitud de onda de 1550nm. Los resultados muestran que existe una reducción de lóbulos laterales. Sin embargo, el espectro presenta un aumento en el ancho

de banda, así como un desplazamiento en la longitud de onda de trabajo, como se mira en la Figura 5.

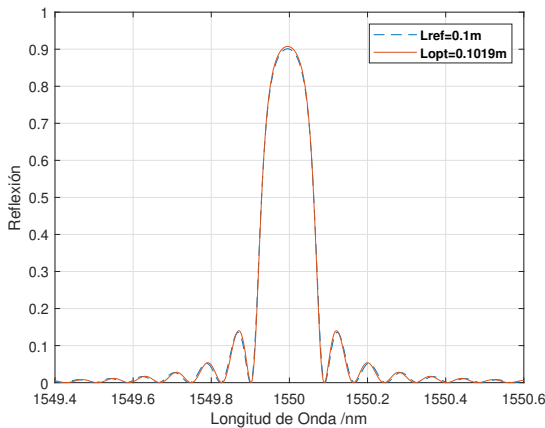
De acuerdo a los resultados, el parámetro a tomar en consideración para la optimización es la longitud, pues varía la potencia del lóbulo lateral y mantiene simétrico el espectro.

3.1. Aplicación del algoritmo HS en la optimización del espectro de CFBG

El proceso de caracterización inicia con la determinación de un espectro de referencia, para lo cual se tomo una longitud de $L_{ref} = 0.1m$, esto produjo un lob_{ref} de 0.135241. Para estimar este valor el algoritmo HS es establecido con los parámetros de $HMS = 10$, $HMCR = 0.95$, $PAR = 0.25$ y 1000 iteraciones.



(a)



(b)

Figura 6. Aplicación del algoritmo HS sin optimizar (a) mejor costo (b) comparación del espectro de CFBG entre L_{ref} y L_{opt}

La Figura 6(a), muestra la convergencia de la función de costo del algoritmo HS, así como el resultado del espectro de referencia y el simulado en la Figura 6(b), además, se observa que no existe una adecuada convergencia ya que se alcanza un costo cercano a 10^{-2} , lo que se traduce en una discrepancia en los

espectros, en especial en los picos del lóbulo principal, los laterales y el valor de la longitud optimizada que se logró de $L_{opt} = 0,1019m$.

Para buscar mejorar el desempeño del algoritmo, se procedió a caracterizar los parámetros HMS , $HMCR$ y PAR , para lo cual se realizaron 10 simulaciones de distintos valores para cada parámetro, cada una de 1000 iteraciones y se realizó un análisis estadístico descriptivo de la longitud de la FBG obtenida luego de la simulación, para determinar el mejor valor de cada uno de estos parámetros. En primer lugar, se varió, HMS manteniendo los otros fijos, con valores $HMCR = 0.95$, $PAR = 0.25$. El promedio, desviación estándar y varianza conseguida se muestran en la Tabla 1, en la cual, se observa que el valor que se acerca más al valor de referencia es $HMS = 13$.

Tabla 1. Efecto del HMS en el algoritmo HS

HMS	Promedio	Desv. Estándar	Varianza
7	0,09905	0,00119373	0,0000014
8	0,09975	0,00120485	0,0000015
9	0,09916	0,00164601	2,70933e-06
10	0,10001	0,00239325	5,72767e-06
11	0,10003	0,00116814	1,36456e-06
12	0,09945	0,00137941	1,90278e-06
13	0,10016	0,00065524	4,29333e-07
14	0,0999	0,00066833	4,46667e-07
15	0,09963	0,00071655	5,13444e-07

Luego, se mantuvo el nuevo valor de $HMS = 13$ y se tomaron los valores de 0.90 a 0.98 en $HMCR$, dado en [21]. Para este el mejor valor obtenido fue 0.93 como se muestra en la Tabla 2.

