

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ**  
**CENTRO TECNOLÓGICO**  
**CURSO DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA**

**MARCO JOSÉ DE SOUSA**

**SÍNTESE DE GRADES DE BRAGG UTILIZANDO**  
**ALGORITMO GENÉTICO E PROCESSAMENTO**  
**PARALELO**

**TM - \_\_\_\_\_/2003**

**UFPA/CT/PPGEE**  
**CAMPUS UNIVERSITÁRIO DO GUAMÁ**  
**66.075-900 – BELÉM – PARÁ – BRASIL**

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ  
CENTRO TECNOLÓGICO  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA**

**MARCO JOSÉ DE SOUSA**

**SÍNTESE DE GRADES DE BRAGG UTILIZANDO  
ALGORITMO GENÉTICO E PROCESSAMENTO  
PARALELO**

Dissertação submetida à Banca  
Examinadora do Programa de Pós-  
Graduação em Engenharia Elétrica  
da UFPA para a obtenção do Grau  
de Mestre em Engenharia Elétrica.

**UFPA/CT/PPGEE  
CAMPUS UNIVERSITÁRIO DO GUAMÁ  
66075-900 – BELÉM – PARÁ – BRASIL**

## SUMÁRIO

<b>LISTA DE ILUSTRAÇÕES</b>	<b>01</b>
<b>RESUMO</b>	<b>06</b>
<b>ABSTRACT</b>	<b>07</b>
<b>CAPÍTULO 1 – INTRODUÇÃO</b>	<b>08</b>
1.1. Algoritmos Genéticos	08
1.2. A Robustez do AG e dos Métodos de Otimização	08
1.3. Características e Funcionamento do AG	10
1.4. As Grades de Bragg e o Algoritmo Genético	14
1.5. Exemplo Simplificado de um AG para Síntese de Grades de Bragg	17
1.5.1. A Função Objetivo e a Codificação	17
1.5.2. O Processo de Seleção	20
1.5.3. O Operador Cruzamento	21
1.5.4. O Operador Mutação	22
1.5.5. Integração dos Operadores de Seleção, Cruzamento e Mutação e Parâmetros essenciais	23
1.5.6. Desempenho e Resultados Obtidos pelo AG	27
1.6. Proposta de Dissertação	29
1.7. Estrutura da Dissertação	31
<b>CAPÍTULO 2 – ANÁLISE DE GRADES DE BRAGG</b>	<b>32</b>
2.1. A Teoria dos Modos Acoplados e Grades em Fibra	32
2.1.1. As Equações de Modos Acoplados	33
2.1.2. As Grades de Bragg Uniformes e a Formulação Matricial	36
2.2. Análise de Grades de Bragg Utilizando o Modelo de Filmes	41

Finos	
2.3. Grades de Bragg em Fibra Segundo o Modelo de Filmes Finos	46
2.4. Considerações a Cerca da Função Objetivo do AG	48
2.4.1. O Mecanismo de Redução do Número de Amostras (MRA)	49
<b>CAPÍTULO 3 - CODIFICAÇÃO E PARALELIZAÇÃO DE ALGORITMOS GENÉTICOS PARA SÍNTESE DE GRADES</b>	<b>51</b>
3.1. Vantagens da Codificação Real sobre a Codificação Binária	52
3.2. A Codificação para Grades em Fibra	53
3.3. Codificação para Grades de Filmes Finos	54
3.4. Uma Forma de Codificação Alternativa	56
3.5. Paralelização do Algoritmo Genético	62
3.5.1. Algoritmo Genético Paralelo para Síntese de Grades	66
3.5.1.1. Termos Utilizados em Computação Paralela	66
3.5.1.2. Estudo de uma estratégia de paralelização para o AG aplicado à síntese de grades	67
<b>CAPÍTULO 4 - RESULTADOS</b>	<b>71</b>
4.1. Desempenho da Análise de Grades em Fibra	71
4.2. Sobreposição de Grades	77
4.2.1. A Variação das Amplitudes dos Índices de Refração	78
4.2.2. A Variação dos Comprimentos das Grades Componentes	81
4.2.2. A Variação Conjunta dos Comprimentos e da Amplitude dos Índices das Grades Componentes	82
4.3. Algoritmos Genéticos Seriais (Não Paralelos)	83
4.3.1. Codificação Real Baseada no Modelo das Seções Uniformes	84
4.3.1.1. Projeto 1	84
4.3.2. AG Utilizando Codificação Baseada na Sobreposição de Grades e Modelo das Seções Uniformes	89

4.3.2.1. Projeto 2	89
4.3.2.2. Projeto 3	93
4.3.3. AG Utilizando Codificação Real para Síntese de Grades de Filmes Finos	97
4.3.3.1. Projeto 4	97
4.3.4. AG Utilizando Codificação por Sobreposição de Grades para Síntese de Grades de Filmes Finos	100
4.3.4.1. Projeto 5	100
4.3.4.2. Projeto 6	105
4.4. O AG Paralelo	108
4.4.1. Projeto 7	109
4.4.2. Projeto 8	111
4.4.3. Tempos de Processamento e Cálculo do <i>Speedup</i>	113
<b>CAPÍTULO 5 - CONCLUSÃO</b>	<b>116</b>
5.1. Contribuições para Trabalhos Futuros	116
<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS</b>	<b>119</b>

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

### CAPÍTULO 1

- Figura 1.1 – Função objetivo operando como uma caixa preta. Os cromossomos (binários) da população são analisados e sua saúde é armazenada em posições correspondentes. 11
- Figura 1.2 – Diagrama básico do funcionamento de um algoritmo genético. 13
- Figura 1.3 – (a) Geometria de um guia de ondas com uma grade de filmes finos; (b) Perfil de índices de refração. 16
- Figura 1.4 – (a) Corte longitudinal da grade em fibra, com gradiente de tons indicando a variação do índice de refração; (b) Visão de corte transversal mostrando a geometria cilíndrica da fibra; (c) Perfil de índices de refração. 16
- Figura 1.5 – Espaço de buscas para o problema da grade de duas camadas. 19
- Figura 1.6 – Processo de seleção competitivo com torneios de quatro indivíduos. 20
- Figura 1.7 – Região equiprovável para a localização do cromossomo C, resultante da operação de cruzamento entre A e B. 22
- Figura 1.8 – Diagrama de funcionamento de um AG feito através de pseudocódigo. 25
- Figura 1.9 – Espaço de busca como um gráfico de contornos com a solução ótima e vizinhança destacadas. 27
- Figura 1.10 – Situação da população inicial (I), após 100 gerações (II), após 200 gerações (III) e após 300 gerações (IV). 28

