

## OTIMIZAÇÃO DE REDES DE BRAGG EM FIBRA USANDO ALGORITMOS GENÉTICOS

J. C. C. Carvalho, J. C. W. A. Costa, M. J. Sousa, C. S. Sales. Junior e C. R. L. Francês

*UFPA-Universidade Federal do Pará- Departamento de Engenharia Elétrica e de Computação – DEEC, Laboratório de Eletromagnetismo Aplicado.*

*Av. Augusto Correa N<sup>o</sup> 01 – CP: 66075-900 Belém/PA, Brasil; e-mail: jweyl@ufpa.br*

### Abstract

This work uses a genetic algorithm in order to optimize the physical parameters of the fiber Bragg gratings to design optical filters. Making use of the characteristics and properties of the Bragg gratings, which present flexibility for achieving desired spectral characteristics, it is possible to design optical filters with low levels of side lobes, which can be used in telecommunications and optical sensors.

Since a nonuniform apodized grating can be formed by concatenating a set of uniform subgratings with different lengths and modulation intensities of the effective index, a genetic algorithm is used to find the best combination of such parameters, modifying them in order to achieve the reflectivity or transmissivity as close as possible the target.

The results show this optimization method, with aid of some restrictions in the search space, finds spectral characteristics considered satisfactory.

**Key Words:** Fiber Bragg Grating, Genetic Algorithms, Optical Fiber Filters, Optimization, Optical Fiber Devices.

### I. INTRODUÇÃO

Em sistemas ópticos, uma grande parte dos dispositivos utilizados tem como base guias de ondas, com as mais diversas configurações. Nesses diversos dispositivos, dependendo das aplicações, os materiais constituintes dos guias podem ser complexos, do ponto de vista eletromagnético, podendo ser anisotrópicos, não-lineares, não homogêneos ou dispersivo.

Uma aplicação de grande interesse comercial é a utilização de guias de onda com grades dielétricas, conhecidos também como redes de Bragg; que para os propósitos deste trabalho, consiste, basicamente, de um guia de onda dielétrico, no qual é provocada uma variação periódica em seu índice de refração. Essa variação periódica faz com que os guias de onda, apresentem uma resposta seletiva em frequência. Isto possibilita que os mesmos sejam usados para selecionar os modos guiados ao longo da direção de periodicidade. Devido a essa característica, as redes de Bragg permitem a criação de inúmeros dispositivos ópticos de alto desempenho que são usados para uma variedade de aplicações relacionadas a sensores e sistemas de comunicações ópticas, servindo como componente auxiliar ou para executar funções críticas no sistema[1]-[11].

A otimização aplicada às redes de Bragg consiste em encontrar os valores dos parâmetros relevantes (geralmente o conjunto de parâmetros relacionados com a geometria e com o índice efetivo do guia de onda dielétrico), que garantam o desempenho do dispositivo, de acordo com os critérios de projeto; tais critérios envolvem os valores de refletividade, transmissividade e atraso, ao longo de uma região espectral. Juntamente com esses critérios, é imposto um conjunto de restrições, que limitam os parâmetros físicos da rede a valores práticos, ou seja, dimensões possíveis de serem controladas, materiais disponíveis e variações nos índices de refração compatíveis com as tecnologias de fabricação existentes. Seja em guias de ondas planares ou em fibra óptica, o controle desses parâmetros é fundamental para a correta confecção dos dispositivos [2]-[3], [9]-[11].

Uma vez definidos esses critérios, a otimização é feita minimizando-se a diferença entre a resposta ideal e a resposta calculada. Porém as funções envolvidas nesses problemas são caracterizadas por serem não-lineares, descontínuas e multimodais, no qual não se tem informação à priori, da região da solução global. Tais características são desafiadoras para técnicas de otimização local, por dependerem de uma solução de qualidade, o que exige um bom conhecimento à priori do espaço de pesquisa, para que a solução inicial utilizada esteja próxima do ótimo global. Esse detalhe tem exigido em muitas aplicações, o uso de técnicas auxiliares com o objetivo de fornecer uma solução inicial para técnicas de otimização local [12]; entretanto, tem sido feito um esforço, na busca por técnicas de otimização que dispense o uso de técnicas auxiliares. Uma alternativa para solucionar esse inconveniente, é a utilização de um método de otimização capaz de pesquisar o espaço de soluções, de forma eficiente e independente de solução inicial. É exatamente nesse ponto que o Algoritmo Genético e suas variações tem sido considerada uma técnica promissora para essa questão[13]-[15]. Esse algoritmo tem demonstrado as suas versatilidades, principalmente na otimização de projetos de antenas e de alguns dispositivos ópticos [16]-[18].

Este trabalho tem como objetivo otimizar o perfil de apodização das redes de Bragg via algoritmo genético(AG), o qual é usado como uma ferramenta auxiliar para otimizar os parâmetros das redes, encontrando a combinação mais adequada de sub-redes que levam a um perfil de apodização otimizado. Partindo desse conhecimento é possível tirar vantagem dessa técnica, para projetar curvas de reflexão e transmissão com baixos níveis de lóbulos laterais. A otimização do perfil de apodização é executada formando-se uma rede não uniforme a partir da concatenação de subredes uniformes de menor tamanho, cada uma com um dado comprimento e um valor específico de amplitude de modulação do índice efetivo do núcleo da fibra óptica.

Embora métodos tradicionais, que fazem uso de gradientes, apresentem uma convergência mais rápida, os mesmos tendem a convergir para ótimos locais, que muitas vezes, são soluções que não atendem aos critérios de projeto. Contraoendo-se a essa questão, tal problema de otimização de redes de Bragg, exige técnicas robustas capazes de superar as adversidades do complexo espaço de pesquisa envolvido nesse tipo de problema. Algoritmos genéticos(AGs), por sua vez, exploram o espaço de soluções e tendem encontrar a região de solução global, além de permitir encontrar soluções que possibilitam projetar redes com valores dos parâmetros físicos ainda não usados na literatura. Algoritmos Genéticos têm se mostrado uma ferramenta extremamente versátil, mostrando-se promissora, na análise de problemas de otimização numérica, no estudo de problemas envolvendo redes de Bragg em fibra.

## II. TEORIA DAS REDES DE BRAGG EM FIBRA

Redes de Bragg em fibra consistem de uma modulação periódica no índice efetivo do núcleo de uma fibra mono modo. Uma das maneiras de se realizar essa modulação é expor a fibra a um padrão de variação espacial de intensidade de luz ultravioleta, formando a variação periódica do índice do núcleo da fibra, provocada pelo efeito da fotosensibilidade[1]. Na forma mais simples, a perturbação resultante no índice de refração efetivo no núcleo  $n_{eff}$  dos modos guiados de interesse é dada por:

$$\delta n_{eff}(z) = \bar{\delta n}_{eff}(z) \left[ 1 + v \cdot \cos\left(\frac{2\pi}{\Lambda} z + \varphi(z)\right) \right] \quad (1)$$

Sendo  $\bar{\delta n}_{eff}$  a variação dc do índice de refração com média em um período da rede,  $\varphi(z)$  é a fase da rede,  $\Lambda$  é o período da rede e  $v$  é a visibilidade de franja.

