



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

**RECONSTRUCCIÓN DE LA TENSIÓN APLICADA  
A UNA REJILLA DE BRAGG UNIFORME  
UTILIZANDO EL ALGORITMO DE BÚSQUEDA  
ARMÓNICO**

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

AUTORES: JORGE LUIS CUADRADO DIAZ  
EMILIO ISRAEL MAYORGA CAMPOVERDE

TUTOR: MILTON NAPOLEÓN TIPÁN SIMBAÑA

Quito-Ecuador  
2022

## CERTIFICADO DE RESPONSABILIDAD Y AUTORÍA DEL TRABAJO DE TITULACIÓN

Nosotros, Jorge Luis Cuadrado Diaz con documento de identificación N° 1725935694 y Emilio Israel Mayorga Campoverde con documento de identificación N° 1726204157; 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, 04 de agosto del año 2022

Atentamente,



---

Jorge Luis Cuadrado Diaz  
1725935694



---

Emilio Israel Mayorga Campoverde  
1726204157

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

Nosotros, Jorge Luis Cuadrado Diaz con documento de identificación No. 1725935694 y Emilio Israel Mayorga Campoverde con documento de identificación No. 1726204157, 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: “Reconstrucción de la Tensión Aplicada a una Rejilla de Bragg Uniforme Utilizando el Algoritmo de Búsqueda Armónico”, 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, suscribimos este documento en el momento que hacemos la entrega del trabajo final en formato digital a la Biblioteca de la Universidad Politécnica Salesiana.

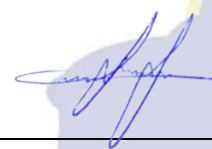
Quito, 04 de agosto del año 2022

Atentamente,



---

Jorge Luis Cuadrado Diaz  
1725935694



---

Emilio Israel Mayorga Campoverde  
1726204157

## 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: RECONSTRUCCIÓN DE LA TENSIÓN APLICADA A UNA REJILLA DE BRAGG UNIFORME UTILIZANDO EL ALGORITMO DE BÚSQUEDA ARMÓNICO, realizado por Jorge Luis Cuadrado Diaz con documento de identificación N° 1725935694 y por Emilio Israel Mayorga Campoverde con documento de identificación N° 1726204157, 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, 04 de agosto del año 2022

Atentamente,



---

Ing. Milton Napoleón Tipán Simbaña, MSc  
1713583126

## DEDICATORIA

*En el presente artículo se lo dedico principalmente a mi familia, mi padre Jorge Mayorga ya que con esfuerzo me ayudó a estudiar en ésta distinguida universidad y en especial a mi madre quien con sueño, cansancio y a veces sin entender lo que me sucedía siempre está presente, levantándose más temprano para que donde sea que vaya esté bien alimentado y mis hermanos Sophyanne Mayorga y Joed Mayorga quienes son mi ejemplo, consejeros para cualquier tipo de situación, los amo con todo mi corazón, por el apoyo incondicional que han tenido en mis días más oscuro y claros y también un agradecimiento especial a mi enamorada Daya Egas quien siempre estuvo pendiente de haga las cosas y no desfallezca en ninguna materia por más compleja que pareciera para la culminación de la carrera de ingeniería en Telecomunicaciones.*

*Emilio Israel Mayorga Campoverde*

*Este artículo de investigación se lo dedico con todo mi amor a mi madre Carmita Díaz y a mi padre Luis Cuadrado ya que, con su compañía y a su sacrificio logré dar lo mejor de mí y nunca me rendí a pesar de las dificultades que se presentaban en todo mi vida y carrera universitaria. A mis hermanos, mi pareja y mi familia que me brindaron todo su amor y apoyo en momentos cruciales dándome valor y firmeza para poder conseguir mi objetivo y lograr conseguir con éxito la culminación de mi carrera en ingeniería en telecomunicaciones.*

*Jorge Luis Cuadrado Diaz*

## AGRADECIMIENTO




*Nuestro más grande agradecimiento a Dios por bendecirnos para lograr la culminación de la carrera, que continúe con su guía tanto en la vida personal como en la profesional.*

*Para nuestros padres quienes son el pilar de nuestras vidas y siempre estar pendientes de nosotros logrando orientar a lo largo de nuestra carrera y ahora cosechar este triunfo que en parte también es de ellos.*

