

MÉTODO NUMÉRICO PARA SÍNTESE DE FILTROS ÓPTICOS REFLETORES UTILIZANDO SOBREPOSIÇÃO DE GRADES

M. J. de Sousa e J.C.W.A. Costa

LEA-Laboratório de Eletromagnetismo Aplicado -Departamento de Engenharia Elétrica – Cento Tecnológico - UFPA –
Universidade Federal do Pará
Av. Augusto Corrêa n.º 01 – CP:8619, CEP: 66075-900 Belém/PA, BRASIL

RESUMO

Este trabalho apresenta uma metodologia para a síntese de filtros ópticos capazes de teoricamente atender a quase qualquer resposta de refletância solicitada. A técnica se baseia na sobreposição de grades ópticas de respostas de refletância conhecidas. É demonstrado que o filtro resultante possui uma curva de refletância praticamente igual a somatória de cada uma das curvas das grades componentes. Muito embora os resultados sejam estruturas de perfil de índice de refração aperiódicos e aleatórios, é mostrado a possibilidade de se gerar perfis de índice adequados à aplicação da tecnologia dos filmes finos através do conceito de camada equivalente.

1. INTRODUÇÃO

O método tratado neste trabalho utiliza uma formulação relativamente simples para garantir a posição fixa em comprimento de onda de qualquer quantidade de picos de refletância. Após isso, apenas um parâmetro da formulação é variado iterativamente de modo a sintonizar o valor da amplitude de cada pico até seus valores finais desejados. Isso implica em verificações de valores de refletância sistemáticas. Para se avaliar com precisão sintonia da refletância do filtro, que é fundamental para o sucesso do processo de síntese, é utilizado o método matricial tal como descrito em [1] e utilizado em [2][3][4][5]. A simplicidade da formulação e o reduzido número de parâmetros a serem determinados iterativamente fazem com que o método seja rápido e de boa convergência

Uma vez que qualquer quantidade de picos de qualquer amplitude de refletância podem ser conseguidos centrados em quaisquer comprimentos de onda de interesse, uma composição de picos suficientemente estreitos e agrupados podem gerar curvas de refletância obedecendo quaisquer formatos que interessem ao projetista. Evidentemente, há restrições principalmente se picos não puderem ser estreitados a contento; o que está diretamente ligado a escolha ou limitação dos materiais empregados para a construção do filtro ou ainda à limitação imposta ao comprimento total da estrutura.

A aplicação para filtros de comportamentos tão singulares quanto se queira é muito ampla. Pode-se imaginar acopladores capazes de controlar a potência óptica transportada para outras fibras adjacentes e que simplesmente impeçam a acoplagem de determinados comprimentos de onda. É possível construir filtros para a correção de não linearidades da fibra ou dos componentes associados a ela; pode-se, ao contrário, adicionar não linearidades planejadas; pode-se construir filtros operantes em múltiplos

comprimentos de onda de forma a satisfazer algumas das necessidades da tecnologia WDM. As possibilidades ainda são maiores caso se considere a utilização de materiais ativos.

2. O MÉTODO PARA SÍNTESE DE FILTROS REFLETORES

2.1 Composição de perfis senoidais

Uma grande classe de filtros ópticos podem ser modelados como uma série de camadas dielétricas de dimensões transversais infinitas e com diferentes valores de índice de refração e espessura. Por mais que o índice de refração varie continuamente, essa variação pode ser discretizada considerando camadas dielétricas de espessuras suficientemente menores do que o comprimento de onda da radiação incidente. A figura abaixo ilustra a modelagem mencionada:

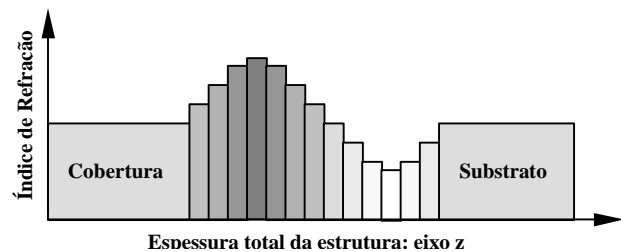


Figura 1. Modelagem de um filtro dielétrico em termos de uma sequência de camadas semi-infinitas de índices variáveis e espessuras discretas.