### 2.1 TEORIA DOS MODOS ACOPLADOS

A troca de energia, provocada pela perturbação no índice de refração efetivo do guia, entre os modos propagantes, pode ser descrita pela teoria dos modos acoplados. Essa ferramenta matemática tem sido usada com frequência, pois modela com precisão as propriedades ópticas das redes em questão, possibilitando informações quantitativas e qualitativas sobre a eficiência de difração e dependência espectral[1]. Esta técnica considera o guia de onda como fracamente guiante, no qual a diferença entre o índice de refração do núcleo e da casca é considerada muito pequena. Isto faz com que os modos propagantes sejam considerados modos ideais, cujas componentes transversais pode ser expressas pela superposição de modos ideais. Então em um guia de onda, cujo eixo é representado pela coordenada  $z$ , a componente transversal para o campo elétrico( na ausência de perturbação da rede) pode ser expressa como:

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

$A_j(z)$  e  $B_j(z)$  são as amplitudes (com variações suaves) do  $j$ -ésimo modo propagando-se no sentido  $+z$  e  $-z$  respectivamente. Os campos transversais  $\vec{e}_{jt}(x, y)$  são campos nos modos LP ou podem ser considerados como modos propagando-se na casca. Em uma situação normal em um guia de onda ideal, os modos ortogonais não trocam energia. A presença de uma perturbação dielétrica faz com que as amplitudes  $A_j(z)$  e  $B_j(z)$  do  $j$ -ésimo modo, passem a trocar energia de forma gradual ao longo da fibra de acordo com as seguintes equações:

$$\frac{dA_j}{dz} = i \sum_k A_k (k_{kj}^t + K_{kj}^z) \exp[i(\beta_k - \beta_j)z] + i \sum_k B_k (K_{kj}^t - K_{kj}^z) \exp[-i(\beta_k + \beta_j)z] \quad (3)$$

$$\frac{dB_j}{dz} = -i \sum_k A_k (k_{kj}^t - K_{kj}^z) \exp[i(\beta_k + \beta_j)z] - i \sum_k B_k (K_{kj}^t + K_{kj}^z) \exp[-i(\beta_k - \beta_j)z] \quad (4)$$

Considerando-se os modos ortogonais na fibra, o coeficiente de acoplamento geral  $K_{kj}^t(z)$ , entre os modos  $j$  e  $k$  é dado por:

$$K_{kj}^t(z) = \sigma_{kj}(z) + 2k_{kj}(z) \cos\left[\frac{2\pi}{\Lambda}z + \phi(z)\right] \quad (5)$$

$\sigma_{kj}(z)$  e  $k_{kj}$  são os coeficientes de acoplamento dc em um período da rede e coeficiente de acoplamento AC dados por:

$$\sigma_{kj}(z) = \frac{\omega \cdot n_{co}}{2} \overline{\delta n_{co}}(z) \iint_{\text{núcleo}} dx dy \vec{e}_{kt}(x, y) \cdot \vec{e}_{jt}(x, y) \quad (6)$$

e

$$\kappa_{kj}(z) = \frac{\nu}{2} \sigma_{kj}(z) \quad (7)$$

Como os modos são considerados transversais,  $K_{kj}^z(z) \ll K_{kj}^t(z)$ , então  $K_{kj}^z(z)$  pode ser desprezado. As equações (6) - (7) são as equações usadas para descrever o espectro das redes de Bragg.

## 2.2 EQUAÇÕES DE MODOS ACOPLADOS PARA UMA REDE DE BRAGG

Nas proximidades do comprimento de onda, no qual a interação dominante é o acoplamento de um modo com amplitude  $A(z)$  em um modo idêntico propagando-se no sentido contrário com amplitude  $B(z)$ , as equações (3) e (4) podem ser simplificadas, considerando-se apenas as amplitudes de um modo particular e usando a aproximação síncrona. Nesta aproximação são desprezados os termos que contêm oscilações rápidas com dependência em  $z$ , pois contribuem pouco para as variações de amplitudes[1]. Sendo assim, as equações (3) e (4) assumem a forma:

$$\frac{dR}{dz} = i\hat{\sigma}R(z) + ikS(z) \quad (8)$$

$$\frac{dS}{dz} = -i\hat{\sigma}S(z) - ik^*R(z) \quad (9)$$

com  $R(z) \equiv A(z) \exp\left(i\delta z - \frac{\phi}{2}\right)$  e  $S(z) \equiv B(z) \exp\left(-i\delta z + \frac{\phi}{2}\right)$ . Onde  $R(z)$  e  $S(z)$  são as componentes transversais do campo elétrico propagando no sentido  $-z$  e  $+z$  respectivamente. Os termos  $k$ ,  $\hat{\sigma}$  e  $\delta$  representam o coeficiente de acoplamento AC, coeficiente de acoplamento geral dc e o desvio, respectivamente dados por:

$$k = k^* = \frac{\pi}{\lambda} \nu \overline{\delta n_{eff}}, \quad \hat{\sigma} = \delta + \sigma - \frac{1}{2} \frac{d\phi}{dz} \quad \text{e} \quad \delta = 2\pi n_{eff} \left( \frac{1}{\lambda} - \frac{1}{\lambda_B} \right) \quad (10)$$

sendo  $\lambda_B = 2n_{eff} \Lambda$ ,  $n_{eff}$  é o índice efetivo do núcleo do guia,  $\sigma = \frac{2\pi}{\lambda} \overline{\delta n_{eff}}$  é o coeficiente de acoplamento dc (média no período), e  $\nu$  a visibilidade de franja da variação do índice de refração.

Para uma rede de Bragg uniforme ao longo de  $z$ , na qual não há variação das suas propriedades ópticas,  $\bar{\delta}_{neff}$  é constante e  $\frac{d\phi}{dz} = 0$ , conseqüentemente  $k, \delta$  and  $\hat{\sigma}$  são constantes também.

A refletividade de uma rede de Bragg de comprimento  $L$  pode ser encontrada, considerando-se uma onda incidente propagando-se de  $z = -\infty$ ; neste caso  $R(-L/2) = 1$  e considerando que não existe onda refletida em  $z \geq L/2$ , neste caso  $S(L/2) = 0$ . Os coeficientes de reflexão de amplitude ( $\rho$ ) e de potência ( $r$ ) são dados por:

$$\rho = \frac{S(-L/2)}{R(-L/2)} \text{ e } r = |\rho|^2 \quad (11)$$

O atraso de grupo e a dispersão de uma luz refletida em uma rede de Bragg são dados por[1]:

$$\tau_\rho = -\frac{\lambda^2}{2\pi c} \frac{d\theta_\rho}{d\lambda} \text{ e } d_\rho = -\frac{2\pi c}{\lambda^2} \frac{d^2\theta_\rho}{d\omega^2} \quad (12)$$

na qual  $\theta_\rho$  é a fase de  $\rho$ ,  $c$  é a velocidade da luz nos espaço livre e  $\omega$  é a frequência de operação.

## REDES APODIZADAS

Até o momento, as redes de Bragg citadas são do tipo uniforme, ou seja, os seus parâmetros físicos tais como, período, fase, constante de acoplamento e a amplitude de modulação do índice de efetivo, permanecem constantes. Porém, o interesse nas redes de Bragg para aplicações práticas, consiste nas redes não-uniformes, nas quais os parâmetros físicos da rede variam ao longo do comprimento da mesma. Dependendo do parâmetro que se deseja variar, tem-se redes do tipo: gorjeio, na qual ocorre a variação do período, com fase deslocada, redes com superestrutura, na qual a intensidade de acoplamento varia periodicamente com um período muito maior que o período nominal da rede e redes apodizadas, na qual a amplitude de modulação do índice efetivo varia ao longo da fibra. Cada uma dessas variações tem sido objeto de estudos e investigação, motivada pela possibilidade explorar as suas propriedades ópticas, o que tem resultado em uma vasta quantidade de aplicações [1], [9]-[11].

