

3. Processos de Síntese

Foi visto no Capítulo anterior como gerar picos de máxima refletividade em qualquer posição do espectro. Também foi visto que é possível controlar os valores efetivos de refletividade dos picos através do número de células ou da escolha dos valores de índice de refração dos materiais. A questão agora é como realmente combinar os meios de controle da resposta espectral de forma a obter o filtro óptico desejado.

A dificuldade maior associada à síntese de filtros ópticos está na obtenção exata da expressão que relacione a estrutura física do dispositivo e seu espectro refletividade. A solução deste trabalho consiste em “rascunhar” tal relação e, através de algoritmos iterativos, otimizar o espectro da estrutura até que satisfaça as exigências estabelecidas. A Fig. 3.1 mostra o fluxograma básico dos algoritmos:

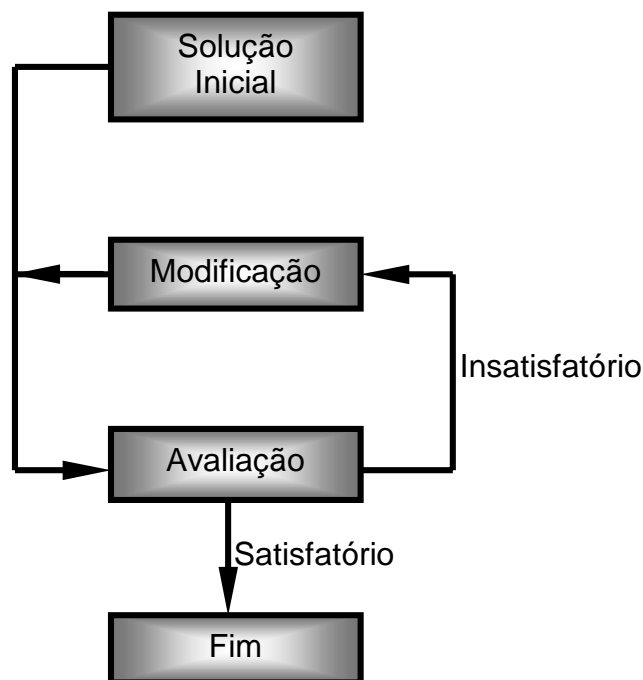


Figura 3.1. Estrutura básica do algoritmo iterativo.

Os Capítulos anteriores discutiram cada item do diagrama da Fig. 3.1: a obtenção da solução inicial e o processo de modificação seguem os conceitos

apresentados no Capítulo 2; o processo de avaliação está baseado na metodologia matricial de análise discutida no Capítulo 1. A função deste Capítulo é discutir o diagrama da Fig. 3.1 como um todo, pouco se detendo nos blocos integrantes do diagrama os quais já foram discutidos.

3.1. Síntese de Grades Refletoras Simples

Os parâmetros para a síntese de uma grade refletora simples são usualmente os materiais da estrutura, o ângulo de incidência θ , o ponto de operação no qual deseja um pico de máxima refletividade e, principalmente, a mínima refletividade efetiva para o pico (em geral, o valor solicitado de refletividade se aproxima de 1).

Como a grade é definitivamente constituída de camadas alternadas de dois materiais, a questão é descobrir qual a espessura de cada camada, dado um ângulo de incidência qualquer, além de determinar também o número de células.

No Capítulo 2 foi mostrado como calcular, através de (2.1), a espessura ótima das camadas para que a refletividade seja máxima. Quanto a determinação do número de células da grade, esta pode ser feita de forma iterativa. Inicialmente a solução deve possuir um número mínimo de células, isso garante que a refletividade da estrutura será mínima também. Enquanto a refletividade do pico for menor no que o valor estipulado, o número de células da estrutura será incrementado. A Fig. 3.2 mostra o diagrama da Fig. 3.1 adaptado para ilustrar a síntese de grades refletoras simples:

