



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

**DISEÑO DE UNA FBG UNIFORME MEDIANTE LA HEURÍSTICA MEJORADA DEL  
ALGORITMO DE BÚSQUEDA ARMÓNICA.**

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

AUTOR: Jhon Anthony Mendoza Maigua

TUTOR: Milton Napoleón Tipán Simbaña

Quito – Ecuador

2024

## **CERTIFICADO DE RESPONSABILIDAD Y AUTORÍA DEL TRABAJO DE TITULACIÓN**

Yo, Jhon Anthony Mendoza Maigua con documento de identificación N° 1725904831; manifiesto que:

Soy el autor y responsable del presente trabajo; y, autorizo 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, 15 de febrero del año 2024

Atentamente,



---

Jhon Anthony Mendoza Maigua

1725904831

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

Yo, Jhon Anthony Mendoza Maigua con documento de identificación N° 1725904831, expreso mi voluntad y por medio del presente documento cedo a la Universidad Politécnica Salesiana la titularidad sobre los derechos patrimoniales en virtud de que soy autor del Artículo Académico: “Diseño de una FBG uniforme mediante la heurística mejorada del algoritmo de búsqueda armónica”, el cual ha sido desarrollado para optar por el título de: Ingeniero en Telecomunicaciones, en la Universidad Politécnica Salesiana, quedando la Universidad facultada para ejercer plenamente los derechos cedidos anteriormente.

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

Quito, 15 de febrero del año 2024

Atentamente,



---

Jhon Anthony Mendoza Maigua

1725904831

## **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 FBG UNIFORME MEDIANTE LA HEURÍSTICA MEJORADA DEL ALGORITMO DE BÚSQUEDA ARMÓNICA, realizado por Jhon Anthony Mendoza Maigua con documento de identificación N° 1725904831 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, 15 de febrero del año 2024

Atentamente,



---

Ing. Milton Napoleón Tipán Simbaña MSc.  
1713583126

## **DEDICATORIA**

Dedico el presente trabajo con profundo agradecimiento y cariño a mis padres, Segundo Mendoza y Gloria Maigua, quienes me brindaron su amor, valores y apoyo incondicional. Son mi inspiración y mi más grande adoración en la vida. Guiaron mis pasos para que pueda lograr mi meta de obtener mi título profesional. A mi hermana, Camila Mendoza, por ser mi compañía desde siempre y motivarme para seguir adelante. A mis seres queridos en el cielo, a quienes extraño y desearía que estuvieran conmigo para poder compartir mis logros, pero estoy seguro de que siempre me cuidarán y guiarán mi camino en todo momento. A Vanessa Masabanda, quien me brindó su amor y confianza, la persona que me motivaba a continuar, alguien muy especial que creyó en mí desde el principio.

Jhon Anthony Mendoza Maigua

## **AGRADECIMIENTO**

Agradezco a Dios por estar presente en cada paso durante mi formación profesional. También expreso un profundo agradecimiento a la Universidad Politécnica Salesiana y a todos los docentes de la carrera de Ingeniería en Telecomunicaciones, por su amistad, enseñanzas y valores dentro y fuera de las aulas. A mi tutor, el Ing. Milton Tipán, le agradezco su constante apoyo, paciencia y por ser una excelente persona que me ha guiado en el camino para realizar mi trabajo de titulación de la mejor manera posible.

Jhon Anthony Mendoza Maigua

# DISEÑO DE UNA FBG UNIFORME MEDIANTE LA HEURÍSTICA MEJORADA DEL ALGORITMO DE BÚSQUEDA ARMÓNICA

## DESIGN OF A UNIFORM FBG THROUGH THE IMPROVED HEURISTIC OF THE HARMONY SEARCH ALGORITHM

Jhon A. Mendoza<sup>1</sup> , Milton N. Tipán<sup>2</sup> 

### Resumen

Este artículo emplea una heurística mejorada (IHS) del algoritmo de búsqueda armónica para incrementar la precisión y disminuir las iteraciones en comparación con el algoritmo normal. Se exploraron dos enfoques: el primero buscaba lograr una mayor precisión mediante más iteraciones, mientras que el segundo adoptaba un diseño con menos iteraciones pero con mayor precisión que el algoritmo normal. Al incorporar esta heurística mejorada en el diseño de una FBG uniforme, manteniendo los parámetros HSM, HMCR y PAR iguales a los del algoritmo normal, se observa una mejora de 980 veces en precisión. Estos resultados respaldan la preferencia por el algoritmo mejorado para el eficiente diseño de dispositivos ópticos.

