

Síntese de Filtros Ópticos Utilizando Algoritmo Genético Modificado

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

Resumo — Neste trabalho são apresentados resultados para o projeto de uma larga classe de filtros ópticos, baseados em filmes finos e em grades de Bragg, utilizando a técnica de algoritmos genéticos (AG) para otimização das estruturas. É mostrada uma nova metodologia que permite acelerar o tempo de processamento relacionado ao AG, através da escolha adequada de pontos de teste da função aptidão, reduzindo o número de amostras mas mantendo-se a qualidade das respostas obtidas com relação às restrições dos projetos dos filtros.

Palavras-chave — Filtros ópticos, algoritmo genético, Grades de Bragg.

I. INTRODUÇÃO

O algoritmo genético (AG) é uma poderosa ferramenta de otimização e síntese. Sua aplicação a problemas de engenharia é muito diversificada e cada vez mais freqüente [1]-[4]. Para os projetos de filtros ópticos, tanto baseados em filmes finos quanto em fibras, a função objetivo está relacionada à obtenção da estrutura (espessuras e índice de refração) associada à curva de refletividade na faixa desejada (alvo). Desse modo, a otimização consiste em um método baseado na comparação entre os espectros de refletividade calculado, para uma determinada solução, e um espectro de refletividade de referência (curva alvo). Considerando-se que em uma grande classe de projetos, buscam-se respostas para uma considerável faixa de comprimentos de onda, o cálculo da função objetivo e portanto, da refletividade associada à estrutura a ser otimizada, é realizado inúmeras vezes, uma tarefa que implica em considerável esforço computacional e, conseqüentemente, em prolongado tempo de processamento [5]-[7].

Para melhorar o desempenho de sistemas que demandem por grande esforço computacional, como é o caso dessa classe de projetos de AG, uma das técnicas difundidas é a computação paralela [7]. Entretanto, o uso de computação paralela implica na necessidade de uma infraestrutura mínima, como um cluster de computadores. Além disso, é necessário resolver alguns problemas como a adequada divisão das tarefas entre os nós do cluster, granularidade e comunicação entre processos remotos [7]-[8].

Outra solução, na ausência de uma estrutura computacional para computação de alto desempenho, seria o

desenvolvimento de técnicas de aceleração do processamento dos AG. Evidentemente, sempre existe a possibilidade da combinação desses dois processos, otimizando ainda mais o tempo de processamento, permitindo portanto a realização de projetos de estruturas mais complexas.

Neste trabalho, mostra-se que através de modificações adequadas, pode-se acelerar o AG para a síntese de filtros ópticos baseados em grades de Bragg e em filmes finos.

O artigo está organizado na seguinte forma: o item II mostrará como a função aptidão pode ser calculada; o item III discutirá as modificações do AG propostas neste artigo para melhorar seu desempenho; o item IV mostrará os resultados obtidos, ou seja, uma comparação entre o AG convencional com o AG modificado. Finalmente, o item V são apresentadas as conclusões.

II. A FUNÇÃO APTIDÃO

Para o problema de síntese de filtros ópticos baseados em grades de Bragg, o interesse está em obter a estrutura associada ao espectro de refletividade. Portanto, a função aptidão deve comparar uma curva de refletividade calculada com uma curva alvo, gerando um valor numérico tanto maior quanto mais próximas forem as duas.

Para obter a refletividade de grades de Bragg de filmes finos e grades de Bragg em fibra óptica, pode-se utilizar, respectivamente, a formulação matricial descrita por Born&Wolf e a formulação baseada na teoria dos modos acoplados [9]-[10]. Para comparar as curvas de refletividade pode-se utilizar o inverso do erro médio quadrático:

$$A = \left\{ \frac{1}{N_p} \sum_{k=1}^{N_p} [\Gamma(\lambda_k) - \Gamma_R(\lambda_k)]^2 \right\}^{-1}, \quad (1)$$