*Un agradecimiento especial hacia nuestro tutor, por brindarnos su guía, paciencia y ayuda a diferentes horarios de las tutorías durante y después de este proyecto de investigación.*

# RECONSTRUCCIÓN DE LA TENSIÓN APLICADA A UNA REJILLA DE BRAGG UNIFORME UTILIZANDO EL ALGORITMO DE BÚSQUEDA ARMÓNICO

## RECONSTRUCTION OF STRESS APPLIED TO A UNIFORM BRAGG GRATING USING THE HARMONIC SEARCH ALGORITHM

Emilio Mayorga <sup>1</sup> , Jorge Cuadrado <sup>2</sup> , Milton N. Tipán <sup>3</sup> 

### Resumen

La salud estructural de una construcción civil es vital, más aún, cuando es afectada con distribuciones de fuerza no lineal que alteran en mayor medida y de manera súbita a las estructuras. El encontrar esta fuerza mediante el diseño inverso de una FBG uniforme usando la metaheurística del algoritmo de búsqueda armónica es propuesto en este artículo, Los resultados muestran una reducción de la función de coste en aproximadamente un 150%, con los parámetros HSM=8, HMCR=0.91 y PAR =0.15 luego de su caracterización.

**Palabras clave:** Problema inverso, No lineal, FBG, Algoritmo de Búsqueda Armónica.

### Abstract

Structure's health is mandatory within a civil construction, even more when it will be under non-linear stress distributions which suddenly affect structures in more or less measure. It is proposed finding this stress through the inverse design of uniform FBGs using metaheuristics of a Harmony Search Algorithm in this article, the results show a reduction of the cost's function around a 150%, with the parameters HSM=8, HMCR=0.91 and PAR =0.15 right after its characterization.

**Keywords:** Inverse Problem, No linear, FBG, Harmony Search Algorithm, Simulation.

---

<sup>1</sup>Carrera de Telecomunicaciones, Universidad Politécnica Salesiana, Quito, Ecuador, e-mail: emayorgac1@est.ups.edu.ec

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

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

## 1. Introducción

Los sensores de rejilla de Bragg para fibra óptica (Fiber Bragg Grating, FBG) son dispositivos ópticos con la capacidad y potencial para un monitoreo estructural robusto debido a su resistencia, tamaño, sensibilidad e inmunidad electromagnética; esto los convierten en componentes ideales para trabajar en la medición de parámetros físicos y bioquímicos en estructuras. Los sensores FBG como sistema de medición reduce el cableado en estructuras, debido a su reducido peso y tamaño, tienen una gran tolerancia a las temperaturas, humedad o ambientes hostiles y una gran capacidad de ser incrustados en diferentes tipos de materiales sin modificar las características de las estructuras [1].

La presencia de daño estructural (grietas, ranurado y perforación) efectuará una concentración de tensión con notables gradientes de deformación no lineal. La deformación o daño recibido en la región afectada contiene información importante para distinguir la magnitud y el tipo de daño [2]- [8]. En investigaciones recientes se utilizaron las características espectrales de sensores de fibra óptica con el fin de monitorear las grietas transversales y también el comportamiento de fracturas en una estructura. Para definir o estimar el daño en la estructura se tomaron en cuenta variables como la longitud de onda central, el ancho de banda (Full Width at Half Maximum, FWHM) y los lóbulos laterales [5]. Por lo tanto, tomar en cuenta diferentes gradientes o formas de distribución de la deformación y la variación espectral son de importancia práctica al momento de monitorear la salud estructural.

El problema inverso o la reconstrucción del perfil de deformación (fuerza no lineal) a partir del espectro medido es un problema que no tiene una solución de forma cerrada conocida, pero se han propuesto varios métodos de optimización con los cuales se puede llegar a una solución con errores mínimos [5]- [8]. Algoritmos de optimización global como el reconocido (simulado), algoritmo genético y el algoritmo de evolución diferencial, son los más utilizados comúnmente. Además, otras metaheurísticas como el de búsqueda armónica (Harmony Search Algorithm, HSA), han sido utilizados para encontrar distribuciones lineales de la deformación, esta metaheurística por su gran capacidad de evitar óptimos locales la convierte en una metaheurística de optimización ideal para trabajar con funciones complejas y una gran cantidad de datos [2].