**Palabras clave:** FBG, HS, IHS, Optimización.

### Abstract

This article applies an enhanced heuristic of the harmony search algorithm to increase accuracy and reduce iterations compared to the normal algorithm. Two approaches were explored: one focused on achieving greater accuracy with more iterations, and another that preferred a design with fewer iterations but with greater accuracy than the normal algorithm. By implementing this improved heuristic in the design of a uniform Fiber Bragg Grating (FBG), while maintaining the same parameters HSM, HMCR, and PAR as in the normal algorithm, a 980 times improvement in accuracy is achieved. These results support the choice of the enhanced algorithm for efficient design of optical devices.

**Keywords:** FBG, HS, IHS, Optimization.

---

<sup>1</sup>Carrera de Telecomunicaciones, Universidad Politécnica Salesiana, Quito, Ecuador, e-mail: jmendozam7@est.ups.edu.ec

<sup>2</sup>Carrera de Telecomunicaciones, Universidad Politécnica Salesiana, Quito, Ecuador, e-mail: mtipans@ups.edu.ec

## 1. Introducción

Las rejillas de Bragg de fibra óptica (Fiber Bragg Grating, FBG) son fundamentales en comunicaciones ópticas en esta se altera el índice de refracción en una región específica del núcleo de la fibra óptica, reflejando parte de la luz incidente y transmitiendo el resto. Se emplean en filtrado de longitudes de onda, compensación de dispersión y registro. Además, en su diseño la optimización es crucial debido a que pequeños cambios en su estructura física cambia completamente su comportamiento [1]. Las rejillas de fibra óptica ofrecen ventajas, como geometría exclusiva, baja pérdida de inserción y alta pérdida de retorno. Se destaca por su flexibilidad para lograr características espectrales deseadas al variar parámetros físicos como: el cambio de índice de refracción, longitud, periodo del chirp, inclinación de franjas y acoplamiento en una longitud de onda deseada. [2]. Otro aspecto importante a considerar en el diseño de una FBG son los lóbulos laterales que debido a su considerable tamaño, pueden provocar interferencias y afectar el rendimiento de la señal cuando se encuentran en proximidad con otras señales, especialmente en sistemas de multiplexación por división de longitud de onda (Wavelength Division Multiplexing, WDM) [3]. Por otra parte, el Algoritmo de Búsqueda Armónica (Harmony Search, HS) es una metaheurística inspirada en tonos musicales, utilizando la media armónica para equilibrar la optimización de recursos de diseño, además se considera que para obtener una mejora del diseño se logra con algoritmos avanzados, como la heurística mejorada del algoritmo de búsqueda armónica (Improved Harmony Search, IHS). Estos algoritmos permite obtener soluciones efectivas, ajustando dinámicamente parámetros y maximizando la eficacia del sistema, lo que contribuye a una mayor rendimiento. [4] [5]. En este artículo, se propone el uso de la metaheurística IHS, para el diseño de una FBG uniforme dada una amplitud deseada en el lóbulo principal de su espectro óptico. En la sección 2, se representa el marco teórico de la FBG uniforme, la solución analítica, la metaheurística HS y IHS. En la sección 3, se muestra la configuración de la simulación. En la sección 4, se presenta los resultados de la optimización con su respectivo análisis. Finalmente, en la sección 5 las conclusiones serán presentadas.