onde N_p é o número de amostras utilizadas para comparação, $\Gamma(\lambda_k)$ e $\Gamma_R(\lambda_k)$ são, respectivamente, a refletividade calculada e a refletividade alvo para o comprimento de onda λ_k . O parâmetro λ_k é o comprimento de onda para a amostra arbitrária k , situada entre a amostra $k = 1$ e $k = N_p$. Finalmente, A é o valor de aptidão. Os valores de λ_k podem ser uniformemente distribuídos no intervalo $[\lambda_{\min}, \lambda_{\max}]$ de comprimentos de onda, calculados através da seguinte expressão:

$$\lambda_k = \lambda_{\min} + (\lambda_{\max} - \lambda_{\min}) \frac{k-1}{N_p-1}. \quad (2)$$

João. Crisóstomo Weyl A. Costa, jweyl@ufpa.br, Carlos Renato F. Lisboa, rfrances@ufpa.br, Marco José de Souza, marcojs@ufpa.br, Claudomiro S. de Sales Junior, cssj@ufpa.br, UFPa – Universidade Federal do Pará – Departamento de Engenharia Elétrica e de Computação – DEEC, Laboratório de Eletromagnetismo Aplicado – LEA. Av. Augusto Corrêa nº 01 – CP: 8619, CEP: 66075 – 900 Belém/Pa, Brasil.

Este trabalho foi financiado pelo CNPq.

Para melhorar o desempenho da função aptidão é preciso operar diretamente sobre (1). A única maneira de deixar o cálculo de A mais rápido seria reduzir o número de amostras N_p . Infelizmente isso afetaria a precisão dos resultados, e se os valores de aptidão não forem calculados com uma precisão adequada, o processo de seleção simulado dentro do AG se tornará ineficiente. Esse problema afeta particularmente a qualidade da solução obtida pelo AG, pois, os valores λ_k consecutivos se tornarão cada vez mais espaçados à medida que se reduz o número de amostras mantendo-se o intervalo de comprimentos de onda constante. Assim, o AG simplesmente deixa de otimizar satisfatoriamente as regiões espectrais entre duas amostras consecutivas. A seguir será mostrada uma técnica para a redução do número de amostras sem comprometer o desempenho das soluções finais apresentadas pelo AG.

III. O ALGORITMO GENÉTICO MODIFICADO

Conforme mostrado anteriormente, a redução do número de amostras utilizadas em (1) pode prejudicar a qualidade das soluções obtidas pelo AG. Uma forma de prevenir que regiões do espectro de refletividade entre amostras consecutivas não sejam adequadamente otimizadas pelo AG, devido ao reduzido número de amostras, é deslocar dinamicamente os valores de comprimentos de onda λ_k utilizados como base para o cálculo da aptidão, tal como mostrado na Fig. 1. Propõe-se, portanto, que esse deslocamento seja aleatório em relação aos extremos do intervalo $[\lambda_{\min}, \lambda_{\max}]$. Isso implica na presença de um termo a mais em (2), que pode então ser reescrita como:

$$\lambda_k = \Delta\lambda + \lambda_{\min} + (\lambda_{\max} - \lambda_{\min}) \frac{k-1}{N_p - 1}. \quad (3)$$

onde $\Delta\lambda$ representa uma variável aleatória de distribuição uniforme entre $-(\lambda_{\max} - \lambda_{\min}) / (2N_p - 2)$ e $(\lambda_{\max} - \lambda_{\min}) / (2N_p - 2)$. Em cada geração do AG, um mesmo valor da variável aleatória $\Delta\lambda$ é utilizado para avaliar todos os indivíduos da mesma população. Isso significa que, para uma mesma geração, todas as curvas de refletividade serão comparadas à curva alvo nos mesmos comprimentos de onda. Essa estratégia baseia sua eficácia no fato do AG não exigir uma qualificação absoluta da função aptidão, mas relativa. Portanto, basta uma amostragem pequena, porém suficiente para distinguir os indivíduos da população a respeito de suas aptidões. O deslocamento dos pontos de análise $\Delta\lambda$ em relação à janela de análise garante que os intervalos entre as amostras sejam eventualmente explorados de uma geração para outra dentro do AG. Como mostrado na Fig.1, o efeito depois de duas gerações seria equivalente ao uso do dobro de pontos de avaliação, e assim por diante. Dessa forma, embora uma função aptidão menos rigorosa possa reduzir a qualidade da solução final obtida pelo AG, isso não significa necessariamente um prejuízo ao seu funcionamento.