En este artículo se propone el uso de la metaheurística HSA, para hallar la distribución no uniforme de una deformación aplicada a la FBG. En la sección 2, se expone una descripción breve de la FBG uniforme, método de la matriz T, la metaheurística y la configuración de la simulación. En la sección 3, Los resultados de la optimización serán mostrados con su respectivo análisis. Finalmente, en la sección 4 las conclusiones serán presentadas.

## 2. Materiales y métodos

### 2.1. Matriz T para fuerza no uniforme aplicada a FBG

Una FBG tiene características singulares para las estructuras, donde se utiliza su función como sensor. La fibra tiende a estirar o comprimirse, entonces el sensor medirá la tensión, esto sucede porque la deformación de la fibra tiende a cambiar su longitud de onda, ancho de banda y su microestructura [4] [1] [7].

La Fig. 1 muestra la estructura de la FBG, la cual está compuesta por revestimiento y núcleo con sus respectivos índices de refracción, así como la rejilla incrustada en el núcleo de la fibra óptica [10].

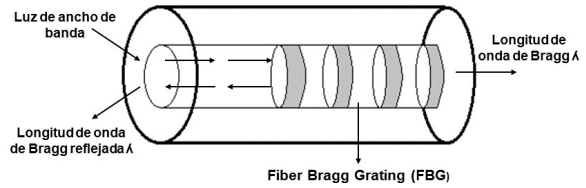


Figura 1. Esquema de un FBG uniforme.

Al variar la micro estructura por una fuerza externa, cambia el periodo de la misma  $\Lambda$  y por lo tanto la longitud de onda de resonancia  $\lambda_B$  de ésta. La ecuación 1, muestra su relación donde  $n_{eff}$  es el índice de refracción efectivo de la FBG [4].

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

Según [10], la dependencia de la fuerza en la rejilla de Bragg puede ser determinada por la variación de la longitud de onda  $\Delta\lambda$ , como se observa en la ecuación 2 .

$$\begin{aligned} \Delta\lambda &= \frac{\lambda(n_{eff})\Lambda}{n_{eff}\Lambda} = \left(1 + \frac{1}{n_{eff}} \frac{\partial n_{eff}}{\partial \epsilon}\right) \Delta\epsilon = \\ &= (1 + p_e) \Delta\epsilon \frac{\Delta\lambda}{\lambda_0} = k \Delta\epsilon \end{aligned} \quad (2)$$

Donde:

$K$ = factor de la red de Bragg.

$p_e$ = constante de fotoelástica.

$\Delta\epsilon$ = entradas del tensor de perturbación dieléctrica en la región segmentada.

Lo que significa que la sensibilidad de la fuerza en la FBG viene dada por la expresión dada en la ecuación 4:

$$\frac{\Delta\lambda}{\Delta\epsilon} = k \lambda_0 = 0.79 \lambda_0 \quad (3)$$

Por otro lado, el modelado del problema en la FBG para lograr el cálculo del espectro de respuesta se encuentra gobernado por un sistema de ecuaciones



diferenciales acopladas obtenidas a partir de la teoría de modos acoplados (Coupled Mode Theory, CMT), ésta tiene una solución analítica si la fuerza aplicada a la FBG es lineal. Debido a que estamos tratando con fuerzas lineales y no lineales, ésta expresión analítica no es válida por lo que se implementa el método de la matriz T que es un método estándar para el análisis del grado de distorsión en el espectro debido a la distribución de la deformación no uniforme en una estructura real, ésta divide a la FBG en secciones donde se asume parámetros uniformes [3] [9]- [11].

Para ello se define la variable  $x$  a largo del eje de la FBG dentro del intervalo  $-\frac{L_B}{2} \leq x \leq \frac{L_B}{2}$ , siendo  $L_B$  la longitud de la FBG con  $M$  segmentos de ancho  $\Delta x$ . También se define,  $F_i(\lambda)$  como la matriz de transferencia en el  $i$  segmento. la ecuación 6, relaciona la intensidad de campo eléctrico directo  $R_i$  y el reflejado  $S_i$  [9]- [11]:

$$\begin{bmatrix} R_i \\ S_i \end{bmatrix} = F_i(\lambda) \begin{bmatrix} R_{i-1} \\ S_{i-1} \end{bmatrix}, i, \dots, M \quad (4)$$