## 2. Marco teórico

### 2.1. Rejilla de Bragg Uniforme

La Fibra de Bragg uniforme (Uniform Fiber Bragg Grating, UFBG) es un tipo de FBG que se diseña con un período uniforme del perfil del índice de refracción para ajustar las longitudes de onda reflejadas [6]. La figura 1 presenta la configuración de la UFBG, que consta de un revestimiento y el núcleo de la fibra óptica,

cada uno con sus respectivos índices de refracción y la variación del perfil del índice de refracción en el núcleo [9].

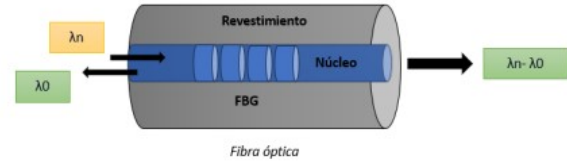


Figura 1. FBG uniforme

La modulación del índice de refracción forma una rejilla que actúa como un filtro óptico selectivo para una longitud de onda específica [13], esto produce un cambio en el período  $\Lambda$  y por ende en la longitud de onda de resonancia  $\lambda_B$  de la UFBG. La relación entre estos parámetros se describe en la ecuación 1, donde  $n_{eff}$  es el índice de refracción efectivo de la UFBG [8].

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

La UFBG se analiza por medio de teoría de modos acoplados (Coupled Mode Theory, CMT), generando un sistema de ecuaciones diferenciales ecuación 2 y ecuación 3, el cual tiene una solución analítica. Donde  $A_j$  y  $B_j$ , son las ondas propagantes y contra propagantes [14]. En estas, se desprecian los términos de las ecuaciones diferenciales que contienen una dependencia rápida de  $z$ , ya que contribuyen poco al crecimiento y decaimiento de las amplitudes.

$$\begin{aligned} \frac{dA_j}{dz} = & i \sum_k A_k (K_{kj}^t + K_{kj}^z) \exp [i(\beta_k - \beta_j)z] \\ & + i \sum_k B_k (K_{kj}^t - K_{kj}^z) \exp [-i(\beta_k + \beta_j)z] \quad (2) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \frac{dB_j}{dz} = & -i \sum_k A_k (K_{kj}^t - K_{kj}^z) \exp [i(\beta_k + \beta_j)z] \\ & - i \sum_k B_k (K_{kj}^t + K_{kj}^z) \exp [-i(\beta_k - \beta_j)z] \quad (3) \end{aligned}$$

En las ecuaciones 2 y 3,  $K_{kj}^t(z)$  es el coeficiente de acoplamiento transversal entre los modos  $j$  y  $k$ , definidos por la ecuación 4.

$$K_{kj}^t(z) = \iint dx dy \Delta \varepsilon(x, y, z) \vec{e}_{kt}(x, y) \cdot \vec{e}_{jt}^*(x, y) \quad (4)$$

$$\frac{dR}{dz} = i\hat{\sigma}(R)(z) + ikS(z) \quad (5)$$

$$\frac{dS}{dz} = -i\hat{\sigma}(S)(z) + ikR(z) \quad (6)$$

La eliminación de esta dependencia de  $z$ , resulta en el sistema de ecuaciones diferenciales simplificadas



ecuación 5 y ecuación 6. Donde las ecuaciones determinan las amplitudes de las variables  $R$  y  $S$  siendo  $R(z) \equiv A(z) \exp(i\delta z - \phi/2)$  y  $S(z) \equiv B(z) \exp(i\delta z + \phi/2)$ . En estas ecuaciones,  $k$  (componente AC) es el coeficiente de acoplamiento y  $\hat{\sigma}$  es el coeficiente de acoplamiento (componente DC), definido por la ecuación 7.

$$\hat{\sigma} \equiv \delta + \sigma - \frac{1}{2} \frac{d\phi}{dz} \quad (7)$$

Donde, La desintonización  $\sigma$  es independiente de  $z$  en todas las rejillas y  $\delta$  es .... y esta dada por la ecuación 8.

$$\begin{aligned} \delta &\equiv \beta - \frac{\pi}{\Lambda} \\ &= \beta - \beta_D \\ &= 2\pi\eta_{\text{eff}} \left( \frac{1}{\lambda} - \frac{1}{\lambda_D} \right) \end{aligned} \quad (8)$$