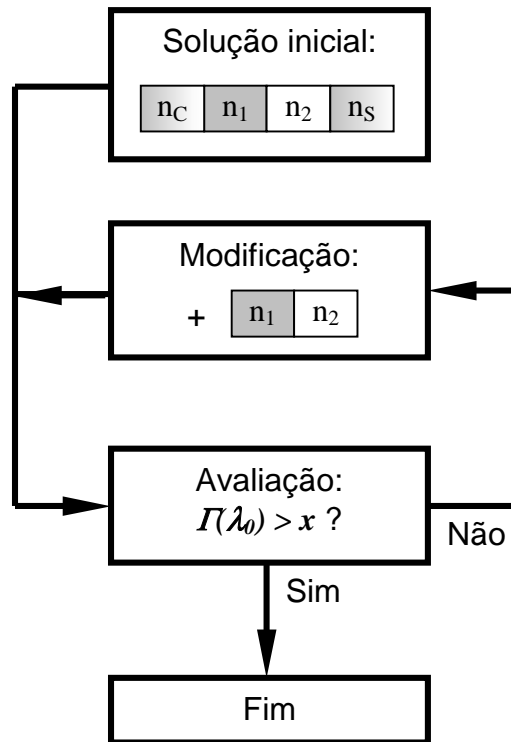


Figura 3.2. Diagrama para síntese de grades refletoras simples. Os símbolos n_C , n_S , n_1 e n_2 referem-se respectivamente ao índice de refração da cobertura, substrato, material 1 e 2. O símbolo x refere-se ao valor mínimo de refletividade escolhido.

3.2. Síntese de Grades Refletoras em Dois Comprimentos de Onda

A síntese de grades refletoras duais segue os mesmos princípios da síntese para refletores simples. O projeto se resume na determinação da célula básica e o número de vezes que esta se repete.

A influência do comprimento de onda é embutida no cálculo das espessuras das camadas através de (3.1). Dessa forma, para se determinar as características das células, basta calcular λ_0 e $\Delta\lambda$ através de (2.8) e (2.9) respectivamente. A posição de inserção da camada adicional para modelagem do batimento (Fig. 2.5), calculada através da relação $\Delta\lambda/\lambda_0$, determina o número de camadas de cada célula.

Para o processo de avaliação da estrutura, é necessário comparar os valores de refletividade apresentados para os dois comprimentos de onda de interesse (λ_1 e

λ_2), com o valor mínimo de refletividade estabelecido como alvo do projeto. É fácil perceber que não é possível, através desta metodologia, projetar uma grade que apresente um dos dois picos com diferentes valores de refletividade.

3.3. Síntese de Grades Refletoras com Número Arbitrário de Picos de Máxima Refletividade

A síntese de filtros refletores que apresentem mais de 2 comprimentos de onda exigem o uso do recurso da sobreposição. Com ela é possível adicionar um número qualquer de picos de máxima refletividade de forma independente, ou seja, em qualquer posição e com qualquer valor de refletividade exigido. Essa é uma grande vantagem em relação ao projeto grades duais.

Em se tratando de algoritmo, é interessante compreender como os perfis de índice de refração sobrepostos são obtidos numericamente. Compreender, por exemplo, que há uma preocupação com a amostragem utilizada na elaboração do perfil gradual.

De acordo com o que foi visto no Capítulo 2, é possível associar uma harmônica, isto é uma senóide somada ao perfil de índices, a um pico de refletividade no espectro. Portanto, para uma senóide de período $\lambda_0/2$, é gerado no espectro de refletividade um pico centrado exatamente em λ_0 . Mas se por um lado a associação entre perfil de índices de refração e posição do pico no espectro de refletividade pode ser determinada de forma tão segura, o mesmo não se pode dizer quanto a amplitude desse pico.

Porém, foi visto também que é possível alterar o valor da refletividade do pico mudando o valor da diferença de índices de refração utilizados (amplitude de cada harmônica, no caso de perfis sobrepostos) ou alterando o comprimento individual de cada harmônica que constitui o perfil da estrutura. A Fig. 3.3 e 3.4 resumem respectivamente, como se opera essas duas técnicas [9].