Para fazer com que a estrutura responda como um refletor de alta eficiência para uma frequência específica é necessário satisfazer a condição de casamento de fase. Esta condição nada mais é do que o compromisso de que a onda estacionária gerada no interior da estrutura se somará em fase com a onda refletida em cada camada [2][3][4]. Nesta condição uma quantidade mínima de energia atravessará a estrutura e uma quantidade máxima será refletida de volta para a cobertura.

Para entender o processo de casamento de fases, considere duas interfaces separando três meios de constantes dielétricas diferentes. A medida que a onda se propaga, sofre uma defasagem dada por:

$$j = k_0 \Delta z \quad (1)$$

Onde k_0 é o número de onda no espaço livre na direção de propagação e Δz é o comprimento óptico percorrido pela onda. Para o caso das duas interfaces, dado que a distância óptica entre elas seja d , a defasagem total do raio refletido na última separação será de $2k_0d$. Considerando que a onda refletida na primeira separação possua uma defasagem de π , conclui-se que a condição de fase para a máxima reflexão é $2k_0d = \pi$ [2], ou:

$$d = \frac{I_0}{4} \quad (2)$$

Esta relação estabelece uma ligação entre o formato do perfil de índice de refração com o comprimento de onda no espaço livre para o qual a eficiência de reflexão é máxima. Como em termos práticos um valor de refletividade elevado é conseguido apenas com repetições de camadas de espessura d e índices alternados, é mais natural associar a espessura óptica das camadas à periodicidade da estrutura. Imaginando uma estrutura composta de camadas discretas (filmes finos), de dois tipos de índices de refração n_1 e n_2 , alternadas uma após a outra, cada par de camadas formam um período de comprimento $2d$. Em outras palavras, isso é associar uma forma de perfil de índice quadrado periódico a um pico de máxima refletância cujo valor no espaço livre é exatamente o dobro do período do perfil de índice ($4d$).

Como entretanto, a posição do pico de refletância em termos de comprimento de onda está amarrada apenas na condição de fase, qualquer perfil periódico cujo período seja $2d$ estará associado a um pico de refletância assim como acontecia com o perfil quadrado dos filtros de filmes finos. Matematicamente é bem mais prático se adotar um perfil senoidal de índice de refração, mas neste caso a associação entre perfil de índice e resposta de refletância de alguma forma lembrará a Transformada de Fourier, ou seja, perfil de índice de refração senoidal (função), associado a espectro de refletividade estreito (tipo impulso). Considerando a linearidade deste mapeamento (transformada), e como funções podem ser representadas por uma somatória de cossenos e senos, é possível encontrar o formato do perfil dielétrico de um filtro refletor óptico, através de uma espécie de *anti-transformada (mapeamento inverso)* do comportamento espectral desejado para esta estrutura.

Considere-se um filtro desconhecido com reflexão máxima ocorrendo apenas para o comprimento de onda I_0 . Tal resposta pode ser escrita como:

$$R(I) = \mathbf{d}(I - I_0) \quad (3)$$

Onde R é a refletividade dependente de I (e consequentemente da frequência) e \mathbf{d} é a função impulso. Considerando que o perfil de índice de refração pode ser representado por funções *senoidais* através da seguinte relação:

$$n(z) = A \cdot \cos\left(\frac{\mathbf{p}}{d}z\right) + A_0, \quad (4)$$

onde n é o índice de refração dependente de z , que por sua vez representa a posição longitudinal ao longo do eixo axial da estrutura. Os valores A e A_0 representam respectivamente os valores AC de DC de $n(z)$ e não possuem tanta importância como o argumento do cosseno. Esta expressão utiliza a função cosseno

mas não há diferenças em utilizar a função seno (ou até mesmo qualquer outra função periódica), pois a única exigência é que o período seja sempre $2d$, o que satisfará sempre a condição de fase, descrita pelas equações (1) e (2).