Donde,  $\lambda_D \equiv 2\eta_{\text{eff}}\Lambda$  es la longitud de onda del diseño para una rejilla de Bragg. Se observa también que cuando  $\delta = 0$ ,  $\lambda = 2\eta_{\text{eff}}\Lambda$ .

$$\sigma = \frac{2\pi}{\lambda} \overline{\delta\eta_{\text{eff}}} \quad (9)$$

$$k = k^*$$

$$k = \frac{\pi}{\lambda} \overline{v\delta\eta_{\text{eff}}} \quad (10)$$

Si la rejilla se presenta uniforme a lo largo de  $z$ , entonces  $\overline{\delta\eta_{\text{eff}}}$  es un valor constante y  $d\phi/dz = 0$ . En este caso,  $k$ ,  $\sigma$ , y  $\hat{\sigma}$  son constantes dadas por la ecuación 5 y la ecuación 6. Estas ecuaciones diferenciales ordinarias de primer orden acopladas, con coeficientes constantes, tienen condiciones contorno asociadas dadas por la ecuación 9 y la ecuación 10. La reflectividad presente en una rejilla de fibra uniforme de longitud  $L$  se puede hallar suponiendo una onda que incide desde  $z = -\infty$  con  $R(-L/2) = 1$  y exigiendo que no exista para  $z \geq L/2$  con  $S(-L/2) = 0$ . La solución analítica de la UFBG, de la amplitud y el coeficiente de reflexión de potencia  $\rho$  y  $r$  respectivamente, están dados la ecuación 11 y la ecuación 12 [15].

$$\rho = \frac{-k \cdot \sinh(\sqrt{k^2 - \hat{\sigma}^2}L)}{\hat{\sigma} \cdot \sinh(\sqrt{k^2 - \hat{\sigma}^2}L) + i(\sqrt{k^2 - \hat{\sigma}^2}L) \cosh(\sqrt{k^2 - \hat{\sigma}^2}L)} \quad (11)$$

$$r = \frac{\sinh^2(\sqrt{k^2 - \hat{\sigma}^2}L)}{\cosh^2(\sqrt{k^2 - \hat{\sigma}^2}L)} - \frac{\hat{\sigma}^2}{k^2} \quad (12)$$

## 2.2. Algoritmo HS Normal

El algoritmo de búsqueda de armónica (Harmony Search, HS) mostrado en el algoritmo 1, es un algoritmo de agrupamiento que simultáneamente implementa diversas armonías, inspirado en la improvisación musical y adaptado a variables discretas y

continuas [16] [12]. Destaca por su rapidez en encontrar convergencia, siendo computacionalmente eficiente. Aunque su formulación ha sido exitosa en problemas de optimización en diversas áreas, usa valores fijos para los parámetros de control [9]. El algoritmo Harmony Search (HS) requiere la configuración de varios parámetros cruciales para su operación eficiente estos son:

- **Tamaño de la memoria armónica (HMS):** Este parámetro que establece la cantidad de elementos que pueden ser almacenados en la memoria armónica.
- **Memoria armónica considerando la tasa (HMCR):** HMCR se refiere a la probabilidad de construir una nueva armonía basada en elementos almacenados en la memoria armónica (HM). Es una representación probabilística fundamental para la generación de soluciones actualizadas.
- **Tasa de ajuste del tono (PAR):** PAR determina la probabilidad de realizar ajustes en soluciones ya generadas. Es esencial para equilibrar la exploración del espacio de búsqueda.
- **Número de improvisaciones (NI):** Establece el número máximo de iteraciones o generaciones del algoritmo. Determina cuándo el algoritmo debe terminar la búsqueda.
- **Ancho de banda de ajuste del tono (BW):** El parámetro BW representa el rango de ajuste permitido al modificar una solución existente.