Tabla 2. Efecto del HMCR en el algoritmo HS

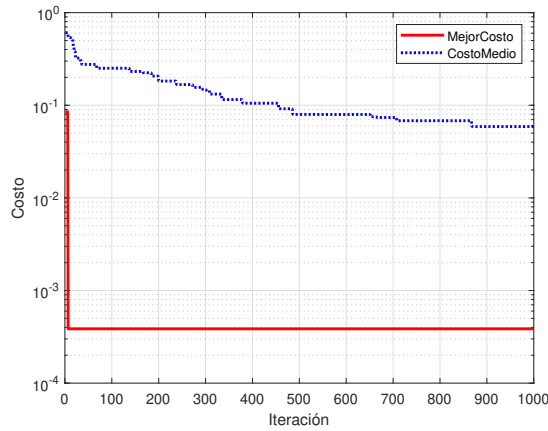
HMCR	Promedio	Desv. Estándar	Varianza
0.9	0,1002	0,000665	4,42222e-07
0.91	0,10002	0,00124704	1,55511e-06
0.92	0,09988	0,00076999	5,92889e-07
0.93	0,09991	0,00038427	1,47667e-07
0.94	0,0998	0,0006307	3,97778e-07
0.95	0,09977	0,00066005	4,35667e-07
0.96	0,10032	0,00057116	3,26222e-07
0.97	0,09971	0,00145941	2,12989e-06
0.98	0,09942	0,00086384	7,46222e-07

Posteriormente, el parámetro PAR tomó valores desde 0.1 a 0.5 [21]. Los resultados se muestran en la Tabla 3, obteniéndose el valor de $PAR = 0.3$, como el más adecuado.

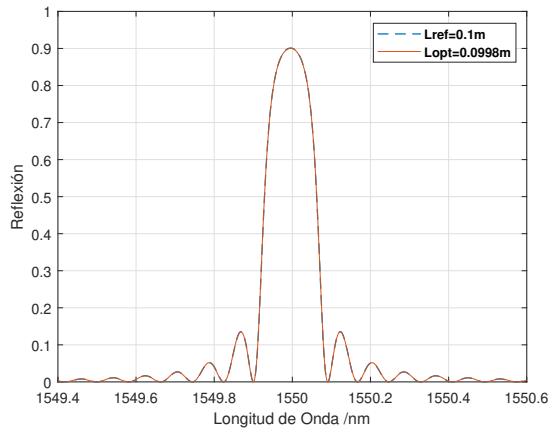
Tabla 3. Efecto de PAR en el algoritmo HS

PAR	Promedio	Desv. Estándar	Varianza
0,1	0,09961	0,00058205	3,38778e-07
0,15	0,09977	0,00085251	7,26778e-07
0,2	0,10023	0,00080836	6,53444e-07
0,25	0,09988	0,00083905	7,04e-07
0,3	0,09984	0,00040332	1,62667e-07
0,35	0,0998	0,00073786	5,44444e-07
0,4	0,09991	0,00068548	4,69889e-07
0,5	0,099766	0,00101784	1,036e-06

A continuación, para comprobar una mejora en la convergencia con la caracterización se procedió a simular nuevamente con los parámetros anteriores y para el HS se usaron los parámetros caracterizados de $HMS = 13$, $HMCR = 0.93$ y $PAR = 0.3$. Los resultados son presentados en la Figura 7.



(a)



(b)

Figura 7. Aplicación del algoritmo HS optimizado (a) mejor costo (b) comparación del espectro de CFBG entre Lref y Lopt

Se aprecia en la Figura 7(a), que el costo se reduce hasta 3.8567×10^{-4} logando una mejora del orden de aproximadamente 130 veces, del mismo modo en la Figura 7(b), no se observan mayores discrepancias entre el espectro simulado y el de referencia, lo que corrobora que el proceso de caracterización fue adecuado.