## CAPÍTULO 2

- Figura 2.1 – Grade em relação ao eixo  $z$  convencional e os campos de amplitude  $R$  e  $S$  em  $z = 0$  e  $z = L$ . 38
- Figura 2.2 – Representação de uma grade não uniforme modelada em seções. O gradiente de tons representa a variação do índice de refração. 41
- Figura 2.3 – Modelo de guia formado por camadas dielétricas finas semi-infinitas. 42
- Figura 2.4 – Comparação entre um perfil de índices de variação gradual (a) e um perfil aproximado para níveis discretos (b), adequado ao modelo de filmes finos. 47
- Figura 2.5 – Perfil de índices de refração descontínuo. 47

## CAPÍTULO 3

- Figura 3.1 – Quatro perfis de índices uniformes mais um quinto perfil composto por sobreposição (a); Esboço do que seria a resposta espectral dos perfis à esquerda (b). 58
- Figura 3.2 – Curva de refletividade criada pela “condensação” de picos máximo. 60
- Figura 3.3 – Quatro perfis de índices uniformes de comprimentos diferentes mais um quinto perfil composto por sobreposição (a); Esboço do que seria a resposta espectral dos perfis à esquerda (b). 62
- Figura 3.4 – Algoritmo genético paralelo segundo a configuração mestre-escravo. 65
- Figura 3.5 – Algoritmo genético paralelo segundo a configuração distribuída. 65
- Figura 3.6 – Algoritmo genético segundo a configuração em rede. 65
- Figura 3.7 – Diagrama do programa paralelo para a configuração mestre-escravo. 69

## CAPÍTULO 4

- Figura 4.1 – Comparação entre 3 curvas de refletividade obtidas através de duas técnicas de análise diferentes. 73
- Figura 4.2 – Curvas de refletividade para uma grade de perturbação gaussiana do índice de refração. 75
- Figura 4.3 – Curva da variação da amplitude de perturbação do índice de refração em função do comprimento da grade, para o exemplo da Figura 4.2. 76
- Figura 4.4 – Curvas de refletividade de uma grade obtida pela sobreposição de três outras de amplitudes de perturbação iguais. 79
- Figura 4.5 – Curvas de refletividade de uma grade obtida pela sobreposição de três outras de amplitudes de perturbação desiguais e crescentes. 80
- Figura 4.6 – Curvas de refletividade de uma grade obtida pela sobreposição de três outras de mesmas amplitudes, mas de comprimentos desiguais e crescentes. 81
- Figura 4.7 – Curvas de refletividade de uma grade obtida pela sobreposição de três outras de amplitudes desiguais crescentes e comprimentos desiguais decrescentes. 82
- Figura 4.8 – Curvas de refletividade em função do comprimento de onda obtida para o Projeto 1. 86
- Figura 4.9 – Evolução da saúde em função dos números das gerações para o Projeto 1. 87
- Figura 4.10 – Evolução da saúde em função do tempo de processamento para o Projeto 1. 87
- Figura 4.11 – Perfis de  $\Delta n_{ef} \times v$  para as grades 1 e 2 comparadas a um perfil co-seno levantado. 88
- Figura 4.12 – Comparação entre a refletividade da Grade 2 e a refletividade de uma grade de perfil co-seno levantado. 88

Figura 4.13 –	Curva de refletividade em função do comprimento de onda comparada com o alvo.	90
Figura 4.14 –	Evolução da saúde em função do tempo de processamento.	91
Figura 4.15 –	Comprimento de onda de projeto (em metros) para as seções ao longo da grade.	91
Figura 4.16 –	Comparação entre a refletividade da grade obtida para o Projeto 2 e a refletividade de uma grade de perfil co-seno levantado.	92
Figura 4.17 –	Curva de refletividade em função do comprimento de onda comparada com o alvo.	94
Figura 4.18 –	Evolução da saúde em função do tempo de processamento.	95
Figura 4.19 –	Comprimento de onda de projeto para as seções ao longo da grade.	95
Figura 4.20 –	Curva de refletividade em dB para o Projeto 3.	96
Figura 4.21 –	Curvas de refletividade da grade sintetizada, de uma grade de Bragg equivalente e a curva de alvo.	98
Figura 4.22 –	Evolução da saúde em função do tempo de processamento.	98
Figura 4.23 –	Perfil de índice de refração para o Projeto 4.	99
Figura 4.24 –	Curvas de refletividade em dB para a grade sintetizada e para a grade de Bragg equivalente.	99
Figura 4.25 –	Curvas de refletividade da grade do Projeto 5 e de uma grade de Bragg equivalente comparadas à curva alvo.	102
Figura 4.26 –	Evolução da saúde em função do número das gerações para o Projeto 4 e 5.	102
Figura 4.27 –	Evolução da saúde em função do tempo de processamento para o Projeto 4 e 5.	103

- Figura 4.28 – Perfil de índice de refração da grade sintetizada para 103 o Projeto 5.
- Figura 4.29 – Curvas de refletividade para as grades do Projeto 4, 5 104 e de uma grade de Bragg equivalente ao Projeto 5.
- Figura 4.30 – Curva de refletividade para o Projeto 6 e curva de 106 alvo.
- Figura 4.31 – Evolução da saúde em função do tempo de 106 processamento em segundos.
- Figura 4.32 – Perfil de índices de refração para o Projeto 6. 107
- Figura 4.33 – Curva de refletividade para a grade do Projeto 7 110 juntamente com a curva alvo.
- Figura 4.34 – Perfil da variação média do índice de refração em 110 função do comprimento da grade.
- Figura 4.35 – Evolução da saúde em função do número das 111 gerações para o Projeto 7.
- Figura 4.36 – Curva de refletividade para a grade do Projeto 8, 112 juntamente com a curva alvo.
- Figura 4.37 – Perfil da variação média do índice de refração em 112 função do comprimento da grade.
- Figura 4.38 – Evolução da saúde em função do número das 113 gerações para o Projeto 8.
- Figura 4.39 – Comparação entre as curvas de *speedup* média 115 obtida para os projetos 7 e 8 e ideal.