Entretanto, se de alguma forma a qualidade do valor de aptidão calculado torna-se menos confiável, então certamente todo o AG se tornará menos confiável também. Apenas o

deslocamento aleatório da janela de análise não é suficiente para evitar a deterioração da confiabilidade do AG. É necessário que alguma outra adaptação seja feita, como a adição de algum mecanismo de avaliação e correção da qualidade das soluções, de forma a evitar a obtenção de soluções falsamente ótimas.

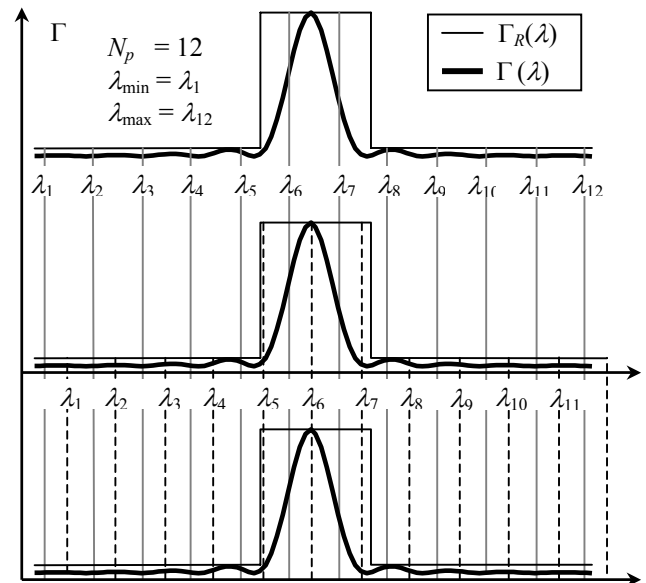


Fig. 1 – Ilustração do deslocamento dinâmico dos pontos de amostra no espectro de refletividade para um suposto filtro óptico.

Para a avaliação de qualidade é utilizada a própria função aptidão sem as alterações propostas neste item, ou seja, com um valor de N_p elevado e amostras sem qualquer desvio aleatório. Contudo, essa função aptidão mais rigorosa será utilizada pelo AG apenas uma vez a cada geração no momento da avaliação de qualidade. Portanto, duas funções aptidão distintas serão empregadas no AG proposto: uma que utiliza um número elevado de amostras fixas; e outra que utiliza um número bem menor de amostras, porém dinamicamente posicionadas de acordo com uma variável aleatória. A partir de agora esses dois tipos de função aptidão serão chamados respectivamente de FAE (função aptidão expandida) e FAR (função aptidão reduzida).

Para a correção da qualidade é utilizada uma solução especial mantida separada do resto da população, chamada de solução de referência. A cada geração, toda a população de soluções é avaliada utilizando a FAR e os valores de aptidão calculados são mantidos associados às suas respectivas soluções. Em seguida, as soluções de melhor e pior aptidão são selecionadas a partir da população atual. Para a melhor solução, um novo valor de aptidão é calculado, mas dessa vez utilizando a FAE. Se a aptidão resultante da FAE for maior que a aptidão da solução de referência, a nova aptidão calculada é associada à referência e a melhor solução da geração toma o lugar da solução de referência. Caso contrário a solução de referência é reavaliada através da FAR e seu valor de aptidão calculado é associado à pior solução da população, a qual passa a ser a própria solução de referência. Portanto, para cada geração, a FAR é acionada no máximo $M+1$ vezes, onde M é tamanho da população do AG. Por outro lado a FAE é acionada sempre apenas uma vez. Este

procedimento é implementado conforme mostrado no diagrama da Fig. 2.