Redes de Bragg do tipo uniforme começam e terminam abruptamente, sendo essa característica, a principal responsável pelos elevados e indesejáveis níveis de lóbulos laterais no espectro de reflexão e/ou transmissão [9], [11]. Para superar esse inconveniente, usa-se o recurso da apodização que permite reduzir tais lóbulos laterais. Existem muitas técnicas, assim como funções com perfis de apodização adequados para modular a amplitude de modulação do índice de refração efetivo e alcançar alguns resultados desejados, as principais funções de apodização usadas tem sido a função gaussiana e co-seno levantado. A Figura 1 mostra a variação de  $\delta_{neff}$  e  $\bar{\delta}_{neff}$  para uma rede uniforme e a curva de refletividade típica para este tipo de variação do índice efetivo. De forma semelhante, na Figura 2 é mostrada a variação de  $\delta_{neff}$  e  $\bar{\delta}_{neff}$  para uma rede apodizada e a curva de refletividade para uma rede com este tipo de variação no índice efetivo.

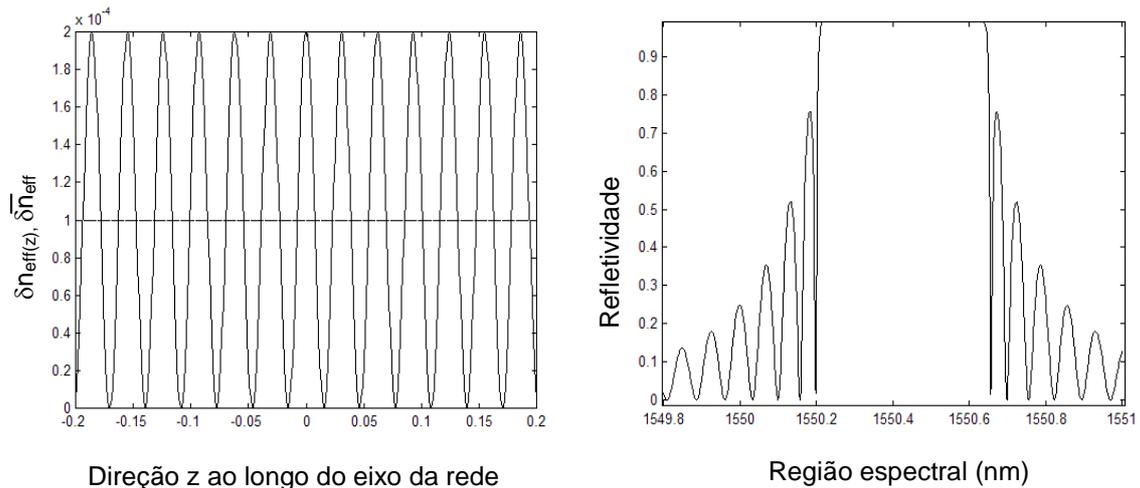


Figura 1 - Exemplo da variação de  $\delta n_{eff}(z)$ (modulação) e  $\bar{\delta n}_{eff}$  (constante) em uma rede uniforme(o período da rede tem sido exagerado para propósito ilustrativo). Ao lado tem-se o espectro de reflexão de uma rede uniforme com comprimento  $L=1$  cm,  $n_{eff}=1.45$ ,  $\lambda_B=1550.5$ nm e  $\bar{\delta n}_{eff}=4 \times 10^{-4}$ .

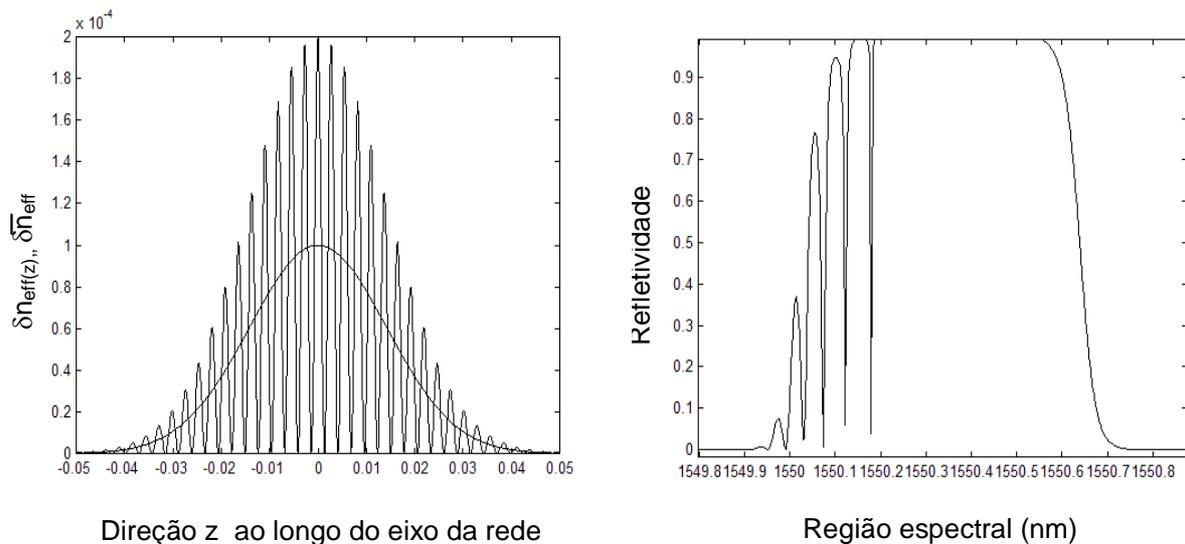


Figura 2 - Exemplo a esquerda da variação de  $\delta n_{eff}(z)$ (modulação) e  $\bar{\delta n}_{eff}$  (variação gaussiana) em uma rede com apodização gaussiana(o período da rede foi exagerado para propósito ilustrativo). Ao lado tem-se o espectro de reflexão de uma rede com apodização gaussiana com comprimento  $L=1$  cm,  $n_{eff}=1.45$ ,  $\lambda_B=1550.5$ nm e  $\bar{\delta n}_{eff}=4 \times 10^{-4}$ .

### III. MÉTODO DA MATRIZ DE TRANSFERÊNCIA

Existem diversas técnicas para simular redes de Bragg e com diferentes níveis de complexidade [1], [9], [19]. Para o caso das redes a serem utilizadas nesse trabalho, o método usado é o da matriz de transferência, o qual modela precisamente os tipos de redes em questão[1]. Este método consiste em dividir a rede em M seções, na qual cada seção da grade

pode ser representada por uma matriz 2x2 e em seguida multiplicando-se todas essas matrizes obtendo-se uma única matriz que descreve a rede como um todo. A Figura 3 ilustra o modelo de simulação de uma rede com M seções onde para a aplicação o método da matriz de transferência. Como pode ser visto na Figura 3,  $R_i$  and  $S_i$  representam as amplitudes da componente transversal de campo ao atravessar uma seção i.