A Equação (3) pode ser usada para uma generalização capaz de representar qualquer expressão no domínio de I através de uma somatória de impulsos de amplitude variável. No entanto, as amplitudes não podem ser controladas através de qualquer parâmetro da Equação (4), mas sim através do uso de um maior número de repetições, ou seja, pelo comprimento total do filtro óptico [2]. Quanto maior for o comprimento da estrutura, mais próximo de 100% será a refletividade do filtro. Rescrevendo a Equação (3) como uma somatória de impulsos, obtém-se:

$$R(I) = \sum_{k=0}^n B_k \mathbf{d}(I - I_k), \quad (5)$$

onde B_k representa k -ésima amplitude da refletância do k -ésimo impulso centrado em I_k , com $0 < B_k < 1$. Considerando a linearidade já observada, é possível escrever uma representação do perfil da estrutura capaz de apresentar um comportamento espectral dado pela Equação (6), através de uma somatória de funções senoidais:

$$n(z) = A_0 + u(z)A \sum_{k=0}^n \cos\left(\frac{4\mathbf{p}}{I_k}z\right) \cdot u(f(B_k) - z). \quad (6)$$

A presença das funções degrau unitário u , uma delas dependente de $f(B_k)$, serve apenas para limitar o comprimento da estrutura de 0 a $f(B_k)$, sendo uma forma de controlar os valores das amplitudes dos impulsos no domínio de I [2]. Foi escolhido o degrau unitário apenas por simplicidade, mas qualquer função limitante, dependente direta ou indiretamente de B_k , poderia ser escolhida. Essa dependência é colocada na Equação (7) através de f , uma função desconhecida. Em termos práticos, isso significa que o comprimento da estrutura básica, para cada cosseno (ou seja, para cada modulação no índice de refração), deverá ser determinado numericamente, fazendo-o variar de zero até um valor que satisfaça a condição de refletância B_k no domínio I . A Figura 2 ilustra o processo exposto. Para cada refletância B_k , está associada uma estrutura básica, de comprimento total z_k , com perfil de índice de refração sintonizado no comprimento de onda desejado I_k . O tamanho total de cada estrutura básica é determinado pelo número de períodos. Por sua vez, o tamanho da estrutura resultante é determinado pela estrutura básica mais longa.

2.2 Aproximação de perfis senoidais para perfis filmes finos utilizando camadas equivalentes.

Estruturas de perfis de índice de refração como somatórias de cossenos podem ser muito difíceis de se recriar na prática. Isso se deve ao processo de fabricação de estruturas com perfis gradativos através da deposição de materiais em substratos, como feito para a construção de filtros de filmes finos. Mesmo no processo de construção de grades em fibras pela exposição da mesma ao ultra violeta, perfis muito aleatórios podem deixar a sua realização impraticável comercialmente.

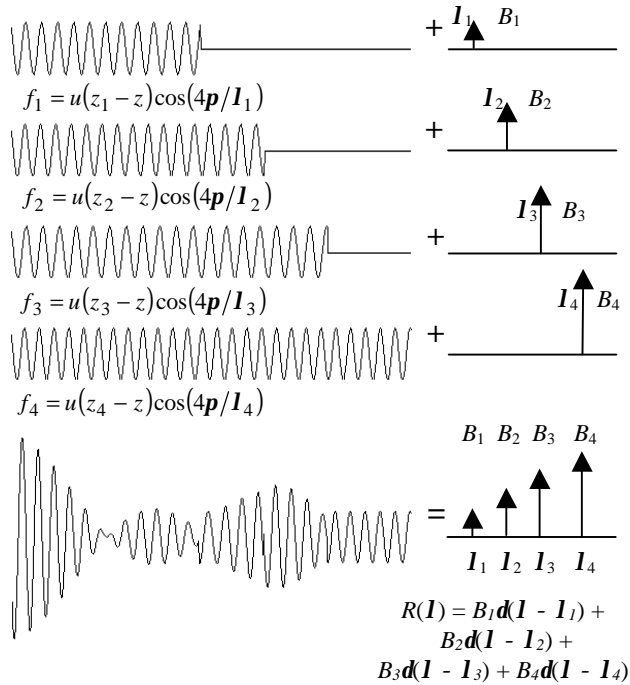


Figura 2. Construção do perfil $n(z)$ para 4 picos de refletividades com amplitudes diferentes no domínio I . A esquerda representa-se o perfil de índice de refração das estruturas básicas, e a direita, os valores de refletividade associados.