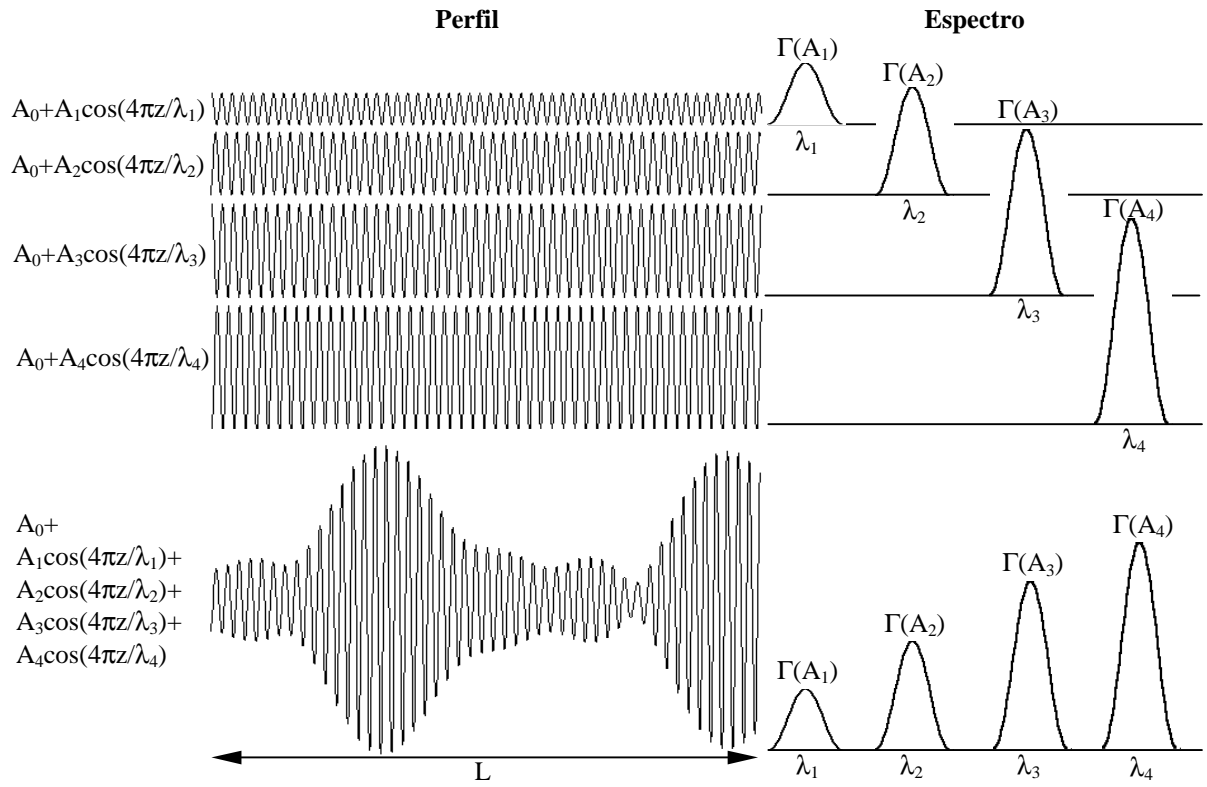


Figura 3.3. Ilustração da síntese de refletores de alta ordem e controle independente da altura dos picos através das amplitudes das harmônicas.