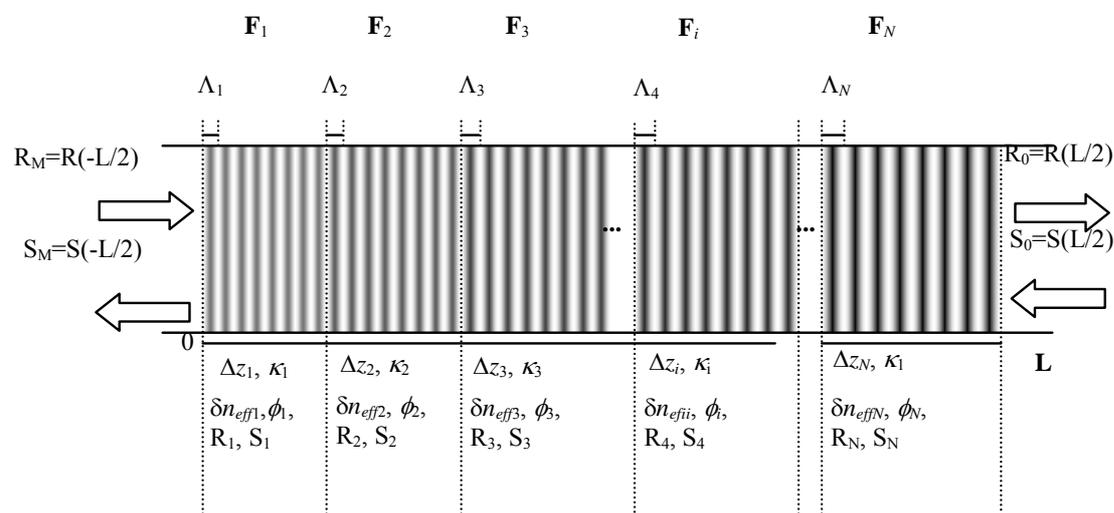


Figura 3 – Modelo de simulação para uma rede dividida em várias seções e os seus parâmetros mais importantes.

Então, para uma grade de reflexão com comprimento L como ilustrado na Figura 3, as condições iniciais para a equação de modos acoplados são dadas por  $R_0 = R(L/2) = 1$  e  $S_0 = S(L/2) = 0$  e o objetivo é encontrar  $R = R(-L/2) = R_M$  and  $S_0 = S(L/2) = S_M$  usando-se a relação matricial:

$$\begin{bmatrix} R_i \\ S_i \end{bmatrix} = \mathbf{F} \begin{bmatrix} R_{i-1} \\ S_{i-1} \end{bmatrix} \tag{20}$$

na qual a matriz  $\mathbf{F}$  para uma seção i é dada por

$$\mathbf{F}_i = \begin{bmatrix} \cosh(\gamma_{B_i} \Delta z_i) - i \frac{\hat{\sigma}_i}{\gamma_{B_i}} \sinh(\gamma_{B_i} \Delta z_i) & -i \frac{k_i}{\gamma_{B_i}} \sinh(\gamma_{B_i} \Delta z_i) \\ i \frac{k_i}{\gamma_{B_i}} \sinh(\gamma_{B_i} \Delta z_i) & \cosh(\gamma_{B_i} \Delta z_i) + i \frac{\hat{\sigma}_i}{\gamma_{B_i}} \sinh(\gamma_{B_i} \Delta z_i) \end{bmatrix} \tag{21}$$

$\Delta z_i$  o comprimento da i-ésima seção uniforme, os coeficientes de acoplamento  $\hat{\sigma}_i$  and  $k_i$  são valores locais na i-ésima seção e  $\gamma_{B_i} \equiv \sqrt{k_i^2 - \hat{\sigma}_i^2}$ .

As amplitudes no extremo da rede de Bragg podem ser encontradas multiplicando-se as matrizes dessas seções

$$\begin{bmatrix} R_M \\ S_M \end{bmatrix} = \mathbf{F} \begin{bmatrix} R_0 \\ S_0 \end{bmatrix}; \quad \mathbf{F} = \mathbf{F}_M \cdot \mathbf{F}_{M-1} \cdot \dots \cdot \mathbf{F}_i \cdot \dots \cdot \mathbf{F}_1 \quad (22)$$

O número de seções para esse método depende da precisão exigida, mas  $M \approx 100$  geralmente é suficiente para a maioria dos casos.

Para usar esse método em redes do tipo gorjeio e apodizadas, consideram-se os valores de  $\sigma$ ,  $k$  e  $(1/2)d\phi/dz$  constantes para cada seção uniforme. Para redes com deslocamento de fase e redes amostradas, pode-se inserir a matriz de deslocamento de fase  $\mathbf{F}_{pi}$  entre os fatores  $\mathbf{F}_i$  e  $\mathbf{F}_{i+1}$  no produtório da equação (22) para um deslocamento de fase após a  $i$ -ésima seção. Para uma rede de Bragg, a matriz de deslocamento de fase é dada por:

$$\mathbf{F}_{pi}^B = \begin{bmatrix} \exp\left(\frac{-i\phi_i}{2}\right) & 0 \\ 0 & \exp\left(\frac{i\phi_i}{2}\right) \end{bmatrix} \quad (23)$$

Para o caso das redes de transmissão  $\mathbf{F}_{pi}^c = (\mathbf{F}_{pi}^B)^*$ .

#### IV. ALGORITMOS GENÉTICOS

O princípio básico do algoritmo genético é fazer evoluir um conjunto de soluções iniciais, para uma solução ótima. A estrutura básica contendo uma solução para o problema, é denominada de cromossomo, a estrutura contendo um cromossomo e demais informações sobre o problema é denominada de indivíduo e o conjunto de indivíduos é denominado de população. O algoritmo opera diretamente nos cromossomos e ao final do processo, é extraído o indivíduo mais saudável, ou seja, a solução ótima. Nesse algoritmo a função que avalia a qualidade de uma solução é denominada de função *saúde*.

AGs apresentam ainda algumas características, especiais e atraentes, que os tornam diferentes dos métodos tradicionais de otimização. Tais características são[15]:

**AGs, na forma tradicional, não trabalham diretamente com os parâmetros de uma função e sim com o código desses parâmetros.**

**Esse tipo de algoritmo não realiza sua pesquisa a partir de um único ponto (como fazem os métodos tradicionais) e sim a partir de um conjunto de pontos.**

**AGs não usam derivadas.**

**Algoritmos genéticos utilizam regras de transição probabilísticas e não regras determinísticas.**

Por apresentar essas características, esse tipo de algoritmo tem se tornado um método de otimização com grande potencial para resolver problemas onde métodos tradicionais costumam não possuir bom desempenho. Situações como essas, ocorrem quando a função a ser otimizada, apresenta multiextremos e/ou descontinuidades. Quando a função apresenta multiextremos, o risco de convergir prematuramente para um ótimo local é maior. Porém, AGs trabalham a partir de um conjunto de pontos, processados em paralelo, o que permite que se

escape desses ótimos locais. As discontinuidades são superadas pelo GA por usarem operações estocásticas.

Embora apresentem vantagens evidentes, a aplicação dos Algoritmos Genéticos em problemas de eletromagnetismo ainda tem muito para se explorar, uma vez que o campo de problemas eletromagnéticos é pródigo em soluções complexas, que demandam um alto grau de otimização [16]-[17].