---

### Algorithm 1 Algoritmo Normal HS

---

```

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

```

---

## 2.3. Algoritmo HS Mejorado

La algoritmo de búsqueda armónica mostrado en el algoritmo 2, es la versión mejorada (IHS) que genera soluciones mediante el ajuste dinámico de parámetros como la tasa de ajuste del tono (PAR) y el ancho de banda (BW). Este enfoque modifica el algoritmo original, especialmente en la etapa de creación

de nuevas armonías, donde PAR y BW experimentan cambios dinámicos con el aumento de iteraciones. Este ajuste dinámico mejora la precisión y la velocidad de convergencia [10]. La variante del algoritmo ha superado exitosamente desafíos de optimización mediante pruebas exhaustivas. Los parámetros PAR y BW son fundamentales y se adaptan dinámicamente para maximizar la eficiencia del algoritmo, en el nuevo modelo mejorado, el parámetro de control PAR cambia iterativamente. En cada iteración "t" del algoritmo IHS, PAR(t) se determina dentro de un rango limitado por los parámetros de ajuste PAR min y PAR max como se muestra en la ecuación 14. Además, se considera una variable degree(t) que incorpora características de la matriz HM dada por la ecuación 13, como la aptitud mínima Fmin(t), la aptitud máxima Fmax(t), y el valor promedio de aptitud mean(F) de las soluciones almacenadas en la matriz de armonía HM [11] [7].

$$degree(t) = \frac{F_{\max(t)} - \text{mean}(F)}{F_{\max(t)} - F_{\min(t)}} \quad (13)$$

$$PAR(t) = PAR_{\min}(t) + (PAR_{\max} - PAR_{\min}) \times degree(t) \quad (14)$$

---

#### Algorithm 2 Algoritmo de Búsqueda Mejorada

---

```

for i ← 1 to NI do
  Determinar Fmin(t); Fmin(t) and mean(F)
  Calcular: grado(t) y PAR(t)
  if rand_2 < PAR(t) then
    Nuevo Ajuste De Tono
     $x_i^{\text{new}} = x_{(i+c)}$ ,  $c \in [-1, 1]$ 
  end if
end for

```

---

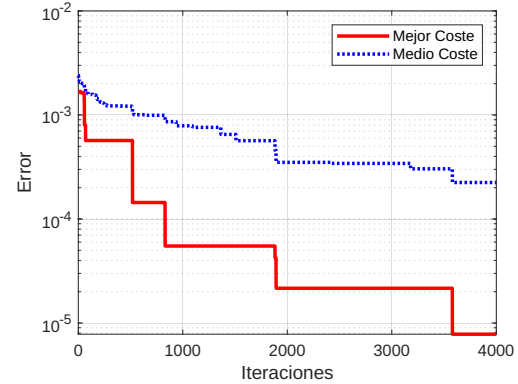
### 3. Configuración de la simulación

La simulación de la FBG uniforme fue realizada sobre la base de la solución analítica del espectro, simulada en una fibra óptica SMF-28, el perfil del índices de refracción del núcleo  $n_1 = 1.449$  y del recubrimiento  $n_2 = 1.444$ , longitud de onda central  $\lambda_{\text{Brag}}$  fue fijada en  $1550 \times 10^{-9}$ m, su lóngitud fue optimizada dado una amplitud del primer lóbulo secundario. Se utilizó el HS normal con los valores del HSM, HMCR, PAR y BW se implementó 10, 0.92, 0.2 y 0.02 respectivamente, estos parámetros de ajuste fueron elegidos previo al análisis realizado en el algoritmo normal tomando valores para cada variable y determinando de tal manera su precisión y estabilidad, ya que valores que son diferentes a los considerados afecta al desempeño del algoritmo. Luego, se procedió a optimizar con el IHS, con los mismos parámetros del HS normal, considerando los valores adicionales que son PAR Min y PAR Max [17]. Al