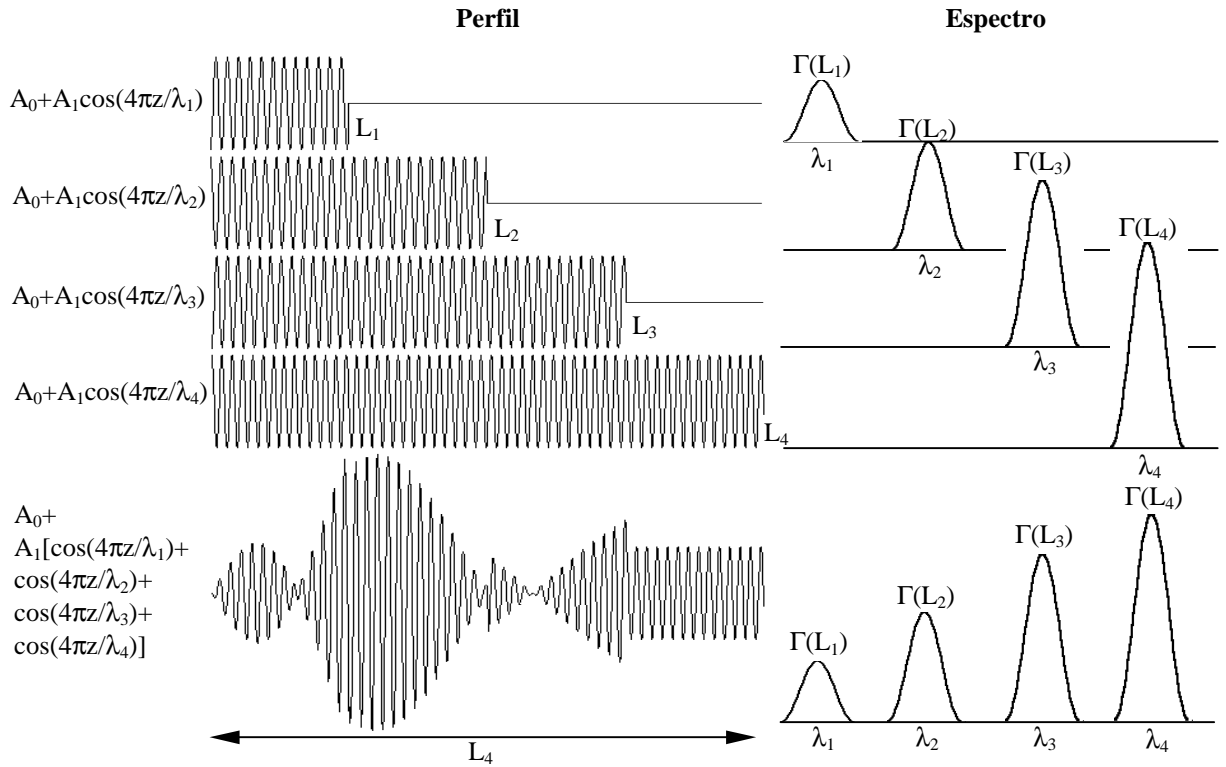


Figura 3.4. Ilustração da síntese de refletores de alta ordem e controle independente da altura dos picos através do comprimento das harmônicas.

Seguindo o fluxograma da Fig. 3.1, a síntese de espelhos com número arbitrário de comprimentos de onda consiste nos seguintes passos:

1. A determinação da solução inicial: Nesta solução todas as harmônicas possuem amplitudes ou comprimentos nulos, o que garante, segundo o que visto no Capítulo 2, a mínima refletividade possível para todos os picos.
2. A avaliação da solução proposta: A solução proposta é construída através das amplitudes ou comprimentos das harmônicas. Caso seja o interesse sintetizar grades de perfil não contínuo, este também é o momento de se executar a aproximação para índices discretos.

Na prática não há como se fazer um perfil dielétrico absolutamente contínuo em uma aplicação computacional. Portanto os perfis sobrepostos são criados como uma seqüência de camadas de espessuras ópticas iguais e suficientemente finas. A escolha de um valor para a espessura discreta máxima deve ser ponderada pelo teorema de Nyquist. Ou seja, o valor da espessura máxima possível é equivalente a metade do menor período utilizado, ou de forma equivalente, a espessura deve ser no máximo de 1/4 do menor comprimento de onda envolvido.

Pelo fato de uma estrutura fracamente amostrada apresentar distorções no espectro de refletividade, na prática deve-se escolher uma espessura discreta razoavelmente menor do que a quarta parte do menor comprimento de onda. Considerando a espessura da camada discreta N vezes menor do que o período que a máxima espessura discreta possível, a expressão para cálculo da espessura física da i -ésima camada discreta pode ser escrita como:

$$\Delta d_i = \frac{\lambda_{min}}{4 \cdot N \cdot n_i \cdot \cos \theta_i}, \quad (3.3)$$

onde λ_{min} é comprimento mínimo, .

Só após a grade ter sido construída a condição de refletividade é testada para todos os comprimentos de onda. O processo de avaliação é baseado no cálculo do erro máximo cuja expressão é dada por:

$$e = \max_{i=1}^k [\Gamma(\lambda_i) - \Gamma_A(\lambda_i)], \quad (3.2)$$

onde $\Gamma(\lambda_i)$ e $\Gamma_A(\lambda_i)$ representam a refletividade desejada (alvo) e a calculada para o *iésimo* comprimento de onda λ_i ; a variável k representa o número de picos desejados; A função *max* retorna o valor máximo dentre o conjunto de k valores. Caso o erro e seja menor ou igual ao erro máximo tolerado o processo de busca chega a seu fim.