De maneira geral um problema de otimização pode ser descrito da seguinte forma:

$$\text{otimizar } f(\vec{x}) = f(x_1, \dots, x_n) \quad (24)$$

Sujeita às seguintes restrições:

$$g_i(\vec{x}) \leq 0 (i = 1, \dots, q) \quad \text{e} \quad h_j(\vec{x}) = 0 (j = q + 1, \dots, m) \quad (25)$$

$q$  e  $m$  formam o total de restrições para  $g$  e  $h$ . O domínio de cada variável é dado por:

$$l_i \leq x_i \leq u_i \quad \text{onde } 1 \leq i \leq n$$

Para tal problema de otimização, pode-se considerar o algoritmo genético baseado numa representação de ponto flutuante (número real), no qual o cromossomo  $\vec{x}$  de um indivíduo na população tem sua representação simbólica na forma vetorial como:

$$\vec{x} = \langle x_1, \dots, x_n \rangle$$

No processo de otimização usando-se Algoritmos Genéticos, existem alguns operadores que fazem com que a função *saúde* evolua para melhores valores. Por trás desses operadores, encontra-se a capacidade dos AGs em trabalhar com funções multimodais e não diferenciáveis, onde todo o processamento é realizado sobre os códigos dos parâmetros do problema. Esses operadores básicos são conhecidos como *seleção*, *cruzamento* e *mutação*. A utilização dos AGs permite que se configure o sistema de otimização, com a finalidade de ajustar o algoritmo para obter o melhor desempenho [13]. Entre essas configurações estão incluídos: os tipos de operadores usados, tipo de codificação e decodificação usadas, detalhes da função *saúde*, o tamanho da população, probabilidade de cruzamento e probabilidade de mutação. Além dessas configurações, deve-se também estabelecer o número de *bits* (no caso de usar codificação binária) que cada parâmetro do problema deve possuir no cromossomo. Apesar disso, alguns autores utilizam a representação com número real para as variáveis do sistema, o que implica também na utilização de operadores diferentes daqueles utilizados na codificação binária. O processo de otimização genética, na sua forma básica, desempenha 6 etapas:

**Codificação dos parâmetros do problema como genes.**

**Criação de uma *string* de genes para formar um cromossomo**

**Geração de uma população de *strings***

**Cálculo dos valores de *saúde* para cada indivíduo na população**

**Inicialização do ciclo de reprodução através da seleção dos indivíduos de acordo com os seus valores de *saúde*.**

**Realização do cruzamento e a mutação, para formar os membros da próxima geração.**

Esses passos podem ser organizados em um diagrama de blocos, como mostra a Figura 4.



Figura 4 - Diagrama de blocos descrevendo o processo de otimização genética.

## V. OTIMIZAÇÃO DAS REDES DE BRAGG EM FIBRA USANDO O ALGORITMO GENÉTICO E RESULTADOS ALCANÇADOS

Esta sessão visa à abordagem do processo de otimização sobre as redes de Bragg, envolvendo discussões sobre os principais parâmetros a serem otimizados e considerações sobre as restrições envolvidas no problema em questão.

As funções de apodização existentes citadas anteriormente consistem em realizar uma distribuição do efeito de rede (intensidade de acoplamento) ao longo da região de perturbação. A otimização do perfil de apodização de uma rede não-uniforme pode ser feita a partir da concatenação de sub-redes uniformes, cada uma contendo um valor de comprimento  $\Delta z_i$  e um valor específico  $\bar{\delta n}_{eff}$ . Usando-se o método da matriz de transferência da sessão III, cada uma dessas subredes uniformes pode ser caracterizada por uma matriz 2x2 e a rede não-uniforme completa, passa a ser formada pela matriz resultante do produtório das matrizes das subredes. A Figura 5 ilustra a apodização de uma rede não-uniforme formada a partir de um conjunto de subredes uniformes. Obviamente que para se ter um perfil igual ao da Figura 2 um número maior de sub-redes faz-se necessário.

Como pode ser visto a seguir, a combinação dos parâmetros da rede em um problema de otimização, forma um complexo espaço de soluções, sobre o qual pouco se conhece. Isto torna inviável o uso de técnicas de otimização tradicionais baseadas em gradiente, as quais produzem resultados fortemente dependentes de uma solução inicial e do conhecimento do espaço de soluções. O algoritmo genético devido as suas características peculiares citadas anteriormente, é uma poderosa ferramenta e se encaixa perfeitamente para atacar esse tipo de problema, podendo ser usado com a finalidade de otimizar (através da exploração do espaço de pesquisa) os valores dos parâmetros da rede composta, ou seja, os valores de  $\bar{\delta n}_{eff}$  e  $\Delta z$  para cada subrede.

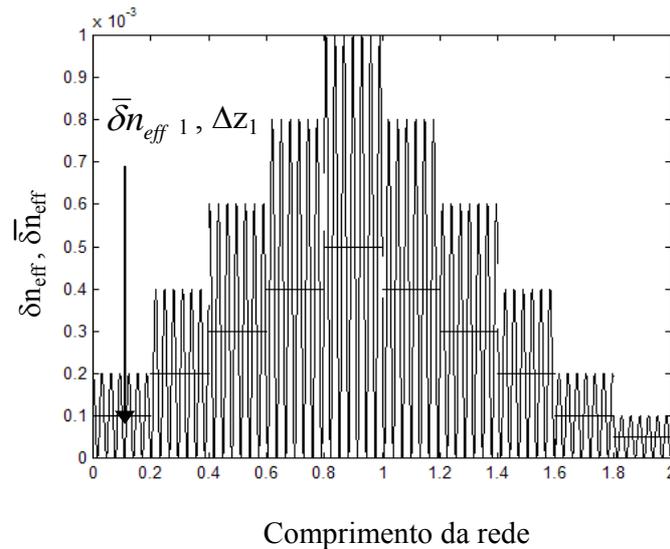


Figura 5 – Ilustração da apodização de uma rede não-uniforme, formada pela concatenação de subredes uniformes. A primeira sub-rede uniforme tem os parâmetros identificados na figura. De forma semelhante, as demais sub-redes possuem também os seus valores de  $\bar{\delta n}_{eff}$  e  $\Delta z$ .

Antes de se iniciar qualquer operação com o algoritmo genético, é necessário primeiro, definir o espaço de representação dos parâmetros das variáveis no qual o algoritmo irá atuar. Dependendo do tipo de representação o cromossomo pode ser composto por códigos que correspondem às variáveis do problema, ou pode ser representado diretamente pelas variáveis do problema. Algoritmos genéticos, na forma clássica usam codificação binária para representar o cromossomo (apesar de alguns projetistas não seguirem a rigor essa regra) [13], mas grande maioria de suas derivações usa cromossomos com codificação em número real, atuando diretamente nas variáveis do problema em questão. Para o caso das redes de Bragg, o cromossomo será representado pelas próprias variáveis do problema. A escolha para esse tipo de representação está fundamentada nos experimentos e recomendações de alguns especialistas, o que evita um maior processamento e aumento de complexidade no espaço de soluções do problema [13].