Porém há maneiras de se aproximar estruturas senoidais ou de variação de índice gradual por uma distribuição de camadas com variação de índices tipo degrau, bem definidos. A primeira forma consistiria em se observar os aspectos das curvas de índice e discretizá-las ao máximo possível. Isso é particularmente simples de ser tratado para perfis variando com apenas uma frequência.

Há casos, porém, em que a aproximação não é tão simples e técnicas mais elaboradas devem ser empregadas para se conseguir-la [1]. Isso é especialmente verdadeiro à medida em que o refletor é projetado para operar em um número cada vez maior de comprimentos de onda. Para refletores operando em comprimentos muito numerosos, pode ser impossível a utilização de qualquer técnica de aproximação direta ou intuitiva. Nesse caso, é possível conseguir resultados satisfatórios utilizando *camadas equivalentes*. Esse termo é aqui aplicado para designar camadas de materiais e espessuras diferentes, porém capazes de operar defasagens idênticas. A equivalência de fases pode ser expressa a partir de (1):

$$n_1 h_1 = n_2 h_2 \quad (5)$$

Onde os índices 1 e 2 distinguem as camadas equivalentes, n representa o índice de refração e h representa a espessura física das camadas. Através deste conceito simples é possível transportar toda a complexidade presente na variação de índice da estrutura para a variação das espessuras das camadas, de forma a se tornar possível a teórica construção de qualquer filtro utilizando apenas dois tipos de materiais. A Figura 3 mostra em detalhes o processo de utilização das camadas equivalentes para a

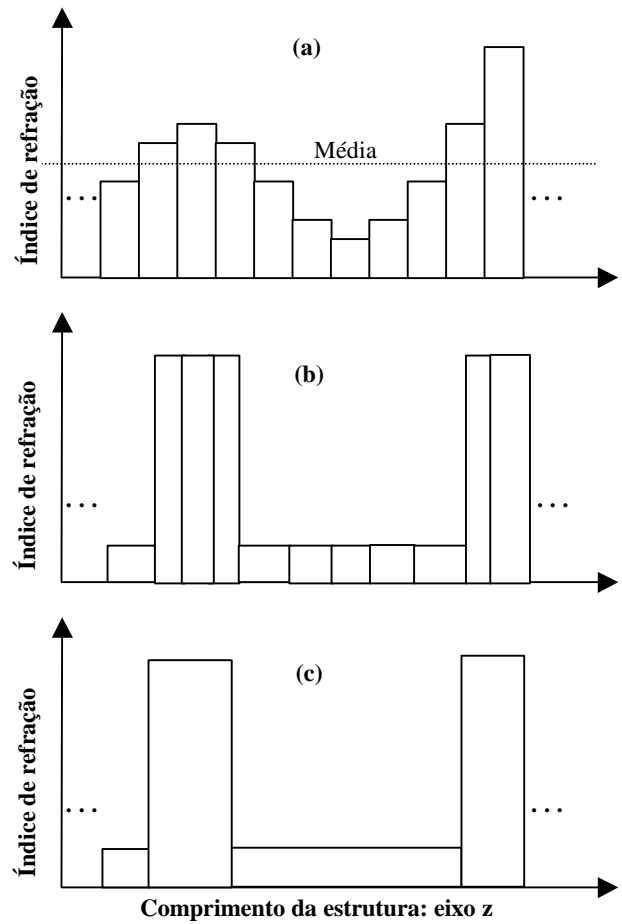


Figura 3. Processo de conversão de um trecho de estrutura de perfil de índice contínuo discretizado (a) para um perfil adaptável a um filtro de filmes finos (c). A forma intermediária (b) mostra que o produto $n \cdot h$ permanece inalterado (mesma fase).

conversão de um trecho de grade de perfil contínuo discretizado para um perfil quadrado adaptável a um filtro de filmes finos.