3. A modificação: Os valores de amplitude ou comprimento de cada harmônica são progressivamente incrementados ou decrementados de um determinado valor a cada iteração. Esse valor de incremento ou decremento é uma variável que deve ser adaptada à medida que o algoritmo converge. Seu valor é proporcional a diferença entre a refletividade desejada para um dado pico e a refletividade calculada para a mesmo comprimento de onda:

$$\Delta x(\lambda_i) = p \cdot [\Gamma_A(\lambda_i) - \Gamma(\lambda_i)], \quad (3.3)$$

onde o parâmetro p é uma constante de proporcionalidade real positiva.

A seguir são mostrados dois exemplos de projetos de grades de múltiplos comprimentos de onda. O primeiro deles (Fig. 3.5) é um refletor de quatro picos na faixa do espectro visível; todos de refletividade mínima de 0.99. Nesse exemplo foram utilizados índices de refração na faixa de 1.05 até 1.6; o substrato e a cobertura foram considerados o Ar. A Fig. 3.5 mostra ainda uma solução equivalente utilizando uma aproximação de perfil de índices contínuo para perfil descontínuo utilizando os valores de índice de refração 1.05 e 1.3.

O exemplo seguinte (Fig. 3.6) mostra refletores abrangendo da segunda até a terceira janela de comunicações ópticas, com picos de refletividade de amplitudes variadas. Os índices de refração utilizados pertencem a faixa de 2.95 a 3.5; o substrato e a cobertura escolhidos possuem índices iguais a 3.225.

Para ambos os exemplos a metodologia de controle da altura dos picos utilizada foi a baseada na modificação do comprimento individual de cada harmônica, como ilustrado através da Fig. 3.4.