## CAPÍTULO 5

- Figura 5.1 – Componentes diferentes somadas para gerar uma 117 grade sobreposta com diferentes atrasos em 4 comprimentos de onda.

## RESUMO

Este trabalho apresenta um estudo sobre a influência de vários esquemas de codificação no desempenho do Algoritmo Genético aplicado à síntese de grades de Bragg. Uma nova estratégia de codificação, baseada em grades sobrepostas, é proposta e comparada com outras formas de codificação tradicionais já discutidas na literatura. É demonstrado através de exemplos de projetos, que essa nova estratégia de codificação pode melhorar consideravelmente o desempenho e a eficiência da síntese obtida através do Algoritmo Genético.

Também é discutido como a computação paralela pode ser aproveitada para melhorar ainda mais o desempenho do Algoritmo Genético. Adicionalmente a estes temas principais, outras idéias para otimização também são oportunamente apresentadas, discutidas e aplicadas.

**Palavras-chave:** síntese de grades de Bragg, grades de Bragg em fibra, filtros de filmes finos, algoritmo genético, grades sobrepostas.

## ABSTRACT

This work presents a study of the influence of several coding techniques in the performance of the Genetic Algorithm applied to Bragg grating synthesis. A new coding strategy, based on superimposed gratings, is proposed and compared with other traditional coding methods presented in literature. Examples are used to demonstrate that this new coding strategy improve the performance and the efficiency of the Bragg grating synthesis by Genetic Algorithm.

It is also discussed as the parallel computation may be used to improve the performance of this Genetic Algorithm. In addition, other ideas for optimization are presented, discussed, and applied.

**Key-words:** Bragg grating synthesis, fiber Bragg grating, thin films filters, genetic algorithm, superimposed gratings.

# **CAPÍTULO 1: INTRODUÇÃO**

## **1.1. ALGORITMOS GENÉTICOS**

O algoritmo genético (AG) pode ser definido como um método de busca cuja operação simula o processo evolutivo imposto aos seres vivos pela natureza [1][2].

Os algoritmos genéticos foram desenvolvidos por Jonh Holland e sua equipe na Universidade de Michigan. O ponto central de sua pesquisa sobre algoritmos genéticos foi a robustez, que é o equilíbrio entre a eficiência e a eficácia necessária para garantir a sobrevivência de indivíduos em ambientes muito diversificados. Foi Holland quem escreveu a primeira monografia sobre o assunto em 1975 e, a partir de então, muitas outras publicações e dissertações subseqüentes sobrevieram, comprovando a validade do AG aplicado à otimização [2]. Atualmente o AG encontra larga aplicação nas mais variadas áreas do conhecimento humano: matemática pura, engenharias, medicina, biologia e até mesmo no mercado financeiro. A razão para o crescente número de aplicações é simples: o AG consegue conciliar simplicidade e eficiência. Isso principalmente por não ser afetado pelas características do espaço de buscas, tais como descontinuidades, a existência ou não de derivadas, a existência de muitos máximos e mínimos locais, ou mesmo a total aleatoriedade do espaço de soluções. As razões para a existência dessas características tão atrativas do AG serão mostradas no decorrer das próximas seções.

## **1.2. A ROBUSTEZ DOS MÉTODOS DE OTIMIZAÇÃO CLÁSSICOS E DO AG**

A literatura atual acusa a existência de três principais tipos de métodos de otimização: os baseados em cálculo, os enumerativos e os aleatórios [2].

Os métodos baseados em cálculo têm sido alvos de intensivos estudos e subdividem-se em duas principais classes: os métodos indiretos e os métodos diretos. Os indiretos procuram o máximo local normalmente através da solução

de um conjunto de equações não-lineares, resultantes da condição de gradiente nulo. Os métodos diretos estimam a posição da suposta solução ótima a partir do gradiente de um ponto local analisado. Caso o ponto ótimo suposto não seja adequado, o gradiente é calculado em relação ao novo ponto e a operação se repete. Tanto o método indireto quanto o direto foram e provavelmente serão alvo de estudos e melhorias, porém estes serão sempre métodos carentes de robustez devido a algumas razões bastante simples [2].

Em primeiro lugar, ambos os métodos são locais, haja vista operarem apenas com a vizinhança do ponto atual. Uma vez atraído para um ponto máximo local, o método baseado em cálculo normalmente não possui artifícios para escapar e detectar pontos extremos melhores. Em segundo lugar, os métodos indiretos e diretos geralmente dependem da existência de derivadas, as quais, conforme o tipo de espaço de buscas, podem ser difíceis de calcular ou simplesmente não existir [2].

Já os métodos enumerativos assumem várias cores e formas, porém seu funcionamento é basicamente o mesmo: dentro de um espaço de buscas limitado, o método observa o valor da função objetivo em um ponto de cada vez. Embora essa técnica seja simples, obviamente os espaços de busca reais podem assumir proporções tais a ponto dos métodos enumerativos tornarem-se ineficientes e freqüentemente inaplicáveis [2].

Os métodos de busca aleatórios têm obtido crescente popularidade devida, justamente, ao seu melhor desempenho frente aos algoritmos enumerativos. Porém, é preciso distinguir muito bem os métodos puramente aleatórios dos esquemas que utilizam processos estocásticos para guiar a busca. Os algoritmos genéticos e o *Simulated Annealing* são exemplos de métodos que utilizam escolhas aleatórias ou processos estocásticos; enquanto os algoritmos de passo aleatório (*random Walk*) podem ser considerados verdadeiros representantes dos métodos de busca puramente aleatórios [1][2].

Os métodos enumerativos e aleatórios formam uma vertente de técnicas globais, que surgiram naturalmente quase como uma forma de reação aos clássicos métodos locais baseados em cálculo. Mesmo assim, é fato que todos

estes métodos citados em muitos casos não são suficientemente eficientes na busca de soluções globais e carecem de robustez, a menos, é claro, que sejam combinados adequadamente, tendo em vista a solução de algum problema específico. Entretanto, os algoritmos genéticos conseguem atender, genericamente e notoriamente quesitos de globalidade, eficiência e robustez, mesmo sem qualquer combinação com outros métodos de busca. Pode-se dizer que o AG pertence a um “quarto tipo” mais recente de algoritmos, resultantes da observação dos processos de busca existentes na natureza [1][2].