3. EXEMPLOS

Para ilustrar a técnica de composição de grades senoidais de perfis descritos pela Equação (6) e a técnica de simplificação de estruturas utilizando camadas equivalentes, são mostrados alguns exemplos de estruturas e suas respectivas respostas de refletância. Os materiais utilizados para os exemplos possuem índices de refração variando de 2.95 a 3.5. O ângulo de incidência da onda considerado para os exemplos são nulos.

A Fig. 4 mostra duas estruturas sintetizadas através da somatória de cossenos, porém com amplitudes diferentes para cada pico. Nestes exemplos o formato da silhueta dos picos segue uma forma triangular inferior e superior. Estes exemplos mostram a funcionalidade da Equação (6) e a possibilidade construção de filtros de resposta variável de forma relativamente simples.

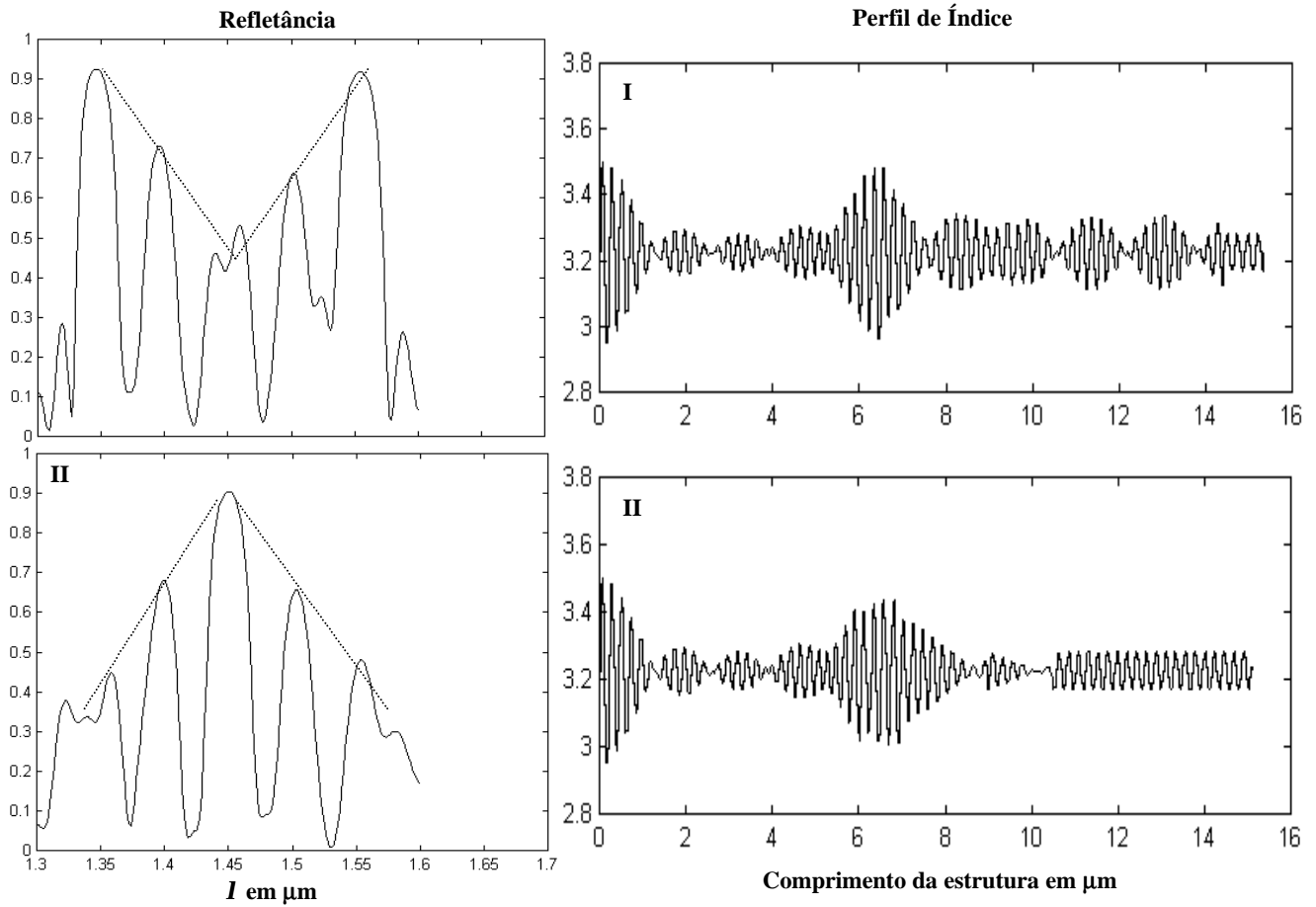


Figura 4. Esquerda: Comparação das respostas de duas estruturas senoidais operando em 1.3, 1.35, 1.4, 1.45 e 1.5 μm com amplitudes de picos variáveis segundo silhueta triangular inferior (I) e inferior (II) em destaque. Direita: Os perfis de índices de refração das respectivas estruturas.

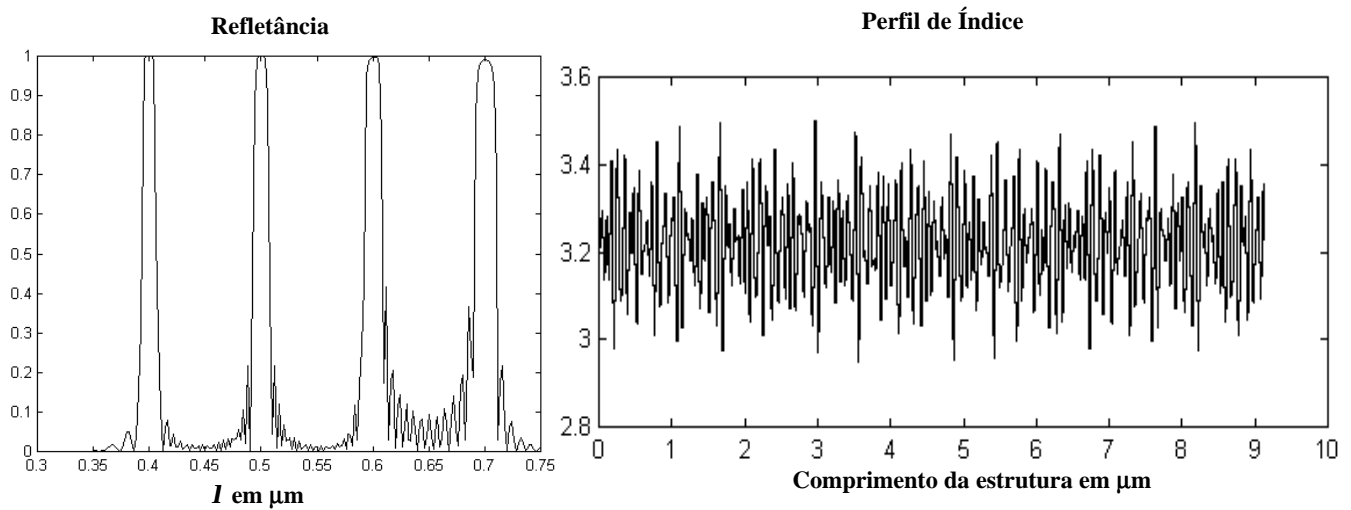


Figura 5. Esquerda: Resposta de um filtro projetado para operar nos comprimentos de onda de 0.4, 0.5, 0.6 e 0.7 μm . Direita: Perfil do índice de refração da estrutura para o respectivo filtro.