Uma vez definidos os parâmetros que se deseja otimizar ( $\bar{\delta n}_{eff}$  e  $\Delta z$ ) e com base na representação simbólica de  $\bar{x}$  citada anteriormente, o cromossomo de um indivíduo pode ser matematicamente representado da forma:

$$\mathbf{x} = \left\{ \left( \bar{\delta}_{neff1}, \Delta z_1 \right), \left( \bar{\delta}_{neff2}, \Delta z_2 \right), \dots, \left( \bar{\delta}_{neffn}, \Delta z_n \right) \right\},$$

Existem algumas funções usadas para otimizar esses dispositivo e a utilizada neste trabalho é dada por:

$$F(\mathbf{X}) = \left( \frac{1}{p} \sum_{j=1}^p \left\{ \left[ r(\lambda_j) - r_{opt}(\lambda_j) \right] / \delta r_j \right\}^2 \right)^{-1}, \quad (26)$$

Na qual  $r(\lambda_i)$  e  $r_{OPT}(\lambda_i)$  são as refletividades calculadas e desejadas respectivamente,  $\delta r_j$  é a tolerância no comprimento de onda  $\lambda_j$ . Ao final do processo de otimização, pode-se extrair o vetor  $\mathbf{X}_{opt}$ , que representa a melhor solução contendo os parâmetros do dispositivo, ou seja,  $\mathbf{x}_{opt} = \{(\bar{\delta}_{neff1}, \Delta z_1), (\bar{\delta}_{neff2}, \Delta z_2), \dots, (\bar{\delta}_{neffn}, \Delta z_n)\}$ . Deve-se notar que  $\bar{\delta}_{neff}$  e  $\Delta z$  devem ter os seus valores restritos à  $L_{min} \leq \Delta z \leq L_{max}$  e  $\bar{\delta}_{neff min} \leq \bar{\delta}_{neff} \leq \bar{\delta}_{neff max}$ , com os valores mínimo e máximo estabelecidos pelo projetista, de acordo com valores realizáveis na prática e critérios de projeto.

A Figura 6 mostra as associações entre os projetos de rede e seus parâmetros, com nomenclatura dos algoritmos genéticos. O fluxograma da Figura 4 opera com as estruturas da Figura 6.

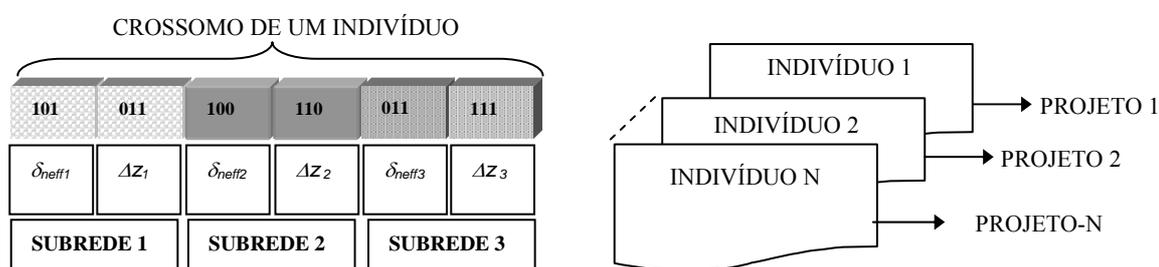


Figura 6 – Ilustração de um cromossomo (representação binária e com os próprios parâmetros do dispositivo), contendo informações sobre comprimentos de cada seção de rede e da mudança de índice induzido. A estrutura contendo o cromossomo e demais informações sobre o problema, caracteriza um indivíduo.

A seguir são apresentados resultados de otimização das redes de Bragg alcançados pelo algoritmo genético. Os resultados estão dispostos de forma a ilustrar a evolução obtida, juntamente com os comentários sobre as soluções adotadas para superar as adversidades do espaço de pesquisa.

O primeiro dispositivo a ser otimizado é uma rede de Bragg em fibra, cujo alvo é  $r=1$  na região espectral  $1,5502 \leq \lambda \leq 1,5506 \mu\text{m}$  e  $r=0,0$  fora desta região. A região espectral consiste de 1000 comprimentos de onda equidistantes usados na equação (26). O comprimento da rede é  $L=1$  cm, o índice efetivo é  $n_{eff} = 1,45$ , a visibilidade de franja  $v=1$  e o comprimento de onda de projeto é  $\lambda_D = 1,550 \mu\text{m}$ . As restrições impostas são  $10^{-5} \leq \Delta z_i \leq 10^{-3}$  m e  $0,0 \leq \bar{\delta}_{neff} \leq 4 \times 10^{-4}$  e  $\delta r=0,01$  para todos os comprimentos de onda. A refletividade, o perfil para  $\bar{\delta}_{neff}$  e o atraso, podem ser vistos nas Figuras 7, 8 e 9, respectivamente.

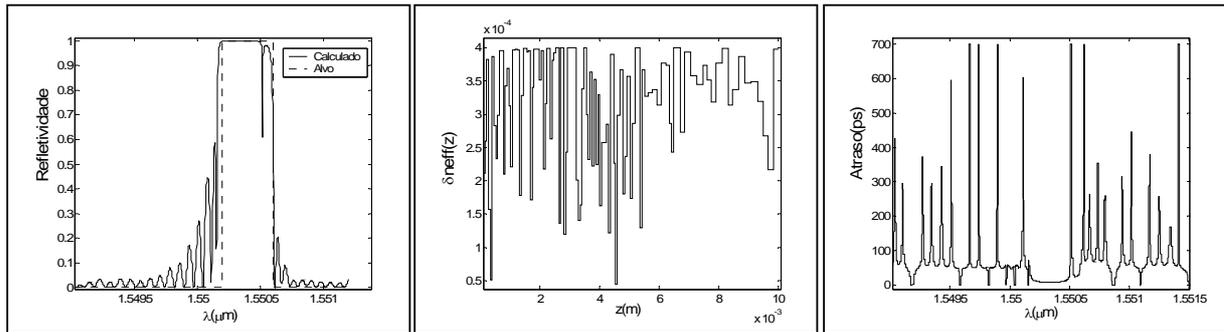


Figura 7 - Refletividade calculada para uma rede de Bragg em fibra com  $10^{-5} \leq \Delta z_i \leq 10^{-3}$  m e  $0,0 \leq \bar{\delta} n_{eff} \leq 4 \times 10^{-4}$  região espectral  $1,5502 \leq \lambda \leq 1,5506$   $\mu\text{m}$ .

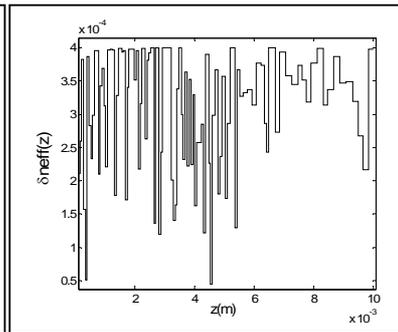


Figura 8 - Perfil de  $\bar{\delta} n_{eff}$  ao longo do comprimento da fibra encontrado pelo GA.

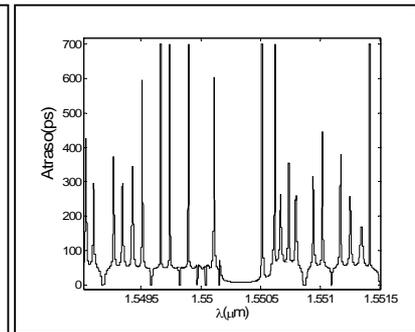


Figura 9 - Atraso de grupo na região espectral  $1,5502 \leq \lambda \leq 1,5506$   $\mu\text{m}$ .