### 1.3. CARACTERÍSTICAS E FUNCIONAMENTO DO AG

O AG possui características muito particulares que o distingue muito bem dos métodos clássicos de busca:

- O AG não opera diretamente sobre os parâmetros do problema, mas sobre seu conjunto codificado;
- O AG utiliza uma população de pontos de busca, ao invés de apenas um ponto como nos métodos tradicionais;
- O AG utiliza apenas a função objetivo como informação de busca, dispensando quaisquer outros artifícios matemáticos como, por exemplo, o uso de derivadas;
- No seu funcionamento, o AG utiliza fundamentalmente mecanismos probabilísticos, ao invés de mecanismos determinísticos.

O AG manipula o problema em questão de forma indireta, já que apenas a função objetivo tem acesso formal aos parâmetros que especificam o problema. Normalmente, em suas operações, manipula todos os parâmetros codificados na forma de uma seqüência denominada *cromossomo* (uma alusão aos cromossomos reais, os quais são de fato uma codificação quaternária encontrada em todos os seres vivos). Não há uma norma rígida de como deve ser feita a codificação dos parâmetros na forma de cromossomos e a literatura

acusa várias formas vantajosas de fazê-lo [2]. Um cromossomo poderia ser, por exemplo, a seqüência íntegra de todos parâmetros envolvidos no problema. É necessário apenas garantir que os cromossomos possam ser decodificados e que os parâmetros neles contidos possam ser recuperados, apenas no momento oportuno da aplicação da função objetivo. Assim, o problema é de fato materializado no interior da função objetivo, a qual deve gerar uma qualificação para o cromossomo, isto é, uma nota, um número tanto maior quanto mais otimizada for a solução representada pelo cromossomo em questão.

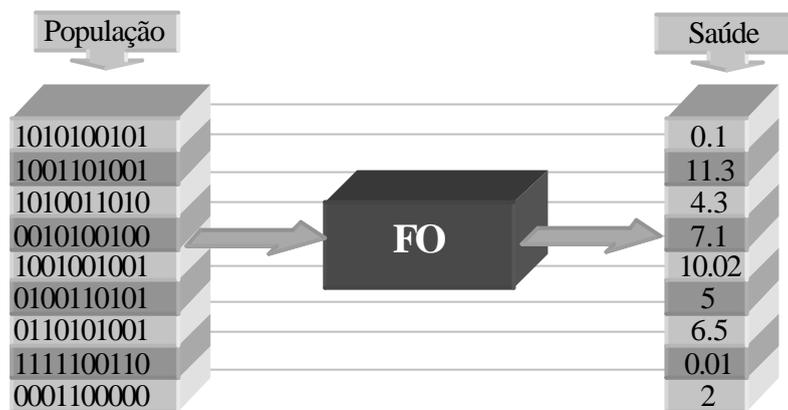


Figura 1.1: Função objetivo operando como uma caixa preta. Os cromossomos (binários) da população são analisados e sua saúde é armazenada em posições correspondentes.

Para o AG, a função objetivo (FO) é algo como uma caixa preta, como mostrado na figura 1.1. Fora as particularidades da FO, pois que cada tipo de problema utiliza uma função diferente, o AG segue sempre um mesmo padrão de funcionamento. Primeiro, uma população de cromossomos é gerada normalmente de forma aleatória. Em seguida, cada cromossomo (indivíduo) é apresentado à FO para avaliação e cada nota obtida é armazenada e mantida associada ao seu respectivo cromossomo. A qualificação dos cromossomos, também chamada de saúde (daí a FO ser freqüentemente chamada de função saúde), é a informação essencial para o processo de seleção. Este processo, tal como ocorre na natureza, deve eliminar os indivíduos menos qualificados em favor dos mais aptos. Evidentemente esta operação é estatística, pois não se

deve eliminar absolutamente os piores indivíduos, haja vista possivelmente possuírem alguma carga genética útil. Assim, uma nova população é criada com indivíduos selecionados da população anterior. A próxima etapa consiste na aplicação dos operadores genéticos sobre a nova população de cromossomos [1][2].

Os dois operadores genéticos empregados são o cruzamento (*crossover*) e a mutação. O cruzamento é um operador probabilístico que trabalha “misturando” dois indivíduos (cromossomos pais) aleatoriamente selecionados da nova população. O modo como é feita essa mistura é bem variada e depende muito da codificação. O ideal é que o cruzamento resulte em indivíduos filhos que conservem semelhanças com os pais, a moldes como ocorre na natureza, porém, explorando novos espaços ainda inexplorados pela população anterior. O outro operador genético probabilístico, a mutação, funciona alterando levemente e eventualmente os cromossomos. Diferente do cruzamento, a mutação ocorre geralmente com uma probabilidade muito menor e permite explorar lugares muito próximos dos explorados pelos cromossomos originais. Este operador também é capaz de trazer alguma inovação à carga genética ou simplesmente repará-la, pois dependendo do modo como o operador cruzamento é implementado, é possível que provoque perdas de importantes informações genéticas ao longo da evolução do algoritmo. Em muitos casos, o operador mutação é o único artifício disponível para recuperar tais perdas [1][2].

Seleção, cruzamento e mutação: estas operações simples combinadas no AG são capazes de fazer deste um método de otimização extremamente robusto. Provas matemáticas de que os algoritmos genéticos realmente são capazes de operar otimizações, pois que a média da saúde da população tende sempre a melhorar com o passar das gerações, podem ser encontradas em [1] e [2]. A Figura 1.2 mostra um fluxograma esquematizando como todas estas operações podem ser reunidas em um AG.