Finalmente, se diseñó una CFBG con un pico del lóbulo lateral deseado de 0.11, los resultados son mostrados en la Figura 8, se observa claramente que el pico de los lóbulos laterales alcanzan la línea de referencia, con lo que se comprueba la eficiencia del algoritmo para diseñar una CFBG con lóbulos laterales de amplitudes deseadas.

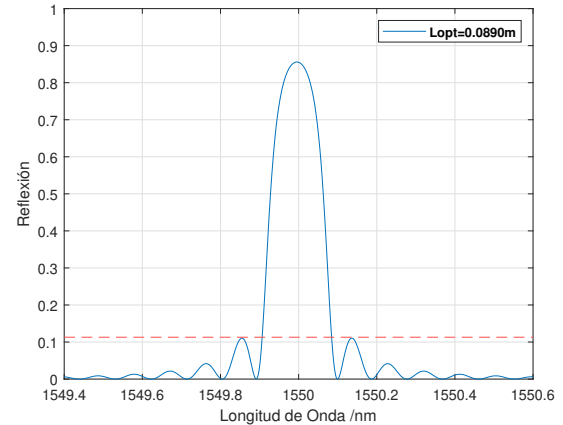


Figura 8. Espectro reflectivo de la CFBG para un $lob_{ref} = 0.11$ con parámetros de HS de $HMS = 13$, $HMCR = 0.93$ y $PAR = 0.3$

4. Conclusiones

El uso del algoritmo HS en el diseño de una CFBG para lóbulos de amplitudes deseadas fue comprobado, la caracterización de los parámetros HMS , $HMCR$ y PAR fue necesaria para conseguir una mejor convergencia, logrando una mejora aproximada de 130 veces. La eficacia del algoritmo fue puesta a prueba al diseñar una CFBG con una amplitud de los lóbulos laterales de 0.11 normalizado, logrando un error de 5.556×10^{-3} . Este algoritmo permitirá el diseño de sistemas UDWM usando CFBG, para lo cual una optimización en el ancho de banda del lóbulo principal será requerido.

Referencias

- [1] A. G. Cabrera, “Estudio de las rejillas de Bragg grabadas en fibra dopada con tierras raras,” *Centro de investigación en óptica, A.C.*, no. 8, pp. 1–85, 2009.
- [2] G. Fernández, “Desarrollo de dispositivos fotónicos basados en fibra óptica,” M.S. thesis, Laboratorio de Investigación Aplicada en Telecomunicaciones, Universidad Nacional de Cuyo, Argentina, 2019.
- [3] C. Jimenez and D. Constaín, “Definición de criterios y procedimientos que permitan el dimensionamiento de redes ópticas WDM mediante el análisis de los principales efectos de transmisión óptica,” *Departamento de Telecomunicaciones, Facultad de Ingeniería Electrónica y Telecomunicaciones, Universidad del Cauca*, pp. 1–119, 2020. [Online]. Available: <http://www.repositorio.unicauca.edu.co:8080/bitstream/handle/123456789/2007/Anexos.pdf?sequence=2&isAllowed=y>