A refletividade exibida na Figura 7 apresenta resposta que ainda não é satisfatória no que se refere a um projeto definitivo, pois na banda de rejeição há uma depressão indesejável, ocasionada provavelmente pelas variações abruptas do perfil  $\bar{\delta} n_{eff}$ ; mas ainda assim pode ser útil para um projeto inicial, a ser otimizado por qualquer outro método tradicional. Para aumentar a eficiência do algoritmo na exploração do espaço de pesquisa, aplicou-se uma restrição adicional ao sistema. Esta restrição evita que o algoritmo passe muito tempo explorando regiões do espaço de pesquisa onde se encontram soluções de baixa qualidade e dedique-se mais em regiões nas quais existe um maior potencial de soluções promissoras. Isso pode ser feito com base em um pouco de conhecimento sobre o espaço de pesquisa, uma vez que se sabe que o perfil para  $\bar{\delta} n_{eff}$  deve ter variações suaves ao longo da rede, semelhante ao que ocorre com a função de apodização gaussiana, mostrada na Figura 2. A restrição adicional que será imposta consiste em limitar a diferença entre os valores de  $\bar{\delta} n_{eff}$  para secções sucessivas em até 5%. O teste foi realizado em um segundo dispositivo cujo alvo de refletividade é semelhante ao projeto anterior com  $r=1$  na região espectral  $1,5499 \leq \lambda \leq 1,5503$   $\mu\text{m}$  e  $r=0,0$  fora desta região. A região espectral consiste de 1000 comprimentos de onda equidistantes usados na equação (26). O comprimento da rede é  $L=1$  cm, o índice efetivo é  $n_{eff}=1,45$ , a visibilidade de franja  $v=1$  e  $\delta r=0,01$  para todos os comprimentos de onda. Neste dispositivo o comprimento de onda de projeto foi incluído como variável a ser otimizada no intervalo  $1,5501 \leq \lambda_D \leq 1,5504$   $\mu\text{m}$ . As demais restrições impostas para este projeto são  $7 \times 10^{-5} \leq \Delta z_i \leq 10^{-4}$  m e  $0,0 \leq \bar{\delta} n_{eff} \leq 4 \times 10^{-4}$ . As Figuras 10, 11 e 12 mostram os resultados encontrados pelo algoritmo genético para a refletividade, o perfil para  $\bar{\delta} n_{eff}$  e o atraso. Nota-se que a curva de refletividade mantém a planura na região de refletividade máxima e reduz drasticamente os lóbulos laterais; formando um filtro de qualidade superior ao anterior. além disso, o perfil para  $\bar{\delta} n_{eff}$  apresenta uma forma bem mais suave.

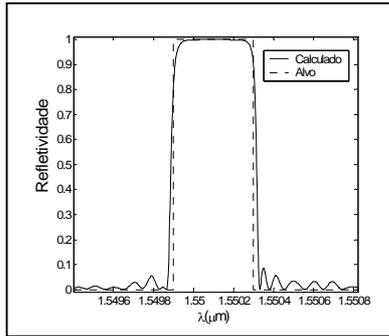


Figura 10 – Refletividade calculada de uma rede de Bragg em fibra com  $0 \leq \bar{\delta}n_{eff} \leq 4 \times 10^{-4}$   $1,5501 \leq \lambda_D \leq 1,5504 \mu m$  na região espectral  $1,5499 \leq \lambda \leq 1,5503 \mu m$  e com diferença máxima de 5% para  $\bar{\delta}n_{eff}$  entre as secções sucessivas.

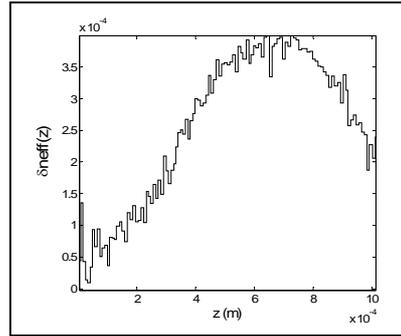


Figura 11 – Perfil de  $\bar{\delta}n_{eff}$  ao longo do comprimento da fibra encontrado pelo GA.

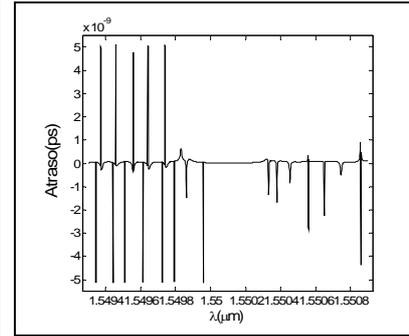


Figura 12 – Atraso de grupo na região espectral  $1,5499 \leq \lambda \leq 1,5503 \mu m$

Adotando-se a restrição adicional citada anteriormente, o terceiro dispositivo a ser otimizado é uma rede de Bragg em fibra, cujo alvo é  $r = 1,0$  em  $1,550 \leq \lambda \leq 1,5502 \mu m$  e  $r = 0,0$  fora desta região. O comprimento máximo da rede é  $L = 1$  cm, o índice efetivo  $n_{eff} = 1,45$ , a visibilidade de franja  $v = 1$  e o comprimento de onda de projeto é o mesmo do primeiro dispositivo. As restrições impostas são  $5,34 \times 10^{-5} \leq \Delta z_i \leq 10^{-3} m$  e  $0,0 \leq \bar{\delta}n_{eff} \leq 1,5 \cdot 10^{-4}$ . A refletividade, o perfil para  $\bar{\delta}n_{eff}$  e o atraso, são mostrados nas Figuras 13, 14 e 15. De forma semelhante ao segundo projeto, o algoritmo genético consegue encontrar resultados satisfatórios quando adotada a restrição adicional, indicando que a mesma é realmente importante para o bom desempenho da técnica.

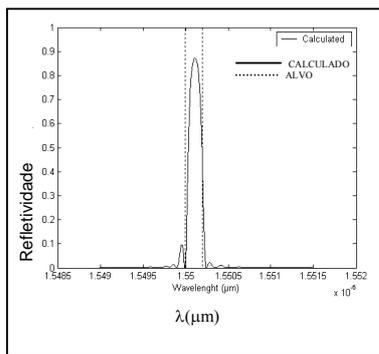


Figura 13 – Refletividade calculada para uma rede de Bragg em fibra com  $0,0 \leq \bar{\delta}n_{eff} \leq 1,5 \times 10^{-4}$  e  $5,34 \times 10^{-5} \leq \Delta z_i \leq 10^{-3}$  na região espectral  $1,550 \leq \lambda \leq 1,5502 \mu m$  e com diferença máxima de 5% para  $\bar{\delta}n_{eff}$  entre as secções sucessivas.

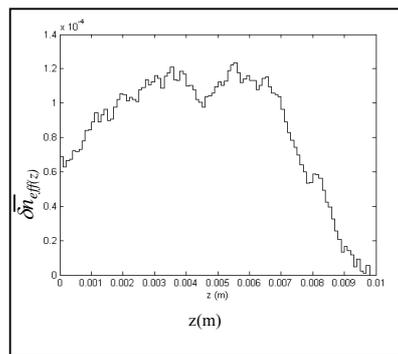


Figura 14 – Perfil de  $\bar{\delta}n_{eff}$  ao longo do comprimento da fibra encontrado pelo GA.