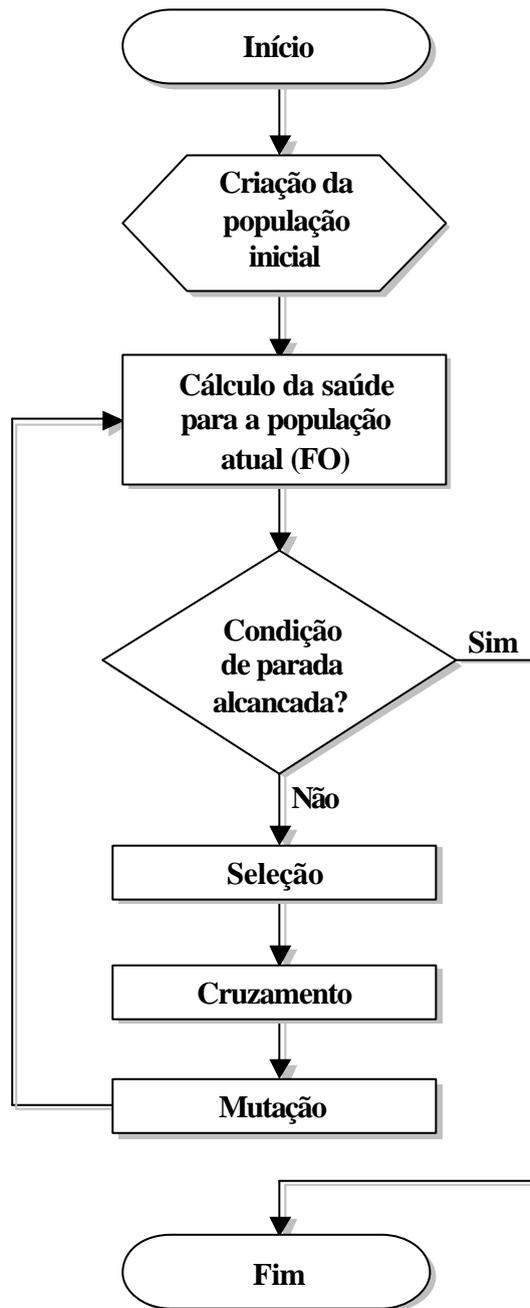


Figura 1.2: Diagrama básico do funcionamento de um algoritmo genético.

#### 1.4. AS GRADES DE BRAGG E OS ALGORITMOS GENÉTICOS

Os filtros ópticos baseados em grades de Bragg consistem normalmente em guias dielétricos cujo índice de refração varia ao longo de sua estrutura. Essa variação proporciona às grades características especiais de reflexão e transmissão da luz e, por estas características, as grades apresentam uma variada aplicabilidade. Nas comunicações ópticas, em fibras, são aplicadas como filtros rejeita-faixa ou passa-faixa, compensadores de dispersão, etc. Em dispositivos, podem ser encontradas integrando, por exemplo, lasers e acopladores. Podem ser utilizadas como filtros anti-refletores ou refletores, em equipamentos ópticos variados. Podem também integrar sensores ópticos físico-químicos, o que estende sua aplicação para indústria, medicina e até meteorologia [1].

As grades definidas pela variação do índice de refração podem ser divididas em duas principais classes: as **grades fortes**, freqüentemente construídas com filmes finos, e as **grades fracas**, normalmente impressas em fibra óptica. As Figuras 1.3 e 1.4 mostram respectivamente as grades em filmes finos e em fibra óptica. Embora os dois tipos de construção de grades sejam diferentes, o modelo de camadas pode ser aproveitado para os dois casos.

Uma grade pode ser qualificada como forte quando a amplitude da perturbação do índice de refração no seu interior supera  $10^{-3}$ . Conseqüentemente, esse tipo de grade apresenta níveis de refletividade elevados, mesmo tendo um comprimento da ordem de alguns micrometros. Isso implica em fraca seletividade e uma banda potencialmente muito larga. Essas características permitem, por exemplo, sua aplicação em dispositivos ópticos que operem em toda a faixa do visível. Suas reduzidas dimensões permitem serem construídas na superfície de lentes, ou integradas em dispositivos muito compactos [3][4].

Por outro lado, uma grade pode ser qualificada como fraca quando a amplitude da perturbação no seu interior é inferior a  $10^{-3}$ . Pelo fato da

refletividade deste tipo de grade ser considerável apenas quando possuem comprimentos da ordem de milímetros, sua seletividade acaba sendo suficientemente elevada e sua banda suficientemente estreita a ponto de poderem ser aplicadas, por exemplo, em sistemas ópticos multiplexados em comprimento de onda (WDM) [3][4].

Sendo as grades estruturas tão bem empregadas e úteis, cedo ganharam a atenção dos pesquisadores. De fato, são várias as técnicas desenvolvidas ou adaptadas para simulação e análise das grades de Bragg, tanto as grades feitas em fibras quanto as de filmes finos. Dentre as principais técnicas encontradas na literatura e tradicionalmente utilizadas, destacam-se a solução das equações de modo acoplado e os métodos matriciais. Tais técnicas são em geral muito precisas, obtendo resultados numéricos bem próximos dos obtidos experimentalmente.

Embora sejam relativamente fáceis de analisar (obter o espectro de reflexão ou transmissão), o mesmo não se pode dizer de sua síntese. É bem verdade que existem muitas técnicas simples para projeto de grades com espectros de refletividade específicos, porém é reduzido o número de técnicas de síntese gerais, capazes de obter projetos de grades para espectros de refletividade variados. Além disso, independente do método convencional utilizado, é raro uma grade sintetizada não precisar de otimizações adicionais para adequar o projeto obtido à realidade das técnicas de fabricação disponíveis.

De fato, a síntese de grades, quando encarada como um problema busca, revela espaços de pesquisa extremamente complexos e repletos de máximos e mínimos locais. Por isso, a síntese de grades é um problema adequado para a aplicação dos algoritmos genéticos. O alvo das otimizações é freqüentemente o espectro do coeficiente de reflexão ou transmissão. Assim, por exemplo, pode-se fazer das grades filtros de banda bem ajustada, conforme as necessidades de uma aplicação qualquer. Como o AG tem características que permite agregar novos parâmetros e restrições facilmente, o resultado final pode ser já adequado aos processos de fabricação vigentes. Na verdade, os algoritmos genéticos são

ainda mais flexíveis: o custo total da grade a ser sintetizada pode ser incorporado nos cálculos da FO. Então, a solução final obtida pelo AG pode ser ótima em vários aspectos simultaneamente, inclusive no aspecto econômico [1].