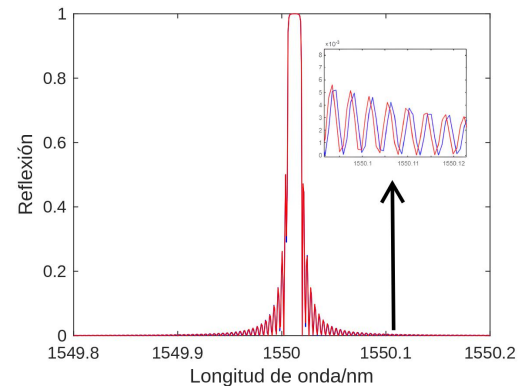
implementarse en el IHS, se demostró que su eficiencia estaba influenciada por el rango de límites adoptados para PAR. Entonces, se analizó el comportamiento del proceso de mejora de IHS en orden creciente para PAR min y Par Max, buscando una configuración óptima para el sistema. Los valores considerados fueron valores al azar desde 0.001 hasta 0.35. Para ambos algoritmos se tomó como referencia 4000 iteraciones, los algoritmos así como la simulación del espectro de la UFBG fueron realizados en Matlab R2021b.

### 4. Resultados y Análisis

Los resultados de la optimización mediante el algoritmo HS normal de la UFBG es mostrada en la figura 2, se observó que en las 4000 iteraciones, se consiguió un error de  $7.80764 \times 10^{-6}$ . El espectro de referencia (rojo) y el resultante de la optimización (azul) es mostrado en la figura 3, una variación debido al error es observado en la figura insertada.



**Figura 2.** Optimización de la UFBG con el algoritmo HS Normal



**Figura 3.** Espectro resultante del algoritmo UFBG del algoritmo HS normal.

Par Min	Par Máx	Error	Iteraciones
0.001	0.35	3.72615e-06	862
0.01	0.4	7.68386e-06	141
0.1	0.4	7.68386e-06	141
0.3	0.35	2.48492e-08	21

**Tabla 1.** Parámetros de ajuste PAR Min y PAR Max dentro de los valores considerables como óptimos para el algoritmo IHS.

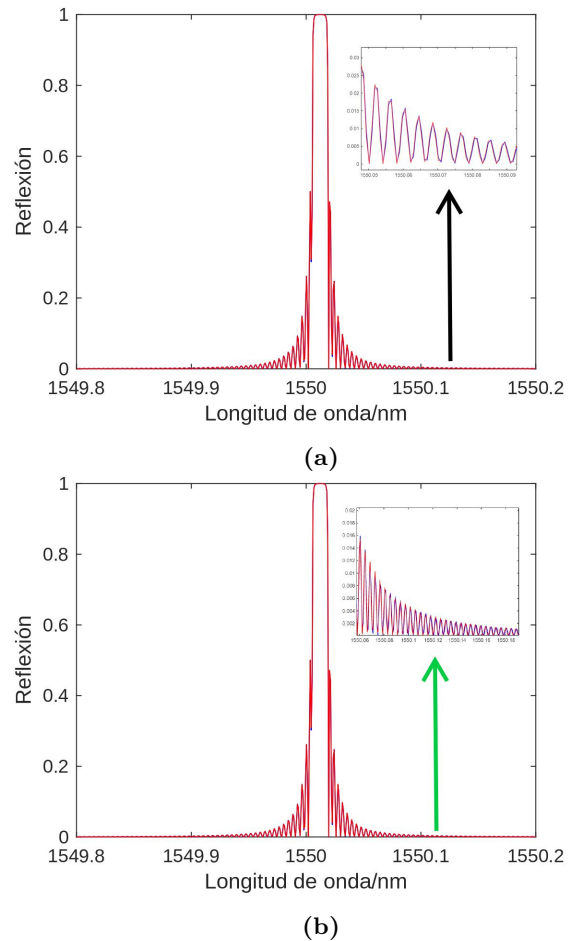
Entonces, para realizar una comparación con el algoritmo de IHS fue necesario conocer el comportamiento de convergencia del algoritmo IHS, tanto del error como de las iteraciones, se eligieron valores aleatorios del PAR Min y PAR Max. La tabla 1, muestra los resultados de esta simulación, se observa que existe una mejora tanto en el número de iteraciones como del error cuando la diferencia en entre el PAR Min y el PAR Max es de 0.05. Lo anterior hizo inferir que es posible encontrar valores óptimos para  $0 \leq Par(Max \text{ o } Min) \leq 1$ , por lo cual se generó una nueva simulación para este rango. Se observó un comportamiento de mejora del error y en las iteraciones para valores mayores a 0.45. Sin embargo, se tuvo valores atípicos en el rango de 0.30 y 0.35, al igual que e 0.4. Se tomo en consideración el primer intervalo ya que en el último valor el número de iteraciones crece, esto puede verse en la tabla 2.