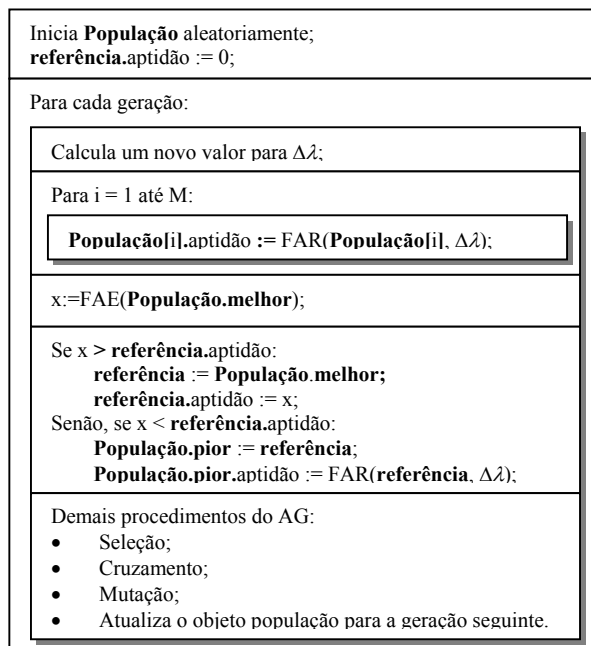


Fig. 2 – Diagrama mostrando o funcionamento do AG modificado.

IV. RESULTADOS

Neste item serão mostrados dois projetos: o primeiro (projeto 1) consiste de uma grade de Bragg de filmes finos; o segundo (projeto 2) uma grade de Bragg em fibra. Para cada projeto são comparadas duas grades: uma sintetizada utilizando o AG tradicional e outra utilizando o AG modificado.

O Projeto 1 consiste de uma grade em fibra projetada para operar na 3ª janela, de 1.549 μm a 1.551 μm , com reflexão total entre 1.5495 μm a 1.5505 μm e com refletividade nula fora dessa banda, conforme mostrado na Fig. 3. O comprimento dessa grade foi fixado em 1 cm. A variação média do índice de refração prevista deve ser próxima de zero ($\Delta n_{ef} = 10^{-9}$) e a visibilidade de franjas (ν) deve ser menor ou igual a 10^6 para todas as 100 seções que formam a grade (cada seção terá um comprimento de 100 μm). O comprimento de onda de projeto (λ_D) nestas condições deve coincidir com o comprimento de onda para o qual a refletividade é máxima (λ_{max}), ou seja, $\lambda_D = 1.55 \mu\text{m}$, de acordo com [9]. O valor escolhido para o índice de refração efetivo (n_{ef}) foi 1.45. O único parâmetro otimizado foi a visibilidade de franjas de cada seção, com a restrição de que o produto $\Delta n_{ef} \times \nu$ não extrapolasse o intervalo $[0; 10^{-3}]$. Das duas grades sintetizadas para este projeto, uma foi obtida através do AG tradicional, que empregou sempre 200 mostras para a função aptidão. A outra grade, obtida através do AG modificado, empregou FAR e FAE com respectivamente 20 e 1000 amostras. A Fig. 3 mostra as curvas de refletividade de ambas as grades obtidas através do AG após 4000 gerações. A evolução da aptidão em função dos números das gerações é mostrada na Fig. 4. Porém, a eficiência superior do AG

modificado pode ser melhor observada através da Fig. 5, onde a aptidão é mostrada em função do tempo de processamento em segundos, e não em relação ao número das gerações.

A Fig. 6 mostra as curvas de $\Delta n_{ef} \times \nu$ em função do comprimento das duas grades obtidas usando o AG modificado e tradicional. É interessante notar que a solução obtida pelo AG modificado se aproxima de uma das melhores soluções proposta em [9]: uma grade cuja amplitude de variação de índice varia segundo um formato co-seno levantado.