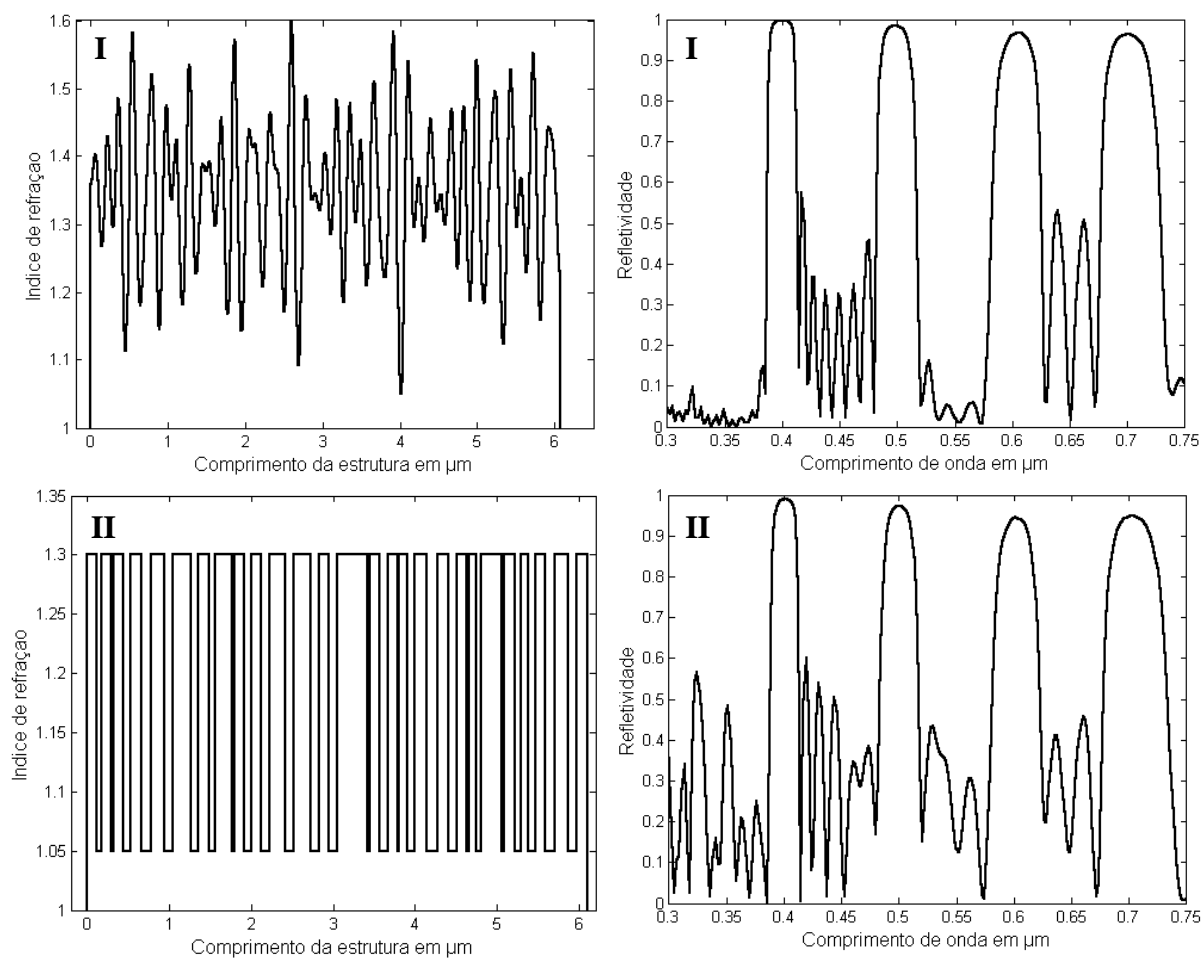


Figura 3.5. Exemplos de curvas de refletividades de espelhos refletor operando em 4 comprimentos de onda. Em **I** o perfil de índices é contínuo e em **II** o perfil é discreto.

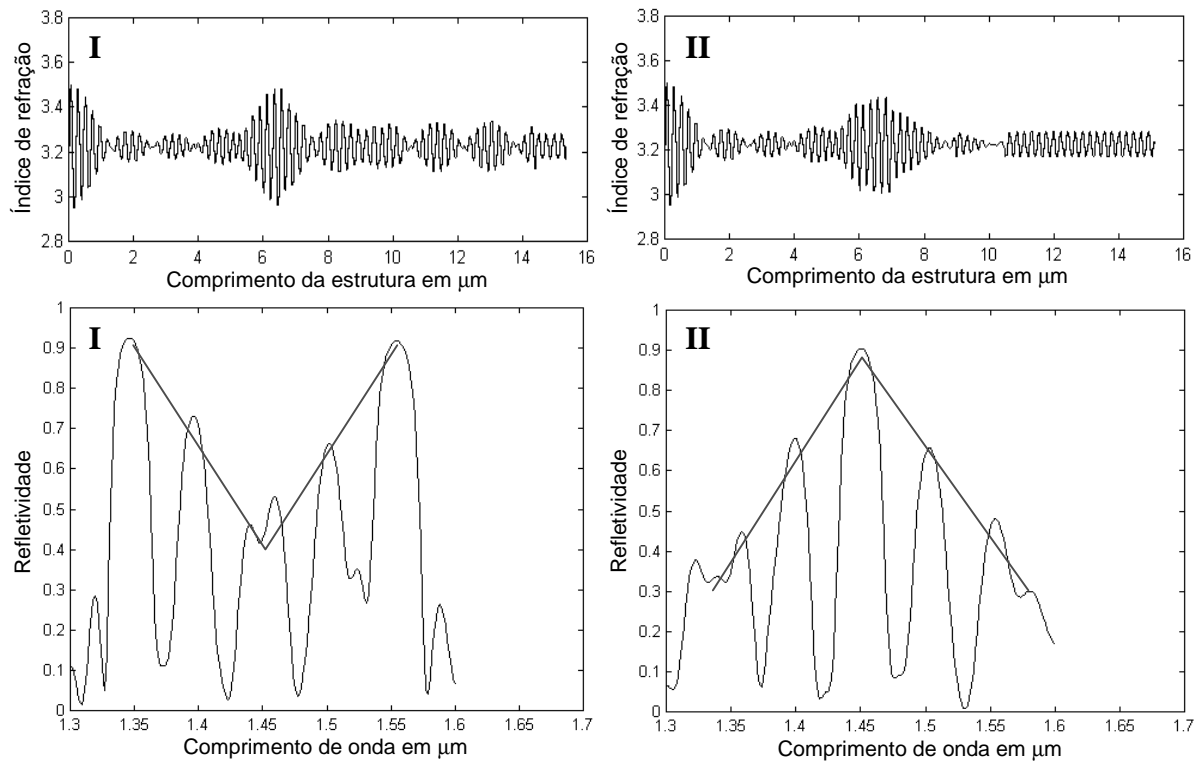


Figura 3.6. Exemplos de curvas de refletividades de espelhos refletor operando em 5 comprimentos de onda. Nos dois exemplos são destacadas as silhuetas especificadas para os valores máximos dos picos de refletividade: em **I** o aspecto de uma calha triangular; em **II** o aspecto de um telhado.