Par Min	Par Máx	Error	Iteraciones
0.00	0.05	7.68386e-06	141
0.05	0.1	7.68386e-06	141
0.1	0.15	7.68386e-06	141
0.15	0.2	7.68386e-06	141
0.2	0.25	5.90192e-06	1103
0.25	0.30	3.09064e-07	138
0.3	0.35	2.48492e-08	21
0.31	0.34	2.61342e-10	997
0.35	0.4	2.48492e-08	21
0.4	0.45	4.18939e-09	1458
0.45	0.50	2.48492e-08	21
0.50	0.55	2.48492e-08	21
0.55	0.6	2.48492e-08	21
0.6	0.65	2.48492e-08	21
0.65	0.70	2.48492e-08	21
0.70	0.75	2.48492e-08	21
0.75	0.80	2.48492e-08	21
0.80	0.85	2.48492e-08	21
0.85	0.90	2.48492e-08	21
0.90	0.95	2.48492e-08	21
0.95	1.00	2.48492e-08	21

**Tabla 2.** Comportamiento del Algoritmo IHS para delta PAR de 0.05 considerando así este valor como el mejor en rendimiento.

Par Min	Par Máx	Error	Iteraciones
0.30	0.35	2.48492e-08	21
0.31	0.35	2.61342e-10	997
0.32	0.35	2.48492e-08	21
0.33	0.35	2.48492e-08	21
0.34	0.35	2.48492e-08	21

**Tabla 3.** Comportamiento de intervalo atípico de algoritmo IHS



**Figura 4.** Espectro UFBG para algoritmo IHS (a) precisión de  $2.48492 \times 10^{-8}$ , (b) precisión de  $2.61342 \times 10^{-10}$ .

Por lo anterior, se realizó un análisis de este intervalo cuyos resultados se muestran en la tabla 3. Una mejora significativa en el error es observado en el intervalo de 0.31 – 0.35 a costa del incremento de las iteraciones, sin embargo este no es excesivo comparado a las 4000 iteraciones limitantes, también se corrobora que se mantiene en este intervalo el error para el mínimo de iteraciones de 21 existente para valores mayores a 0.45. Con el fin de confirmar estos resultados, se realiza la optimización de la longitud de una UFBG para cada uno de los rangos establecidos en la tabla 3, los resultados son presentados en la figura 4 con los dos enfoques principales para el algoritmo de búsqueda

mejorado. En la figura 4 (a) y (b) insertadas muestran como la variación entre el espectro de referencia y el optimizado se reduce significativamente.

## 5. Conclusiones

Al aplicar la heurística mejorada al algoritmo de búsqueda armónica para optimizar los valores de diseño de la UFBG, se ha demostrado que IHS es altamente eficaz, mejorando sustancialmente tanto la precisión con valores de error de  $2.48492 \times 10^{-8}$ , con el menor número de iteraciones (21) en comparación con el algoritmo heurístico normal (3580 iteraciones) y un error de  $7.80764 \times 10^{-6}$ . La exploración de los dos enfoques planteados, ha permitido experimentar mejoras eficientes en sus resultados de rendimiento, proporciona flexibilidad para adaptarse a distintos contextos. Se recomienda el uso de valores de PAR entre 0.30 y 0.35 para el primer enfoque, y entre 0.31 y 0.35 para el segundo. Presentando así una mejora significativa de aproximadamente 980 veces en la optimización de resultados, manteniendo los parámetros HSM, HMCR y PAR similares al algoritmo normal. Considerando la posibilidad de estudiar el comportamiento del parámetro de ancho de banda del algoritmo IHS, se abre una vía para continuar perfeccionando el diseño de dispositivos ópticos, buscando una mayor precisión en sus parámetros físicos y un desempeño superior en sistemas de transmisión.