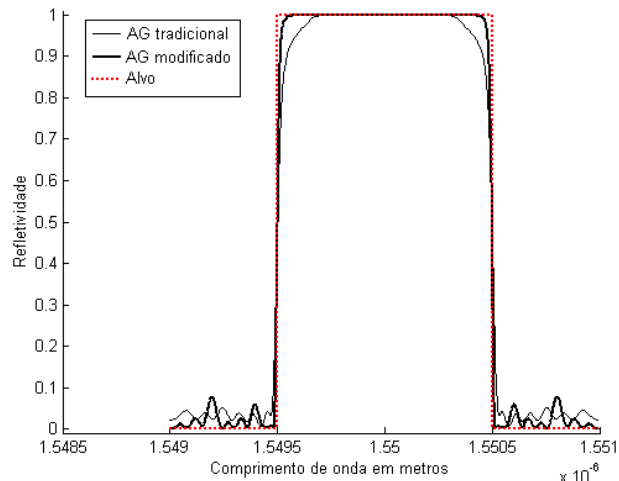


Fig. 3 - Curvas de refletividade em função do comprimento de onda obtida para o Projeto 1.

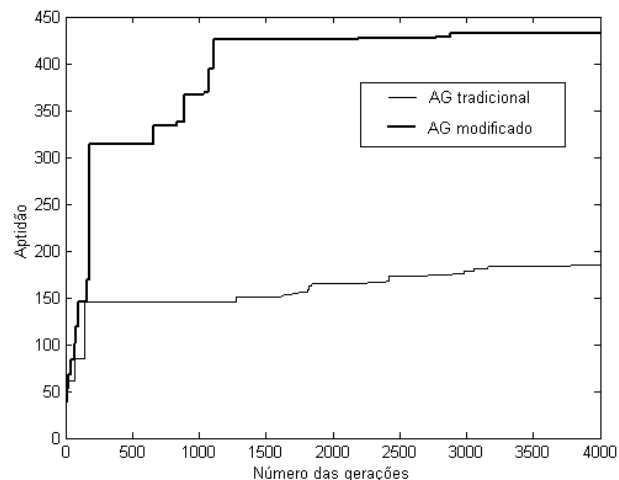


Fig. 4: Evolução da aptidão em função dos números das gerações para o Projeto 1.

O projeto 2 consiste de uma grade de filmes finos de 20 camadas. Propõe-se que a grade seja capaz de refletir 50% da energia luminosa na faixa de comprimentos de onda de 0.4 a 0.5 μm (azul) e 100% na região do espectro que vai de 0.6 a 0.7 μm (vermelho). Entre essas faixas, de 0.5 μm a 0.6 μm , a grade deverá ser transparente. Os materiais utilizados para este projeto possuem índices de refração de 1.46 e 2.1, valores considerados constantes dentro da faixa espectral de 0.4 μm a 0.7 μm . As espessuras de cada camada foram mantidas restritas ao intervalo de 50 nm a 100 nm. A grade deverá operar imersa no ar e sob um ângulo de incidência

normal. O AG utilizou codificação direta dos materiais e espessuras de cada camada [11].

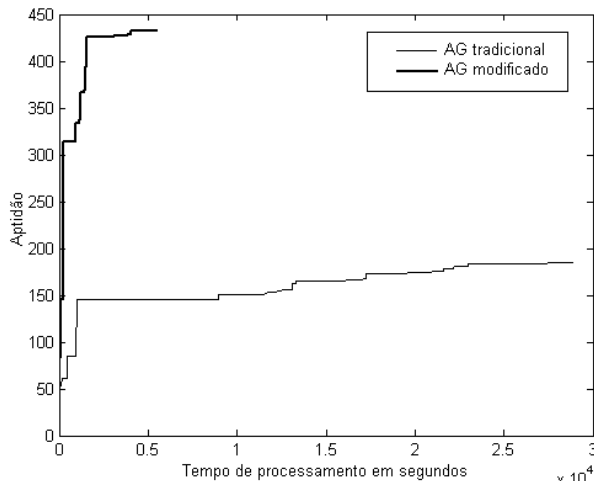


Fig. 5: Evolução da aptidão em função do tempo de processamento para o Projeto 1.