Las condiciones para el contorno de la FBG están dadas por  $R(-\frac{L_B}{2}) = 1$ ,  $S(-\frac{L_B}{2}) = 0$ , por lo tanto las intensidades de salida total estará dada como se indica en la ecuación 8.

$$\begin{bmatrix} R(-\frac{L_B}{2}) \\ S(-\frac{L_B}{2}) \end{bmatrix} = F \begin{bmatrix} R(\frac{L_B}{2}) \\ S(\frac{L_B}{2}) \end{bmatrix} \quad (5)$$

Donde  $F = F_M(\lambda) * F_{M-1}(\lambda) \dots F_1(\lambda)$  y  $F_i(\lambda)$  está dada por la ecuación 7. En esta,  $\gamma_i = \sqrt{k^2 - \hat{\sigma}_i^2}$ ,  $k = \frac{\pi}{\lambda \zeta \delta n_{eff}}$ , es el parámetro para el acoplamiento "AC", donde  $\zeta \delta n_{eff}$  es el cambio de amplitud del índice inducido dentro de un período. Y el parámetro de acoplamiento "DC" está dado por la ecuación 6:

$$\hat{\sigma}_i = 2\pi n_{eff} \frac{1}{\lambda} - \frac{\pi}{\hat{\Lambda}_i(x)} + \frac{2\pi}{\lambda} \overline{\delta n_{eff}} \quad (6)$$

En la cual,  $\hat{\Lambda}_i(x) = \Lambda_0 [1 + (1 - P_e) \epsilon_{xx}(x) + (1 - P_e) \epsilon'_{xx}(x)x]$ , siendo la longitud de onda de trabajo  $\lambda_0 = 2n_{eff} \Lambda_0$  y  $\epsilon'_{xx}$  la primera derivada de la función de la fuerza aplicada.

## 2.2. Algoritmo de Búsqueda Armónica (HSA)

El HSA es un algoritmo metaheurístico que se basa en la hipótesis de la improvisación musical el cual tiene como objetivo encontrar un excelente estado de

armonía, trata de lograr una gran variedad de combinación de sonidos que aporten calidad y perfección a la pieza que se está interpretando, cada variable de decisión toma valores aleatorios dentro de cierto rango, formando un vector solución, en donde dicho vector solución será el resultado de la búsqueda del mejor conjunto de parámetros que se adecúe al resultado que se desea conseguir, además éste algoritmo puede procesar tanto variables discretas como continuas y converge rápidamente. [13] [14].

En el HSA el uso de la memoria armónica (Harmony Memory Size, HMS), es parecido a una selección de individuos mejor adaptados como lo es, en el algoritmo genético, pero con la diferencia de que en el HSA sólo serán elegidas las mejores armonías, las cuales formarán parte de la nueva memoria armónica [14].

La eficiencia de esta búsqueda dependerá de una tasa de aceptación de la memoria armónica, donde  $r \in [0, 1]$  también conocida como (Harmony Memory Chose Rate, HMCR), que se escoge al azar de la memoria armónica, como se puede ver reflejado en la ecuación 7 [13].

$$H_i^{new} = H_i^{old} + BW * r_i, r_i \in [0, 1] \quad (7)$$

En donde la  $H_i^{old}$  es el tono que ya existe en la memoria armónica;  $H_i^{new}$  es el tono después del ajuste realizado; y  $r_i \simeq$  HMCR que es un generador de números aleatorios en un intervalo de  $[0, 1]$ . El ancho de banda (Bandwidth, BW) indica el valor de separación que existe entre los valores que dividen arbitrariamente el rango total de los valores de decisión, es la desviación típica de los valores cuando  $X_i \in$  HMCR, definida como  $BW = \sigma(X_i) = \sqrt{\sigma^2(X_i)}$ .