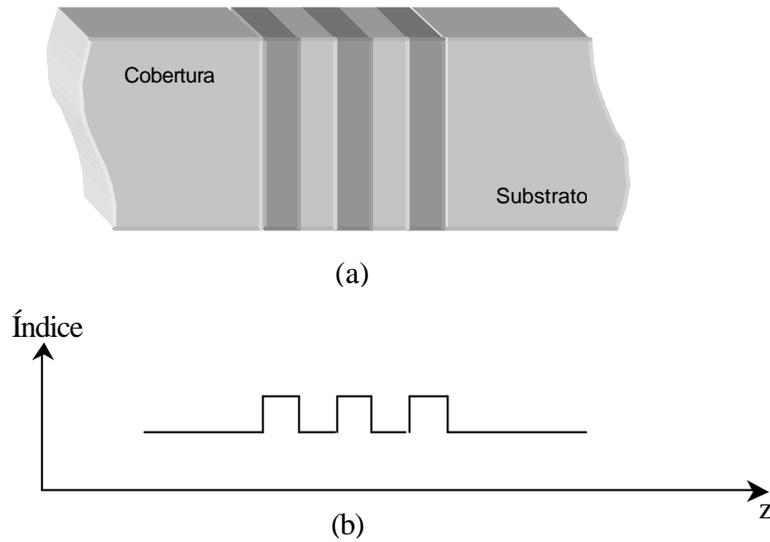


Figura 1.3: (a) Geometria de um guia de ondas com uma grade de filmes finos; (b) Perfil de índices de refração.

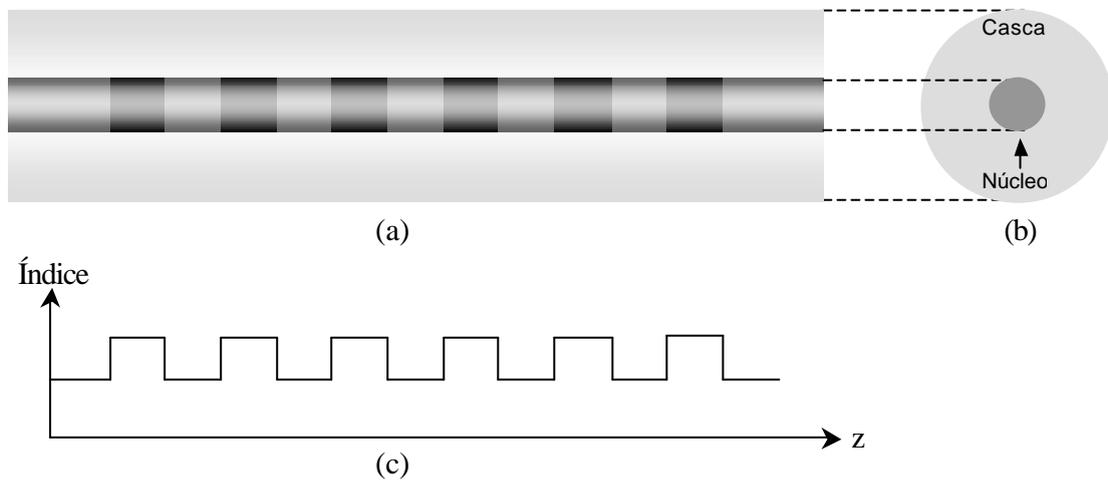


Figura 1.4: (a) Corte longitudinal da grade em fibra, com gradiente de tons indicando a variação do índice de refração; (b) Visão de corte transversal mostrando a geometria cilíndrica da fibra; (c) Perfil de índices de refração.

## 1.5. EXEMPLO SIMPLIFICADO DE UM AG PARA SÍNTESE DE GRADES DE BRAGG

Como exemplo, será mostrado nesta seção um pequeno projeto de AG para síntese de grades de filmes finos (Figura 1.3). A grade final deverá possuir apenas duas camadas, além do substrato e da cobertura, como mostrado na Tabela 1.1:

Tabela 1.1: Especificação da grade proposta

Camada	Índice de refração	Espessura
Cobertura	1.45	–
Camada 1	1.2	De 50 nm a 1 $\mu\text{m}$
Camada 2	2.2	De 50 nm a 1 $\mu\text{m}$
Substrato	1.45	–

Deseja-se otimizar o espectro de refletividade, de forma a fazer com que a grade comporte-se como um espelho apenas no intervalo de comprimento de onda de 0.5 a 0.55  $\mu\text{m}$ . Fora dessa faixa e numa vizinhança que vai de 0.4 a 0.65  $\mu\text{m}$ , deseja-se que a grade seja transparente, transmitindo toda a luz incidente. Considera-se que os materiais fictícios utilizados na grade não variem seu índice de refração consideravelmente dentro desse intervalo de comprimentos de onda.

Com os materiais definidos, as únicas variáveis existentes são as espessuras das camadas 1 e 2, as quais podem apresentar quaisquer valores, desde que sejam dentro do intervalo especificado na Tabela 1.1. Assim, o problema consiste em descobrir quais as espessuras mais adequadas para as camadas.

### 1.5.1. A Função Objetivo e a Codificação

A forma de codificação escolhida é a real [5][7], com os cromossomos consistindo em vetores bidimensionais contendo as espessuras das camadas 1

e 2 [1][2]. Para cada cromossomo, a Função Objetivo extrairá as espessuras e analisará a estrutura resultante utilizando um método matricial, cujo o funcionamento será ignorado por enquanto. A FO pode ser considerada como um operador de comparação, cuja finalidade é gerar um número tanto maior quanto for a semelhança entre a curva de refletividade do indivíduo e a curva desejada expressa através de intervalos (máxima para 0.5 a 0.55  $\mu\text{m}$  e mínima para outros valores). Assim, o valor de saúde será definido como o inverso do erro médio quadrático, calculado através de [1][6]:

$$S = \frac{N}{\sum_{i=1}^N [R(I, x_1, x_2) - r(I)]^2}, \quad (1.1)$$

Com

$$I = I_{\min} + (I_{\max} - I_{\min}) \frac{i-1}{N-1}, \quad (1.2)$$

onde:

$N$  é o número de pontos utilizados para a definir a curva de refletividade;

$R(I, x_1, x_2)$  é a refletividade da grade em função do comprimento de onda ( $I$ ), da espessura da camada 1 ( $x_1$ ) e da camada 2 ( $x_2$ );

$r(I)$  é a refletividade desejada para o comprimento de onda  $I$ . Especificamente, para o problema em questão:  $r(I) = 1$  para  $0.5 \mu\text{m} \leq I \leq 0.55 \mu\text{m}$  e  $r(I) = 0$ , caso contrário;

$I_{\min}$  e  $I_{\max}$  são respectivamente o comprimento de onda mínimo e máximo que definem o intervalo no qual a curva de refletividade é levantada.