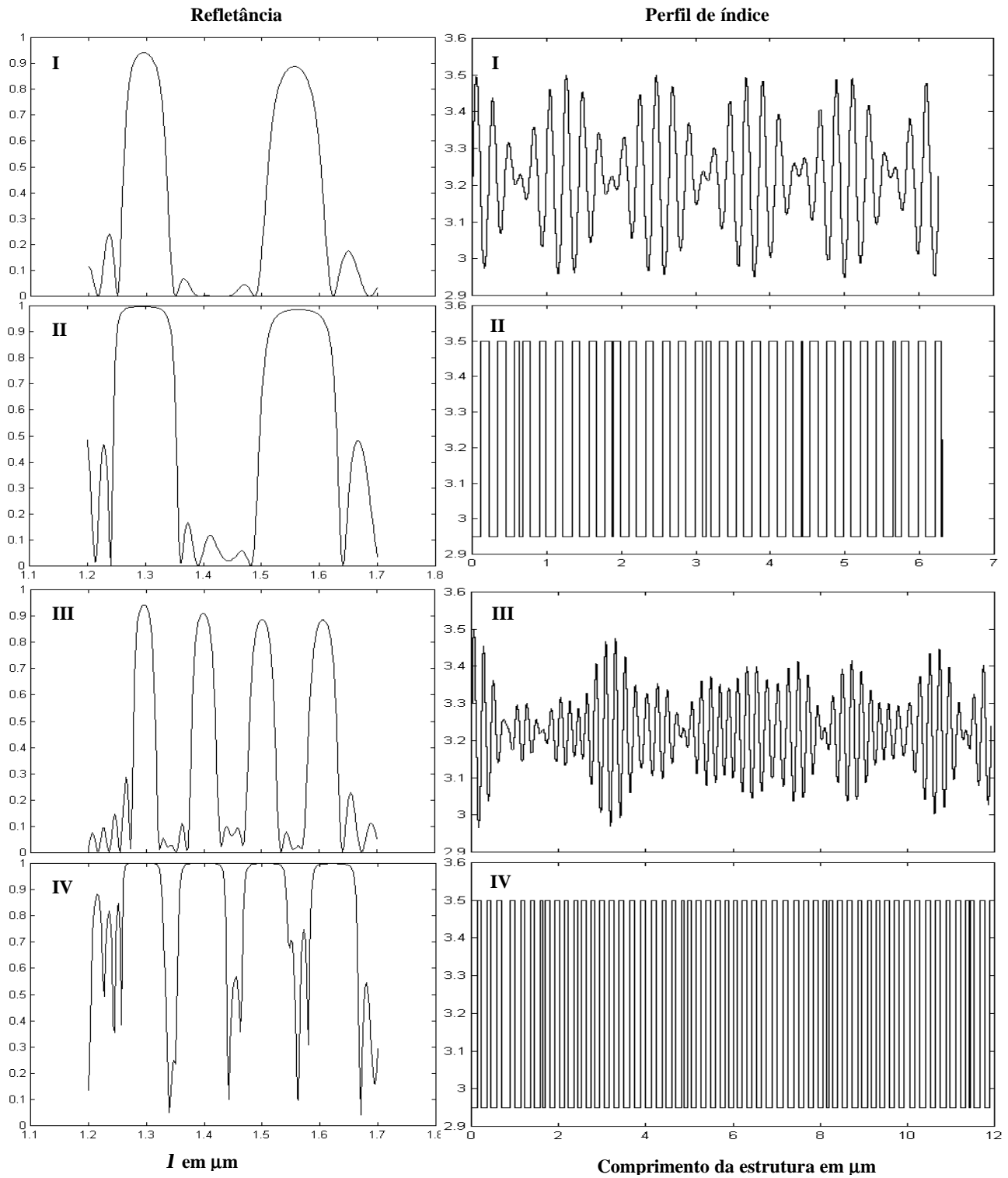


Figura 6. Esquerda: Sucessivas respostas de refletância em comparação aos pares, uma estrutura criada por composição de cossenos e outra pela transformação usando camadas equivalentes. Direita: Perfis de índices de refração das estruturas cujas curvas de refletância são mostradas à esquerda, **I** e **II** possuindo 2 picos e **III** e **IV** possuindo 4 picos.

Bastaria portanto aumentar o número de picos e aproximá-los para se obter uma aspecto contínuo da refletância para o intervalo de comprimento de onda em particular. para se obter uma aspecto contínuo da refletância para o intervalo de comprimento de onda em particular.

A aparência dos perfis de índice da Fig. 4 são relativamente simples e é fácil perceber a possibilidade de aproximação para formas equivalentes ainda mais simples. Porém o método apresentado pode originar perfis realmente complicados e até impossíveis como mostrado na Fig. 5. Esse caso serve apenas como ilustração e comprova as habilidades do método em determinar o perfil do filtro para quase qualquer tipo de resposta espectral.