El uso de la aleatorización impulsa al algoritmo a explorar diversas áreas de búsqueda con el fin de encontrar soluciones óptimas globales [13]. Así también, el ajuste de tono PAR (Pitch Adjusting Rate) el cual controla el grado de ajuste y contribuye en gran medida al hallazgo de soluciones globales y locales, respectivamente. El tono es la variación probabilística del PAR expresada como  $P_{tono} = r_i * PAR$ , esto permite ver que si el PAR tiene un ajuste de tono bajo y el ancho de banda es estrecho la convergencia del algoritmo se verá ralentizada, debido a que se limitará el espacio de búsqueda. Por otro lado, si el PAR tiene un ajuste de tono muy alto con un ancho de banda amplio el algoritmo puede oscilar en torno a una solución óptima. El funcionamiento del HSA se describe en algoritmo 1 [12]:

$$F_i(\lambda) = \begin{bmatrix} Cosh(r_i \Delta x) - i \frac{\hat{\sigma}_i}{r_i} Sinh(r_i \Delta x) & -i \frac{k}{r_i} Sinh(r_i \Delta x) \\ i \frac{k}{r_i} Sinh(r_i \Delta x) & Cosh(r_i \Delta x) - i \frac{\hat{\sigma}_i}{r_i} Sinh(r_i \Delta x) \end{bmatrix} \quad (8)$$

**Algoritmo 1** Heurística de Búsqueda Armónica**Entrada:**Función objetivo  $f(x), x = (x_1, x_2, \dots, x_d)^T$ Número de iteraciones **NI**Tamaño de la población **HMS**

Tasa de consideración de la memoria armónica

**HMCR**Tasa de ajuste de tono **PAR**Ancho de banda **BW****Result:** Mejor armoníaHM = inicialización de la memoria armónica  
evaluar(HM)**for**  $i = 0 : i = NI$ **for each**  $x_p \in x'$ **if**  $U(0.1) < HMCR$  **then**

consideración de la memoria

 $x'_p = x_p^j$  donde  $j = U(1, \dots, HMS)$ **if**  $U(0.1) \leq PAR$  **then**

Ajuste de tono

**if**  $U(0.1) \leq 0.5$  **then** $x'_p = x'_p - U(0.1) \times BW$ **else if** $x'_p = x'_p + U(0.1) \times BW$ **else** $x'_p = LB + r \times (UB - LB)$ **end****else**evaluar( $x'_i$ )/\* calcular la aptitud de la nueva  
armonía\*/ $i = i + 1$ **end****end**Actualizar Memoria Armónica ( $HM, X'_p$ )**end****2.3. Configuración de la simulación**

La FBG uniforme fue modelada según el método de la matriz T y asumiendo que está construida sobre una SMF-28 con índices del perfil de refracción del núcleo  $n_{co} = 1.4494$ , con un recubrimiento  $n_{cl} = 0.7 \mu m$ , el índice de refracción efectivo  $n_{eff} = 1.4477$ , la variación del índice de modulación  $\delta n_{eff} = 1.1 \times 10^{-3}$ , una longitud  $L = 0.20 \times 10^{-2} m$ , y una constante fotoelástica de  $Pe = 0.10$  para la distribución de una fuerza no lineal a lo largo de la FBG.

Para obtener esta fuerza no lineal desconocida, se tomo como referencia el espectro  $E_{ref} = f(n_{co}, n_{cl}, n_{eff}, L)$  de una fuerza no lineal conocida  $F = az^2$ , siendo  $z$  la coordenada longitudinal de la FBG, se partió de una función cuyo variable  $a$  fue optimizándose mediante el HSA, usando el error de aproximación (Aproximation Error, AP) entre el valor  $a_{ref}$  y el valor  $a_{sim}$  como función de costo como se

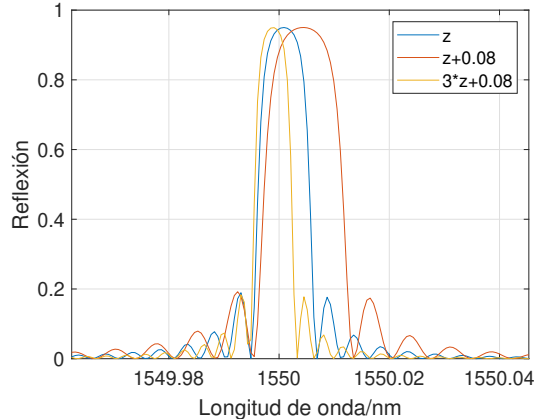
observa en la ecuación 9.