## Referencias

- [1] Alustiza, D. H., Mineo, M., Aredes, D. E., & Russo, N. A. (2019). Fabricación local de sensores de fibra óptica aplicables al sentido de magnitudes relevantes en ingeniería civil.
- [2] Gill, A. S. (2004). Reconstruction of Optical Fiber Bragg Grating Sensor Strain Distributions Using a Genetic Algorithm.
- [3] V. H. Aristizábal, “Fibra micro-estructurada para la compensación de la dispersión cromática en sistemas de comunicaciones ópticas,” *Microstructured fiber for chromatic dispersion compensation in optic communication systems*, vol. 76, pp. 63–69, 2009.
- [4] Peters, K., Studer, M., Botsis, J., Iocco, A., Limberger, H., & Salathé, R. (2001). Embedded optical fiber bragg grating sensor in a nonuniform strain field: Measurements and simulations. *Experimental Mechanics*, 41(1), 19–28.
- [5] A. B. Rodríguez, L. J. Ramírez, and G. A. Puerta, “Entropía topológica: nuevo enfoque para el testeo de algoritmos heurísticos en redes ópticas,” *Inf. tecnológica*, vol. 33, no. 4, pp. 31–40, 2022.
- [6] C. De Telecomunicaciones, “Universidad Politécnica salesiana sede quito diseño de una rejilla de Bragg chirp mediante el algoritmo de búsqueda armónica.”
- [7] M. V. dos Santos, G. A. Brigatto, and L. P. Garcés, “Methodology of solution for the distribution network reconfiguration problem based on improved harmony search algorithm,” *IET Gener. Transm. Distrib.*, vol. 14, no. 26, pp. 6526–6533, 2020.
- [8] Bhatia, N., Rustagi, K. C., & John, J. (2014). Single LP 0, n mode excitation in multimode fibers. *Optics express*, 22(14), 16847–16862.
- [9] J. L. Cuadrado Diaz and E. I. Mayorga Campoverde, “Reconstrucción de la tensión aplicada a una rejilla de Bragg uniforme utilizando el algoritmo de búsqueda armónico,” 2022.
- [10] A. B. Rodríguez, A. L. Gutierrez, L. A. Rivera, and L. J. Ramirez, “Ruteo y Asignación de Longitud de Onda: Comparación de Algoritmos Genéticos y Templado Simulado,” *Inf. tecnológica*, vol. 25, no. 4, pp. 13–18, 2014.
- [11] O. Alumno, J. Alberto Molina García director, and E. Ramos Méndez, “Algoritmo de Búsqueda Armónica: Fundamentos y resolución de problemas de optimización con restricciones.”
- [12] Xiaomeng, Z., Dezhi, Z., & Fei, W. (2011). Application of harmony search algorithm on the optimization of fiber Bragg grating reflection spectrum. In *The IEEE 8th International Symposium on Instrumentation and Control Technology (ISICT)* (pp. 262-266).
- [13] Russo, N. A., Noriega, S. B., & Duchowicz, R. (2011). Implementación de Sistema Óptico para Grabado de Redes de Bragg en Fibra Óptica. *Información Tecnológica*, 22(2), 121–130.
- [14] L. Lopez Hernandez, “Diseño de un sensor de corriente basado en una FBG recubierta de Galfenol por electrodeposición y con elevada magnetostricción,” *Universitat Politècnica de València*, 2020.
- [15] Erdogan, T. (1997). Fiber grating spectra. *Journal of Lightwave Technology*, 15(8), 1277–1294.
- [16] Molina García, J. A. (2019). Algoritmo de Búsqueda Armónica: Fundamentos y resolución de problemas de optimización con restricciones.
- [17] Zhao, X., Zheng, D., & Wu, F. (2012, July). 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* (pp. 262-266). IEEE.