3.4. Síntese de Grades em Faixa Larga utilizando Algoritmos Genéticos

A síntese em faixa larga refere-se ao controle total da refletividade, não se restringindo a “pontos” específicos do espectro, como visto nos outros processos de síntese desse Capítulo.

O exemplo da Fig. 3.6 mostra a base da técnica para síntese em banda larga: criar refletor de alta ordem, com picos próximos uns aos outros o suficiente para que possa formar um espectro contínuo cuja silhueta seja igual ao formato de curva desejada para a síntese. A Fig. 3.7 exhibe com detalhes o processo de “junção” dos picos de refletividade.

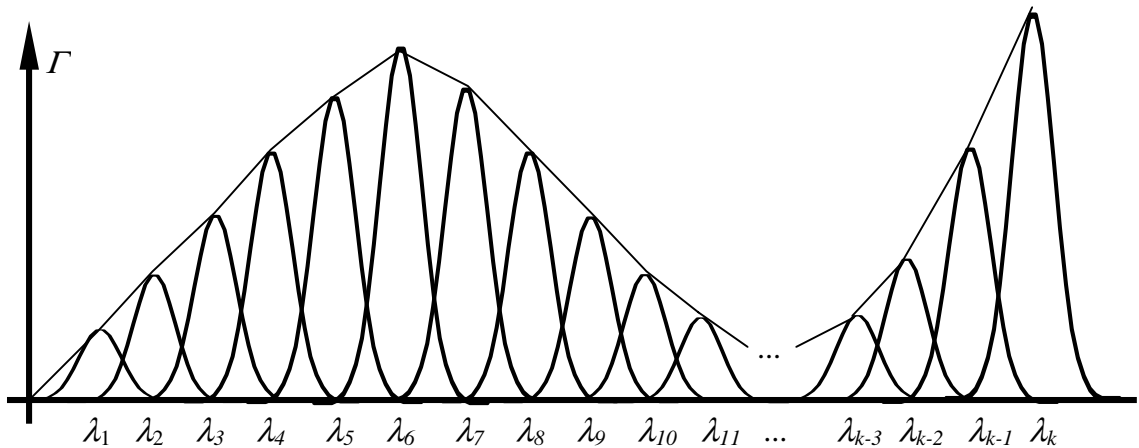


Figura 3.7. Processo de montagem de k picos para a realização de qualquer formato de curva de refletividade.

Tendo em vista o processo de montagem de picos de refletividade ilustrado através da Fig. 3.7 e de acordo com as equações (2.2), (2.3), (2.4) e (2.5), o problema de síntese em banda larga é uma questão de se determinar a combinação ideal dos k valores de A_i ou L_i de forma a obter a resposta espectral adequada. O problema é que, como visto na Fig. 3.5, a resposta espectral relativa a cada harmônica de (2.2) ou (2.4) não é realmente um impulso. Como consequência, cada valor $I(\lambda_i)$ não dependerá apenas de L_i , como afirma a equações (2.5), mas também dependerá paralelamente, aleatoriamente e em menor grau de L_{i-1} , L_{i+1} , L_{i-2} , L_{i+2} , ... Isso significa que métodos tradicionais de busca ou otimização como os apresentados nas seções anteriores (não evolutivos) apresentariam dificuldades de convergência ou simplesmente não seriam tão eficientes como um Algoritmo Genético (AG).

Os AGs são algoritmos de otimização que utilizam o ciclo modificação-avaliação modelado segundo os princípios da Seleção Natural e da Evolução das Espécies. Seu funcionamento estabelece um conjunto de soluções que devem evoluir até que uma delas atinja as características exigidas. Dentre todas as suas características destaca-se a de que eles não trabalham com as soluções exatamente e sim com representações codificadas destas (cromossomos), ou em outras palavras, não precisam conhecer exatamente todas as características das funções relacionadas ao problema para poderem operar a otimização [2][10].