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

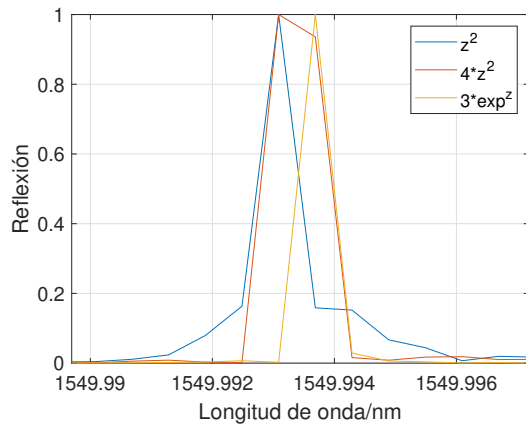
En el HSA los valores del HSM, HMCR, PAR y BW fueron 10, 0.95, 0.02 y 2.5 respectivamente. Se usaron como límite inferior de la variable  $a_{min} = 0$  y el superior de  $a_{max} = 10$ , tomado como referencia que  $a_{ref} = 4$ , realizando 100 iteraciones del algoritmo, implementado en Matlab R2020b.

**3. Resultados y análisis**

Para evaluar el comportamiento lineal y no lineal de la fuerza aplicada a la FBG, se generaron tres distribuciones de fuerza lineales y no lineales. En la Fig. 2 en (a) se observa un cambio en la longitud de onda central del espectro, cuando la distribución de fuerza es lineal, pero esta no cambia la forma del espectro. Al contrario en (b), la distribución de fuerza no lineal, mantiene el desplazamiento de la longitud de onda y adicionalmente cambia la forma del espectro, esto se debe al cambio del periodo no uniforme de la FBG.



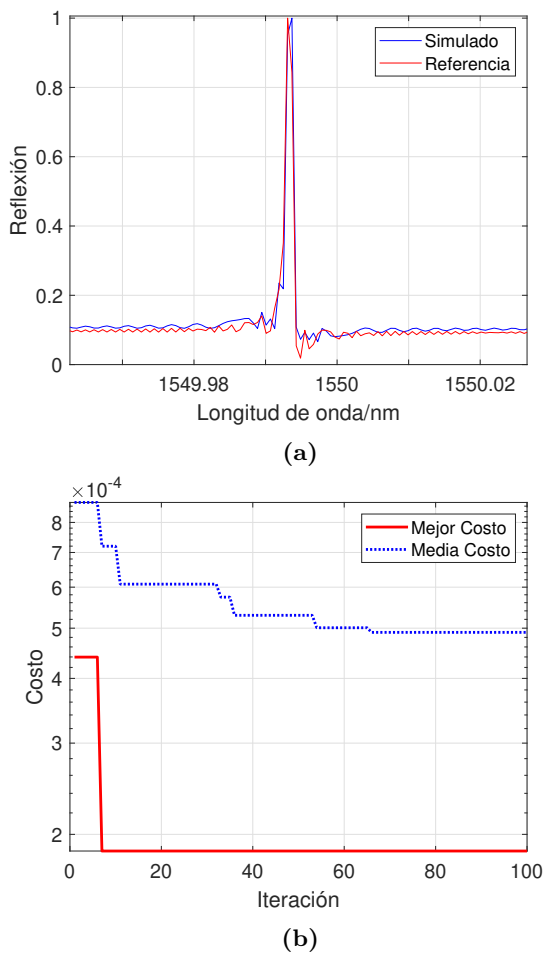
(a)



(b)

**Figura 2.** Espectro FBG con cambios sometida a diferentes fuerzas (a) Lineales, (b) No Lineales

Luego de la evaluación, se toma como ejemplo la función no lineal  $4z^2$ , de manera generalizada  $az^2$ , donde  $a$  es la variable a optimizar usando el algoritmo HSA, el cual tomará el espectro de referencia dada por la ecuación no lineal conocida y ajustará la variable hasta que la función de costo que es error cuadrático medio (Media Square Error, MSE) se el mínimo. Lo anterior permitirá la reconstrucción de la fuerza no lineal aplicada a la FBG [15] [5]. En la Fig. 2 en la parte (a) se observa que el espectro óptimo (simulado), el cual no se ajusta adecuadamente al de referencia luego de NI=100 iteraciones, lográndose un costo mínimo de  $1.8748 \times 10^{-4}$ , como se observa en (b)



**Figura 3.** (a) Espectro resultante del algoritmo de HS, HMS=10, HMCR=0.95, PAR=2.5, (b) Resultado del costo sin caracterización de HSA.