Substituindo (1.2) em (1.1) obtém-se a função objetivo do problema, que pode ser expressa de forma simplificada como:

$$S = F(x_1, x_2) \text{ ou } S = F(\mathbf{X}), \quad (1.3)$$

onde  $\mathbf{X} = \{ x_1, x_2 \}$  é um cromossomo,  $x_1$  e  $x_2$  são respectivamente as espessuras das camadas 1 e 2 (Tabela 1).

Uma boa amostragem da curva de refletividade pode ser conseguida fazendo  $N = 500$  [1]. Além disso, de acordo com as especificações da refletividade desejada para a grade,  $I_{\min} = 0.4 \mu\text{m}$  e  $I_{\max} = 0.65 \mu\text{m}$ . Substituindo estes valores em (1.1) e (1.2) e variando as espessuras das camadas em (1.3) de acordo com os intervalos definidos na Tabela 1, é possível gerar um gráfico de  $S$  em função de  $x_1$  e  $x_2$ . Esse gráfico em três dimensões, mostrado na Figura 1.5, representa nada mais do que o próprio espaço de busca para o problema em questão.

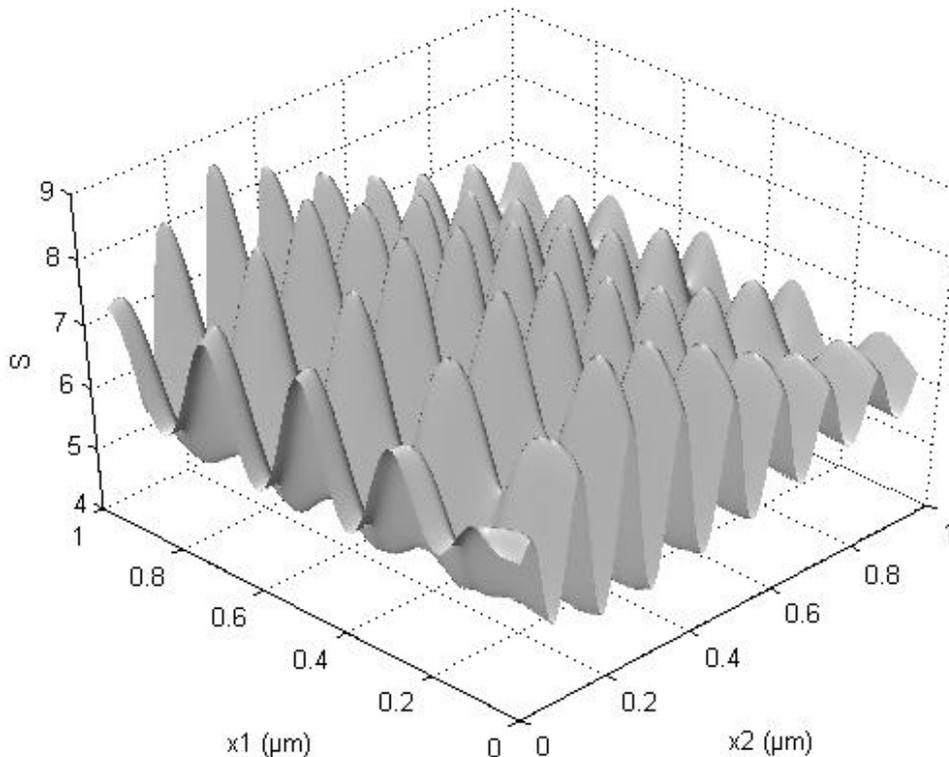


Figura 1.5: Espaço de buscas para o problema da grade de duas camadas.

Constata-se claramente, através da Figura 1.5, a complexidade do espaço de buscas, mesmo este problema de síntese de grade sendo tão

simples. Normalmente os problemas práticos possuem até centenas de parâmetros a serem otimizados; cada parâmetro significando uma dimensão para o vetor cromossomo. Nestes casos, evidentemente o espaço de buscas não poderia ser observado através de um gráfico, como feito na Figura 1.5.

### 1.5.2. O Processo de Seleção

Para este exemplo será utilizado o método de seleção competitiva [1][2]. Esse método funciona selecionando o melhor indivíduo de um subconjunto aleatório, como mostrado na Figura 1.6.

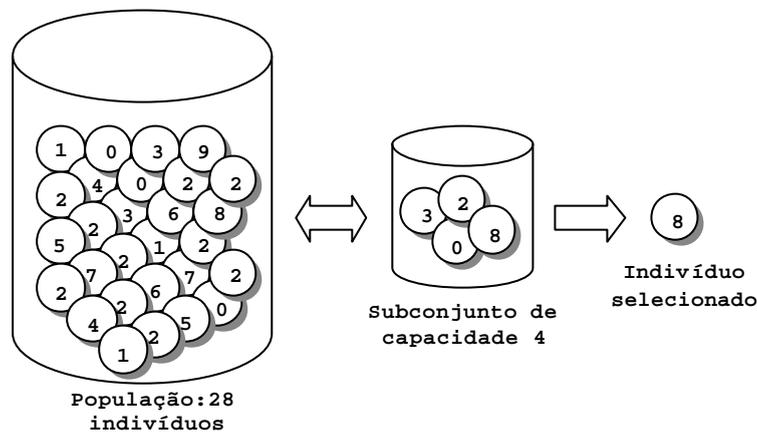


Figura 1.6: Processo de seleção competitivo com torneios de quatro indivíduos.

O processo de seleção escolhe aleatoriamente uma certa quantidade de indivíduos formando um subconjunto da população original. O indivíduo selecionado será a cópia daquele que possuir a maior saúde dentre todos os outros que constituem o subconjunto. Após a seleção, o subconjunto é reincorporado à população original. Quanto maior o subconjunto utilizado no procedimento, mais representativo será em relação à população e, conseqüentemente, maiores serão as chances do indivíduo selecionado ser exatamente o melhor indivíduo da população. Isso significa que quanto maior for o subconjunto para a competição, provavelmente maior será a média da saúde da população seguinte.