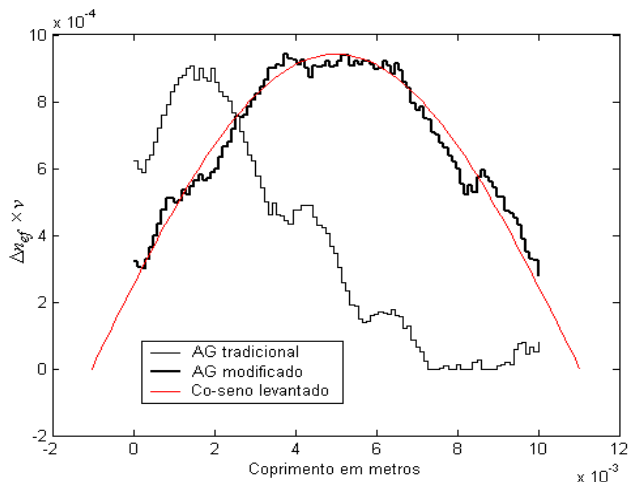


Fig. 6: Perfis de $\Delta n_{ef} \times v$ para as grades 1 e 2 comparadas a um perfil co-seno levantado.

A Fig. 7 mostra a curva de refletividade das duas grades obtidas através do AG modificado e tradicional. O AG modificado utilizou FAR e FAE respectivamente com 20 e 1000 amostras. O AG tradicional empregou sempre 1000 amostras na função aptidão. A Fig. 8 compara as curvas de aptidão em função do número das gerações. A Fig. 9 mostra novamente as curvas de aptidão, porém em função do tempo de processamento. A Fig. 10 (a) e (b) mostra respectivamente os perfis de índice de refração obtidos através do AG modificado e tradicional.

Observa-se por meio dos projetos 1 e 2, que as adaptações feitas no AG trouxeram melhoras tanto no seu desempenho como também na qualidade das soluções. A explicação para esse fenômeno está na utilização do AG modificado, que é capaz de melhorar a precisão da função aptidão, como se muito mais do que 20 amostras tivessem sido utilizadas. O AG modificado utiliza pontos de comprimentos de onda de avaliação diferentes (igualmente espaçados) em cada geração. Assim, como os indivíduos não alteram consideravelmente de uma geração para outra, essa técnica acaba promovendo uma

avaliação progressiva à medida que o AG evolui. Com 20 amostras, depois de 10 gerações, as curvas de refletividade foram avaliadas em 200 pontos diferentes. Depois de 100 gerações, 2000 pontos e assim por diante. Outro aspecto observado foi o aumento da diversidade da população do AG que também contribui para a melhoria das respostas encontradas.

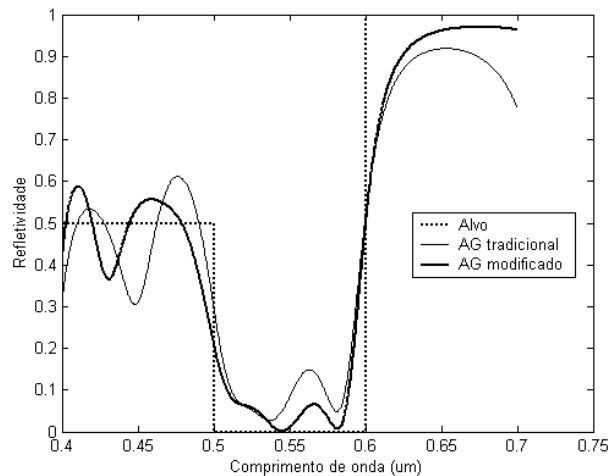


Fig. 7 – Curvas de refletividade em função do comprimento de onda obtida para o Projeto 2.