Con el fin de mejorar la estimación de la fuerza no lineal, se caracterizaron los valores de HMS, HMCR y PAR como en [12], para lo cual se realizaron 10 simulaciones con 10 valores diferentes con 100 iteraciones para cada parámetro y se evaluó el promedio, desviación estandar y la varianza del costo de la función objetivo [12]- [15].

### 3.1. Caracterización de HMS, HMCR y PAR en la optimización

En primer lugar, se varió el tamaño de la búsqueda de la armonía HMS, manteniendo fijos los parámetros HMCR=0.95 y el PAR=0.25. En Tabla 1 se observa que el valor HMS con menor costo se da para el valor HMS=8.

**Tabla 1.** Efecto del HMS en algoritmo HS

EL EFECTO DEL HMS EN EL ALGORITMO HS			
HMS	Promedio	Desviación Estándar	Varianza
8	0.000151154	4.3499x10-05	1.89216x10-09
9	0.000241703	6.99909x10-05	4.89873x10-09
10	0.000208626	8.60855x10-05	7.41072x10-09
11	0.000217788	7.74985x10-05	6.00602x10-09
12	0.000189786	7.32193x10-05	5.36107x10-09
13	0.000150703	5.50904x10-05	3.03495x10-09
14	0.000179278	6.18008x10-05	3.81934x10-09
15	0.000172935	5.69872x10-05	3.24754x10-09
16	0.000189677	5.69872x10-05	3.24754x10-09
17	0.000175304	7.56681x10-05	5.72566x10-09

Luego, el HMCR es variado entre 0.9 a 1, mateiando el valor encontrado anteriormente de HMS=8 y un PAR=0.25, obteniendo como resultado un HMCR=0.91 siendo éste el mejor costo, como se observa en la Tabla 2 .

**Tabla 2.** El efecto del HMCR en el algoritmo HS

EL EFECTO DEL HMCR EN EL ALGORITMO HS			
HMCR	Promedio	Desviación Estándar	Varianza
0.90	0.000230969	9.21015x10-05	8.48268x10-09
0.91	0.000170971	4.53902x10-05	2.06027x10-09
0.92	0.000218628	5.72619x10-05	3.27892x10-09
0.93	0.000283151	7.83239x10-05	6.13464x10-09
0.94	0.00022334	0.000109311	1.19488x10-08
0.95	0.000240665	0.000148426	2.20304x10-08
0.96	0.000236503	6.22062x10-05	3.86961x10-09
0.97	0.000285084	0.000123253	1.51913x10-08
0.98	0.000331358	0.000192839	3.71867x10-08
0.99	0.000228232	0.000107656	1.15898x10-08

### 3.2. Efecto del PAR en el algoritmo HS

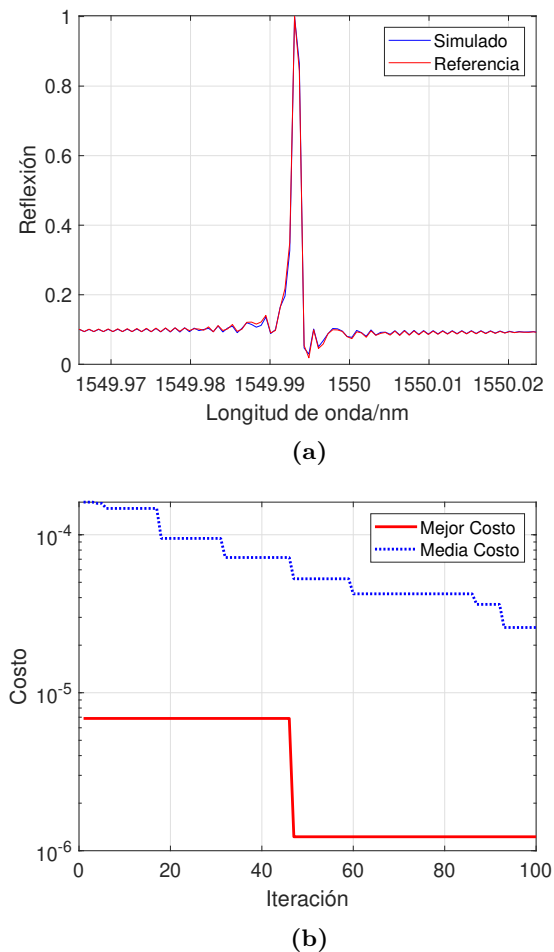
Finalmente, el PAR es variado entre 0.1 a 0.5, manteniendo los valores encontrados de HMS=8 y HMCR=0.91, entonces, el valor con menor costo de PAR es 0.15, como se muestra en Tabla 3