Interessa portanto a simplificação de estruturas muito complicadas e também a adaptação de perfis contínuos para perfis de camadas espessas encontrados em filtros de filmes finos. Uma maneira de se fazer isso seria reduzir ao máximo a taxa de amostragem das estruturas obtidas chegando bem próximo da taxa de Nyquist, que embora teoricamente possível, na prática não pode ser alcançada. Porém, através da metodologia exposta em [1][2][4] é possível conseguir estruturas que apresentem exatamente esta frequência de amostragem. Entretanto aquelas estruturas possuem a limitação de só poderem gerar apenas um arranjo de picos simetricamente dispostos em torno de uma referência, e assim mesmo, o número de picos não poderá ser diferente de potência de dois (2^n). A transformação utilizando camadas equivalentes é a única forma genérica para se conseguir uma radical simplificação da estrutura com a liberdade de se poder trabalhar com qualquer número de materiais que se queira.

A Fig. 6 comparam estruturas obtidas pela composição de cosenos com suas equivalentes resultantes da conversão usando camadas equivalentes. Observa-se que a refletância das estruturas originais não chegam a superar muito 80% e mesmo assim as estruturas convertidas apresentam sempre refletância superando 99%. Isso se deve pelo descasamento médio das camadas bem mais elevados para estes perfis quadrados. Para o controle seguro da refletância é indicado a busca iterativa pela estrutura original de comprimento adequado, de forma a se conseguir exatamente a refletividade desejada nos filtros finais frutos da conversão usando camadas equivalentes.

4. CONCLUSÃO

O método numérico exposto neste trabalho mostrou-se eficiente mesmo sem utilizar algumas otimizações. As funções *limitantes*, por exemplo, podem melhorar o aspecto da resposta de refletância e também o aspecto do perfil de índice de refração (tornando-o mais homogêneo). Dentre as funções limitantes que possivelmente poderiam ser utilizadas destacam-se a gaussiana, exponencial, rampa e até a função constante. Quanto a precisão das estruturas conseguidas através da conversão das estruturas de composição senoidal utilizando a camada equivalente, sempre é muito dependente dos materiais utilizados. Caso se tenha disponibilidade, é possível utilizar mais de dois níveis de índice de refração, o que aproximaria mais a resposta de refletância da resposta da estrutura original. Mesmo que os resultados não possam ser otimizados analiticamente, os resultados consegui-

dos são excelentes chutes iniciais para outros métodos numéricos genéricos e evolutivos; principalmente porque o motivo das otimizações poderia ser apenas as espessuras das camadas.

5. REFERÊNCIAS

- [1] M. Born e E. Wolf, "Principle of Optics", Pergamon Press, New York, 1975, cap. 1.
- [2] C. J. G. da Silva e J. C. W. A. Costa. "Projeto de Espelhos de bragg de Alta Refletividade Operando em Múltiplos Comprimentos de Onda", *Anais do VIII Simpósio Brasileiro de Microondas e Optoeletrônica*, Joinville-SC, pag. 450-453.
- [3] M. J. de Sousa e J. C. W. A. Costa. "Projetos de Espelhos de Alta Refletividade Operando em Múltiplos Comprimentos de Onda", *Anais do IX Simpósio Brasileiro de Microondas e Optoeletrônica*, João Pessoa – PB, pag. 180 – 183.
- [4] S. S. Murtaza, K. A. Anselm, A. Srinivasan, B. G. Streetman, J. C. Campbell, J. C. Bean e L. Peticolas. "High-reflectivity Bragg mirrors for optoelectronic Applications", *IEEE Journal of Quantum Electronics*, vol. 31, no. 10, pp. 1819-1825, Out. 95.
- [5] D. O. Pereira. "Desenvolvimento de um Ambiente Computacional para o Estudo de Guias Ópticos Utilizando o Mathematica", Trabalho de Conclusão de Curso – UFPa/CT/DEE, Belém – Pa, 1998.