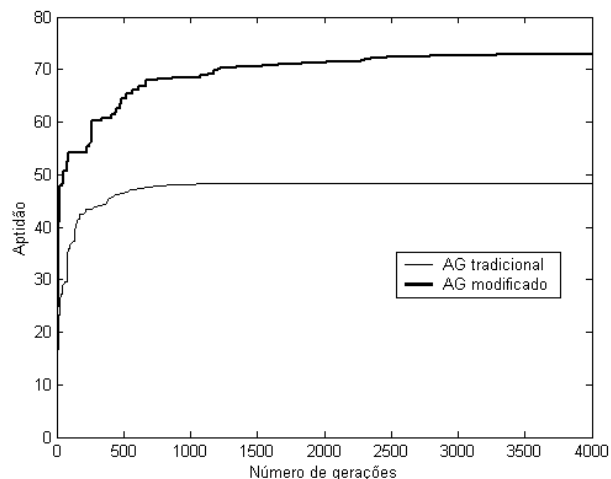


Fig. 8 – Evolução da aptidão em função dos números das gerações para o Projeto 2.

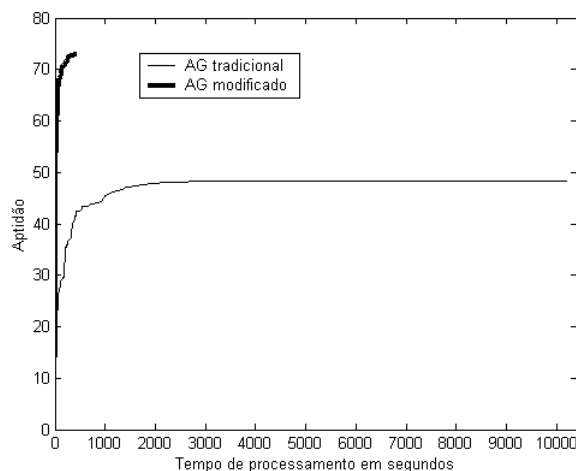


Fig. 9 – Evolução da aptidão em função do tempo de processamento para o Projeto 2.

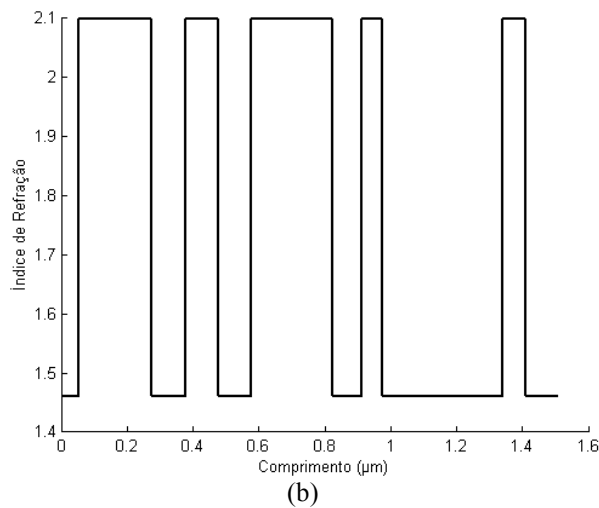
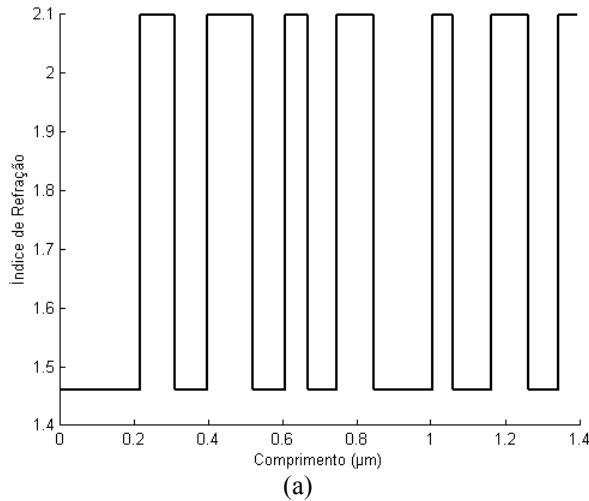


Fig. 10 – Perfil de índices de refração para o Projeto 2: (a) utilizando AG modificado; (b) utilizando AG tradicional.