No caso utilizado neste trabalho, cada cromossomo da população representa uma grade com chances de atender as exigências estabelecidas para uma solução. A forma como a grade é representada, isto é, codificada, influencia muito todo o comportamento do AG, determinando desde como os operadores evolutivos (crossover e mutação) devem ser estruturados e aplicados, até definindo a eficiência ou viabilidade do método como um todo.

A forma escolhida para codificação foi a seqüência de valores L_i associados respectivamente a λ_i , de acordo com (2.4) e (2.5). Logo, para se construir a estrutura a partir de um dado cromossomo é preciso sobrepor k harmônicas de períodos $\lambda_i/2$ e comprimento L_i .

Como o interesse é sintetizar grades de filmes finos, o perfil de índice de refração obtido deve ser aproximado de acordo com o processo descrito na seção 2.2.1. Após a construção da grade de acordo com um cromossomo particular, esta pode ser avaliada, ou seja, pode ter sua saúde determinada. Essa tarefa é feita comparando a curva de refletividade, a qual é obtida utilizando a metodologia matricial vista no Capítulo 2, com a curva desejada para a faixa e comprimento de onda estabelecida. O complemento de 1 do erro entre as duas curvas representa a saúde da grade em questão; o erro é calculado de forma que indique a não proximidade das duas curvas em toda a extensão do intervalo de comprimento de onda ao mesmo tempo que registra a máxima diferença entre as curvas. A saúde do cromossomo é calculada através de:

$$S = 1 - \frac{1}{2} \left\{ \max_{i=1}^k [\Gamma(\lambda_i) - \Gamma_A(\lambda_i)] + \frac{1}{k} \sum_{i=1}^k |\Gamma(\lambda_i) - \Gamma_A(\lambda_i)| \right\}, \quad (3.3)$$

onde S representa a saúde, $\Gamma(\lambda_i)$ e $\Gamma_A(\lambda_i)$ são respectivamente a refletividade calculada e a desejada para o comprimento de onda λ_i , para i variando de 1 a k . O valor k representa o número de termos da somatória e também o número de termos do cromossomo da respectiva grade; de seu valor dependerá a densidades de picos dentro da faixa espectral (Fig. 3.7) e, conseqüentemente, a precisão da codificação.

Essa codificação tão singular introduzida acaba por exigir operadores genéticos de crossover e mutação bem adaptados [10]. O operador crossover deve

“misturar” dois cromossomos A e B, de forma a gerar um cromossomo C que apresente similaridades frente aos seus pais. Isso pode ser conseguido construindo C com genes escolhidos de A ou B de acordo com uma probabilidade de 50%. Outra forma seria através de uma interpolação de acordo com um parâmetro aleatório, o qual define o grau de parentesco em relação a A ou a B para cada gene L_i . Este segundo método explora melhor o espaço de soluções e, neste caso em particular, tem mais chances de ser mais bem sucedido. A expressão para o cálculo do valor L_i para o cromossomo C é:

$$L_{Ci} = L_{Ai} + (L_{Bi} - L_{Ai}) \cdot t_C, \quad (3.4)$$

onde t_C é um parâmetro aleatório no intervalo $[0; 1[$ determinado para cada valor de i .

O operador mutação consiste em um desvio estatístico do valor de cada gene L_i . A amplitude de desvio é mais um parâmetro de síntese, porém um valor razoável poderia ser λ_i pois dessa forma há 50% de chance de que o desvio seja ao menos equivalente ao período da i -ésima harmônica, portanto suficientemente expressivo. A expressão utilizada para o cálculo da mutação é dada por:

$$L_{CMi} = L_{Ci} + \lambda_i \cdot (1 - 2t_M), \quad (3.5)$$

onde t_M é um parâmetro aleatório similar ao t_C , pertencente ao intervalo $[0; 1[$ e determinado para cada evento de mutação. O valor L_{CMi} representa o gene final do cromossomo já alterado pelos operados genéticos.

Os eventos de crossover ocorrem a nível de cromossomos, os quais constituem a população; enquanto a mutação ocorre a nível de genes, os quais compõem o cromossomo. Esses dois tipos de eventos são associados respectivamente às probabilidades de crossover (P_C) e de mutação (P_M).