**Tabla 3.** El efecto del PAR en el algoritmo HS

EL EFECTO DEL PAR EN EL ALGORITMO HS			
PAR	Promedio	Desviación Estándar	Varianza
0.15	0.000197689	6.58462x10-05	4.33573x10-09
0.25	0.00025769	7.93554x10-05	6.29727x10-09
0.35	0.000264641	9.96599x10-05	9.9321x10-09
0.45	0.000202184	8.77764x10-05	7.7047x10-09
0.55	0.000227251	0.000109712	1.20368x10-08

Luego de caracterizar los parámetros del HSA, se realizó nuevamente la búsqueda de la función no lineal

inicial  $4z^2$ , logrando una mejora significativa en la optimización reduciendo la función de costo a  $1.5832 \times 10^{-6}$  para 100 iteraciones. El efecto del ajuste del espectro y la función de costo se observa en la Fig. 4(a) y Fig. 4(b) respectivamente.



**Figura 4.** (a) Espectro resultante del algoritmo de HS ya calibrado, HMS=8, HMCR=0.91, PAR=0.15, (b) Resultado del costo ya caracterizado HSA.

## 4. Conclusiones

El uso de la metaheurística del algoritmo de búsqueda armónica fue utilizado para encontrar una fuerza no lineal aplicada a un sensor FBG uniforme, los parámetros HSM, HMCR y PAR fueron caracterizados para mejorar la optimización en esta aplicación, encontrándose los valores de 8, 0.91 y 0.15 respectivamente. Una mejora de 150 veces aproximadamente fue conseguida, lo que valida el uso de este algoritmo en el diseño inverso de dispositivos fotónicos, incluso donde existan distribuciones de fuerza no lineales afectándoles. El uso de este algoritmo en FBG no uniformes podría dar una mejor comprensión en el diseño de dispositivos más complejos.

## Referencias

- [1] Alustiza, D. H., Mineo, M., Aredes, D. E., & Russo, N. A. (2019). Fabricación local de sensores de fibra óptica aplicables al sensado 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] 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.
- [4] Divya shree, M., Sangeetha, A., & Krishnan, P. (2020). Analysis and optimization of uniform FBG structure for sensing and communication applications. *Photonic Network Communications*, 39(3), 223–231.
- [5] Bai, Y., Zeng, J., Huang, J., Cheng, Z., Zhao, Q., & Liang, D. (2021). Non-uniform strain field reconstruction of FBG using an adaptive Nelder–Mead algorithm. *Optics Communications*, 484, 126689.
- [6] Bhatia, N., Rustagi, K. C., & John, J. (2014). Single LP 0, n mode excitation in multimode fibers. *Optics express*, 22(14), 16847–16862.
- [7] Zhang, W., Zhang, M., Lan, Y., Zhao, Y., & Dai, W. (2020a). Detection of crack locations in aluminum alloy structures using FBG sensors. *Sensors (Switzerland)*, 20(2).
- [8] Xian, L. (2014). Study of a linearly chirped fiber Bragg grating and its applications to the measurements of temperature and strain.
- [9] Peters, K., Pattis, P., Botsis, J., & Giaccari, P. (2000). Experimental verification of response of embedded optical fiber Bragg grating sensors in non-homogeneous strain fields. *Optics and Lasers in Engineering*, 33(2), 107–119.
- [10] 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.
- [11] Erdogan, T. (1997). Fiber grating spectra. *Journal of Lightwave Technology*, 15(8), 1277–1294.
- [12] ASSAD, A. (2019). Recent Advances in Harmony Search Algorithm. *International Journal of Computer Engineering & Technology*, 10(1), 157–165.
- [13] Molina García, J. A. (2019). Algoritmo de Búsqueda Armónica: Fundamentos y resolución de problemas de optimización con restricciones.

- [14] Cobos, C., Pérez, J., & Estupiñan, D. (2011). Una revisión de la búsqueda armónica. *Revista Avances en sistemas e Informática*, 8(2), 67-80.
- [15] 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.