V.CONCLUSÕES

A técnica mostrada neste artigo obteve melhoras em relação ao AG tradicional tanto na qualidade das soluções como no desempenho e, portanto, apresenta-se como uma alternativa viável tanto aos AGs tradicionais quanto aos AGs associados à computação paralela. É importante ressaltar que essa técnica pode ser aplicada a muitos outros problemas, não se restringindo apenas à síntese de filtros ópticos. Para tanto, basta que seja possível implementar dois tipos de funções aptidão: uma função aptidão que utiliza menos pontos para a avaliação de soluções, porém mais rápida; e outra que utiliza mais pontos de avaliação, porém mais lenta. Com esta técnica verificou-se que o AG, utilizando qualquer tipo de estratégia de codificação, pode aumentar satisfatoriamente seu desempenho computacional. Combinado-a com a técnica de paralelização, é possível remover uma das maiores limitações associadas à utilização de algoritmos genéticos: o tempo de processamento. Os autores deste artigo atualmente

investigam o impacto da inserção de técnicas de paralelização nos AGs modificados.

REFERÊNCIAS

- [1] C.J. Fourie and W.J. Perold, "Comparison of genetic algorithms to other optimization techniques for raising circuit yield in superconducting digital circuits", *Applied Superconductivity*, IEEE Transactions on, vol. 13, issue 2, pp. 511- 514, June 2003.
- [2] S.L. Avila, W.P. Carpes and J.A Vasconcelos, "Optimization of an Offset Reflector Antenna Using Genetic Algorithms", *Magnetics*, IEEE Transactions on, vol. 40, issue 2, pp. 1256-1259, March 2004.
- [3] K. C. Lee, "Genetic algorithms based analyses of nonlinearly loaded antenna arrays including mutual coupling effects", *Antennas and Propagation*, IEEE Transactions on, vol. 51, issue 4, pp. 776-781, April 2003.
- [4] D. E. Goldberg, *Genetic algorithms in search, optimization and machine learning*, Addison - Wesley, MA, 1989.
- [5] J. C. C. Carvalho, *Algoritmos genéticos aplicados à síntese de dispositivos ópticos*, Dissertação de Mestrado PPGEE/UFPA, 1999.
- [6] M. J. Sousa, *Síntese de Grandes de Bragg Utilizando Algoritmo Genético e Processamento Paralelo*, Dissertação de Mestrado PPGEE/UFPA, 2003
- [7] M. J. Sousa, L. V. Souza, C. S. J. Sales, J. C. C. Carvalho, C. R. L. Francês, e J. C. W. A. Costa, "Otimização de grades de Bragg em fibra usando processamento paralelo e algoritmo genético", *XX Simpósio Brasileiro de Telecomunicações-SBT*, outubro de 2003.
- [8] W. Gropp, E. Lusk, A. Skjellum and R. Thakur, "Using MPI: portable parallel programming with the message passing interface", *Scientific and Engineering Computation*, 2nd Edition, MIT Press, 1999.
- [9] T. Erdogan, "Fiber grating spectra", *IEEE Journal of Lightwave Technology*, vol 15, pp. 1277-1294, 1997.
- [10] M. Born and E. Wolf, *Principles of Optics*, 6nd Ed., Pergamon Press, 1980.
- [11] E. Herbert Li, "Genetic algorithm for design of reflective filters: application to AlxGa1-xN based Bragg reflectors," *Optical and Infrared Thin Films*, Michael L. Fulton, Editor, *Proceedings of SPIE Vol. 4094*, pp 129-136, 2000.