- [4] A. Agreda and R. Hernán, “Análisis del modelado de la tecnología DWDM utilizado técnicas de compensación en comunicaciones ópticas mediante la validación del software OptiSystem,” M.S. thesis, Universidad Católica de Santiago de Guayaquil, Guayaquil, Ec., 2019. [Online]. Available: <http://repositorio.ucsg.edu.ec/handle/3317/13218>
- [5] F. J. Madruga, N. Becue, A. Quintela, O. Conde, and J. López, “Red de difracción optimizada para aplicaciones en redes de interferómetros fabry-perot,” in *URSI 2007, XXII Simposium Nacional de la Unión Científica Internacional de Radio*, La Laguna, 2007. [Online]. Available: <http://hdl.handle.net/10902/2418>
- [6] A. Al-Muraeb and H. Abdel-Aty-Zohdy, “Optimal design of short fiber bragg grating using bat algorithm with adaptive position update,” *Photonics Journal, IEEE*, vol. 8, pp. 1–11, February 2016. [Online]. Available: <http://dx.doi.org/10.1109/JPHOT.2015.2509871>
- [7] K. Markowski, K. Jedrzejewski, and T. Osuch, “Numerical analysis of double chirp effect in tapered and linearly chirped fiber bragg gratings,” *Applied optics*, vol. 55, no. 17, p. 4505–4513, June 2016. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1364/AO.55.004505>
- [8] M. Mahdavi, M. Fesanghary, and E. Daman-gir, “An improved harmony search algorithm for solving optimization problems,” *Applied Mathematics and Computation*, vol. 188, no. 2, pp. 1567–1579, 2007. [Online]. Available: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0096300306015098>
- [9] Z. W. Geem, “Optimal cost design of water distribution networks using harmony search,” *Engineering Optimization*, vol. 38, no. 3, pp. 259–277, 2006. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1080/03052150500467430>
- [10] H. Núñez, L. Zenteno, and G. Torres, “Caracterización de rejillas de bragg en fibra óptica,” *Revista Mexicana de Física*, vol. 45, pp. 364–369, 08 1999.
- [11] S. H. Arellano, “Aplicación de las rejillas de Bragg en fibra óptica para medición de vibraciones en eventos de baja frecuencia,” M.S. thesis, Centro de Investigaciones en Óptica, A.C., León, Guanajuato, Méx., 2006.
- [12] D. Tosi, “Review of chirped fiber bragg grating (cfbg) fiber-optic sensors and their applications,” *Sensors*, vol. 18, no. 7, 2018. [Online]. Available: <https://www.mdpi.com/1424-8220/18/7/2147>
- [13] V. Joshi and R. Mehra, “Performance Analysis of an Optical System Using Dispersion Compensation Fiber Linearly Chirped Apodized Fiber Bragg Gratings,” *Bentham Open*, vol. 3, pp. 114–121, 2016. [Online]. Available: <https://doi.org/10.2174/1874843001603010114>
- [14] Y. Sheng, J. Wang, and Y. Qiu, “Modeling phase mask diffraction for fiber Bragg grating fabrication,” *SPIE*, vol. 4924, pp. 191 – 195, 2002. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1117/12.481508>
- [15] T. Erdogan, “Fiber grating spectra,” *Journal of Lightwave Technology*, vol. 15, no. 8, pp. 1277–1294, 1997. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1109/50.618322>
- [16] C. Cobos, J. Pérez, and D. Estupiñan, “Una revisión de la búsqueda armónica,” *Avances en Sistemas e Informática*, vol. 8, no. 2, pp. 67–80, 2011. [Online]. Available: <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=133119867007>
- [17] G. Li and H. Wang, “Improved harmony search algorithm for global optimization,” in *2018 Chinese Control And Decision Conference (CCDC)*, 2018, pp. 864–867. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1109/CCDC.2018.8407251>
- [18] E. Cuevas and N. Ortega, “El algoritmo de búsqueda armónica y sus usos en el procesamiento digital de imágenes,” *Computación y Sistemas*, vol. 17, pp. 543 – 560, 2013. [Online]. Available: http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1405-55462013000400008&nrm=iso
- [19] Saktioto, Y. Zairmi, V. Veriyanti, W. Candra, R. F. Syahputra, Y. Soerbakti, V. Asyana, D. Irawan, Okfalisa, H. Hairi, N. A. Hussein, Syamsudhuha, and S. Anita, “Birefringence and polarization mode dispersion phenomena of commercial optical fiber in telecommunication networks,” *Journal of Physics: Conference Series*, vol. 1655, no. 1, p. 012160, October 2020. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1655/1/012160>
- [20] C. Incorporated, “Corning smf28e optical fiber product information,” in *Corning Discovering Beyond Imagination*, 2005, pp. 1–4. [Online]. Available: http://www.tlc.unipr.it/cucinotta/cfa/datasheet_SMF28e.pdf
- [21] 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. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1109/ISICT.2012.6291652>