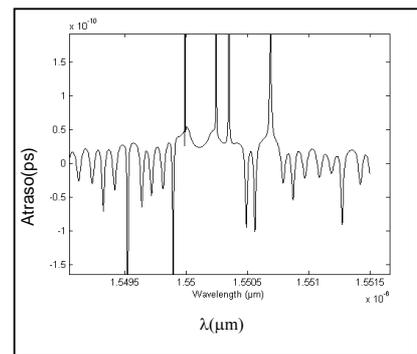


Figura 15 – Atraso de grupo na região espectral  $1,55 \leq \lambda \leq 1,5502 \mu m$ .

## CONCLUSÕES

Neste trabalho foi mostrado o uso de um algoritmo genético para otimizar o perfil de apodização de redes de Bragg em fibra. Três projetos de filtros ópticos foram usados como teste, nos quais o algoritmo foi usado para otimizar o conjunto de valores de  $\bar{\delta n}_{eff}$  e  $\Delta z$  de uma rede não-uniforme, associados a uma curva de refletividade o mais próximo possível da curva de refletividade ideal. Os resultados encontrados nos projetos foram satisfatórios, apresentando baixos níveis de lóbulos laterais conforme objetivo da otimização.

O Algoritmo genético mostrou que é uma poderosa ferramenta para pesquisar de forma eficiente (sem necessidade de solução inicial) o complexo espaço de soluções desse tipo de problema, o qual contém um grande número de variáveis e sobre o qual se tem pouco conhecimento à priori, o que inviabiliza iniciar o processo de otimização por métodos tradicionais que fazem uso de gradiente. Apesar de apresentar características especiais, o algoritmo necessitou de algumas restrições adicionais, sem as quais não encontraria soluções satisfatórias. É importante lembrar que toda essa eficiência do algoritmo genético na exploração do espaço de pesquisa exige um custo computacional, pois a técnica trabalha combinando várias soluções através de seus operadores específicos e para medir a qualidade das mesmas, precisa calcular a equação (26) várias vezes, aumentando significativamente o tempo de processamento. Os projetos foram executados durante 15000 gerações, sendo este o critério de parada adotado na técnica de otimização. Os resultados encontrados consumiram um tempo de processamento de aproximadamente 4hs utilizando a técnica de processamento paralelo[20]. A interface usada foi o MPI (Message Passing Interface), usando a versão 1.2.4 criada na universidade de Indiana. O cluster utilizado para os projetos era composto de 7 estações (AMD Athlon 1800 MHz e 1.5 GB de memória RAM). Resultados preliminares mostram que é possível reduzir significativamente o tempo de processamento do algoritmo genético, aumentando a sua eficiência[20].

Finalmente, apesar de os algoritmos genéticos terem sido aplicados em redes de Bragg em fibra, a técnica pode ser estendida para outros tipos de redes em fibra desde que se façam as adaptações necessárias de acordo com as novas características e os novos parâmetros do dispositivo que se deseja otimizar.

## AGRADECIMENTOS

Este trabalho tem o apoio do CNPq, uma entidade do governo brasileiro voltada para o desenvolvimento científico e tecnológico.

## REFERÊNCIAS

- [1] T. Erdogan, "Fiber Grating Spectra" IEEE Journal of Lightwave Technology, vol. 15. No. 8, pp. 1277 - 1294 , August 1997.
- [2] Tymon Barwicz, J. Todd Hastings, Joseph Huang, M. Jatal Hhan, Michael H. Lim, Thomas E. Murphy, Hermann. A. Hauss, Henry I. Smith, "Fabrication Techniques for Integrated-Optical Grating-Based Devices," MIT Microsystems Technolgy Laboratories, Annual Report 2002.
- [3] D. Wiesmann, C. David, R. Germann, D. Erni, e G. L. Bona, "Apodized Surface-Corrugated Gratings With Varying Duty Cycles," IEEE Photonics Technology Letters, vol. 12. No. 6, pp. 639-641, June 2000.

- [4] J. Wellen, "Hybrid Access Reconfigurable Multi-wavelength Optical Networks for IP-based Communications systems," Bell Labs Advanced Technologies, March 2001.
- [5] J. Feng, X. Chen, C. Fan, Xuhui Li, Xia Li, Kun Xu e Shizhong Xie "A Novel Method to Achieve Various Equivalent Chirp Profiles in Sampled Bragg Gratings Using Uniform-Period Phase Masks," Optics Communications No. 205, pp. 71-75, April 2002.
- [6] D. Woods,"Shining Light on Optical Networks," Network Computing, pp. 63-65, August 2002.
- [8] Silvia Abad, Manuel López-Amo, Sebastián Jarabo, " Optical filter design for multiwavelength erbium-doped fiber ring lasers," Optics Communications No. 208, pp. 167-172, July 2002.
- [9] Raman Kashyap, Fiber Bragg Gratings, Academic Press,1999.
- [10] C.R. Giles, " Lightwave applications of Fiber Bragg Gratings," IEEE Journal of Lightwave Technology, vol. 15. No. 8, pp. ,August 1997.
- [11] A. Othonos, and K. Kalli, Fiber Bragg Gratings: Fundamentals and Applications in Telecommunications and Sensing, Ed. Artech House: Norwood, 1999.
- [12] Philip Baumeister, "Starting Designs for the Computer Optimization of Optical Coatings," *Applied Optics*, vol. 34 No. 22, pp. 4835 – 4843, August 1995.
- [13] Ágoston Endre Eiben, Robert Hinterding e Zbigniew Michalewicz, "Parameter Control in Evolutionary Algorithms," *IEEE Trans. Evolutionary Computation.*, vol 3. No 2, pp. 124–141, July 1999.
- [14] Sanjay Kumar Sharma and Geroge W. Irwin, "Fuzzy Coding of Genetic Algorithms," *IEEE Trans. Evolutionary Computation.*, vol 7. No 4, pp. 344–355, August 2003.
- [15] David E. Goldberg, Genetic Algorithms in Search, Optimization & Machine Learning, New York, Addison-wesley,1989..
- [16] Pier Giorgio Alotto, Cela Eranda, Bernhard Brandstätter, Günter Fürntratt, Christian Magele, Giorgio Molinari, Mario Nervi, Kurt Preis, Maurizio Repetto e Kurt R. Richter, "Stochastic Algorithms in Electromagnetic Optimization," *IEEE Trans. Magnetics.*, vol 34. No 5, pp. 3674–3684, September 1998.
- [17] Daniel S. Weile e Eric Michielssen, "Genetic Algorithm Optimization Applied to Electromagnetics: A Review", *IEEE Trans. Antennas Propagat.*, vol. 45, pp. 343–353, March 1997.
- [18] Johannes Skaar e Knut Magne Risvik, "A Genetic Algorithm for the Inverse Problem in Synthesis of Fiber Gratings," IEEE Journal of Lightwave Technology, vol. 16. No. 10, pp. ,October 1998.
- [19] M. Yamada and K. Sakuda, "Analysis of almost-periodic distributed feedback slab waveguide via a fundamental matrix approach," *App. Opt*, 26, pp 3474-3478, 1987.
- [20] Marco José de Sousa, Lamartine Vilar de Souza, Claudomiro Sales Junior, Carlos Renato L.Francês e João Crisóstomo Weyl A. Costa, "Fiber Bragg Optimization Using Paralell Processing and Genetic Algorithm," The Fifth Iberoamerican Meeting on Optics(RIAO) and The Eighth Latinoamerican Meeting on Optics Lasers and Their Applications(OPTILAS), October. 2004.