### 1.5.3. O Operador Cruzamento

Para o tipo de codificação utilizada, cruzamento significa “misturar” dois vetores bidimensionais gerando um terceiro vetor com características similares aos vetores originais, porém explorando novos espaços. Isso pode ser conseguido através de uma interpolação parametrizada por valores aleatórios [5][2]. A expressão que descreve o operador de cruzamento pode ser generalizada para cromossomos de quaisquer dimensões:

$$\mathbf{C} = \mathbf{A} + (\mathbf{B} - \mathbf{A}) \cdot \mathbf{V}, \quad (1.4)$$

onde:

$\mathbf{C}$  é o vetor cromossomo resultante (filho) da operação cruzamento;

$\mathbf{A}$  e  $\mathbf{B}$  são os vetores cromossomos progenitores;

$\mathbf{V}$  é um vetor com as mesmas dimensões de  $\mathbf{A}$ ,  $\mathbf{B}$  e  $\mathbf{C}$ , constituído de variáveis aleatórias de densidade de probabilidade uniforme dentro apenas do intervalo  $[0; 1]$ ;

O produto entre os fatores  $(\mathbf{B} - \mathbf{A})$  e  $\mathbf{V}$  consiste de um produto escalar.

Para o caso específico de cromossomos bidimensionais, é possível fazer uma interpretação geométrica do procedimento descrito por (1.4). A Figura 1.7 mostra que para o cruzamento entre  $\mathbf{A}$  e  $\mathbf{B}$ . O resultado  $\mathbf{C}$  se localizará em qualquer ponto da região hachuriada:

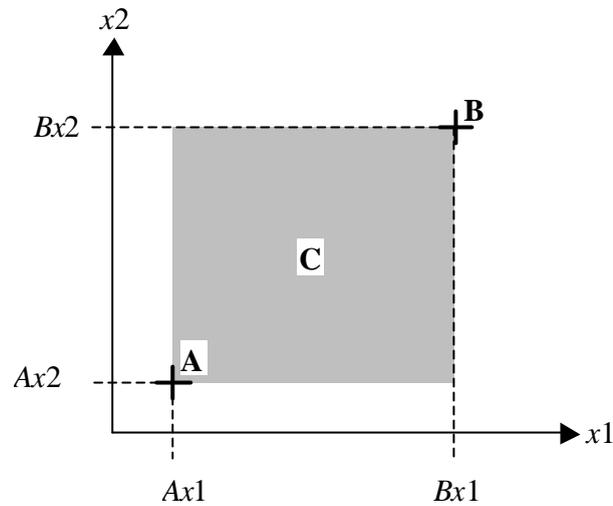


Figura 1.7: Região equiprovável para a localização do cromossomo C, resultante da operação de cruzamento entre A e B.

#### 1.5.4. O Operador Mutação

A mutação, para um cromossomo representado por um vetor real, pode ser feita mediante um pequeno desvio aleatório de cada uma de suas componentes. Esse desvio consiste em variáveis aleatórias de média nula somadas a cada componente do vetor cromossomo. Considerando que os desvios sejam gaussianos, a equação vetorial que descreve o operador mutação pode ser escrita como [8]:

$$\mathbf{C}' = \mathbf{C} + \mathbf{N}(s), \quad (1.5)$$

onde  $\mathbf{C}'$  é o cromossomo resultante do processo de mutação,  $\mathbf{C}$  é o cromossomo original e  $\mathbf{N}(s)$  é um operador que retorna um vetor de mesmo número de elementos que  $\mathbf{C}'$  e  $\mathbf{C}$ , mas formado por variáveis aleatórias de distribuição gaussiana e média nula. O parâmetro  $s$  representa o desvio padrão da distribuição, cujo valor depende fortemente do intervalo possível para cada

componente do vetor  $C$ . Para este exemplo, um desvio padrão de 1% implicaria, em  $s = 0.0095 \mu\text{m}$ , de acordo com a Tabela 1.

Por sorte, para este exemplo, o intervalo tolerado para cada componente do cromossomo,  $x_1$  e  $x_2$ , é o mesmo. Entretanto, a maioria dos problemas combina uma série de parâmetros muito diferentes com tolerâncias e intervalos também diferentes. Nesse caso, para que seja possível utilizar apenas um valor de desvio padrão, tradicionalmente utiliza-se vetores-cromossomo com componentes normalizadas e restritas ao intervalo  $[0; 1]$ .

De acordo com a equação (1.5), nada impede  $C'$  de possuir alguma componente que extrapole os limites dos intervalos, estejam as componentes de  $C$  normalizados ou não. Por exemplo, caso  $x_1$  seja sobre o limite superior de  $1 \mu\text{m}$  ou sobre o seu limite inferior de  $0.05 \mu\text{m}$ , há 50 % de chance do desvio imposto por  $N(s)$  fazer com que  $x_1$  viole estas restrições. Existem basicamente duas formas de corrigir essas eventuais irregularidades: a primeira, mais difícil e por isso não utilizada neste exemplo, seria a utilização de penalidades [8]. A outra maneira, mais simples e por isso utilizada neste exemplo, consiste em mover de forma determinística as componentes que extrapolaram suas restrições. Por exemplo, se  $x_1$  de  $C'$  ficasse abaixo do limite inferior  $0.05 \mu\text{m}$ , o valor de  $x_1$  seria corrigido para exatamente o limite inferior, isto é,  $0.05 \mu\text{m}$ . Caso ficasse acima do limite superior  $1 \mu\text{m}$ , seria corrigido de volta para o limite superior de  $1 \mu\text{m}$ .

#### **1.5.5. Integração dos Operadores de Seleção, Cruzamento e Mutação e Parâmetros essenciais.**

Algumas características importantes do AG não são visíveis apenas através das discussões isoladas sobre seus operadores. É preciso mostrar como estes interagem uns sobre os outros e sobre a população.

Com ajuda do diagrama da Figura 1.8, percebe-se que o AG consiste de um laço de iterações, dentro do qual os procedimentos de seleção, cruzamento e mutação são acionados para gerar cada indivíduo da nova população (variável

**NovaPopulação**), a partir da população atual (variável **População**). O número de indivíduos da população atual e nova é o mesmo para este exemplo, sendo representado, no diagrama da Figura 1.8 pela variável  $K_p$ .

A princípio a variável **População** é iniciada com cromossomos aleatórios. Em seguida o laço das gerações é iniciado. Dentro deste laço, a primeira coisa a ser feita é a avaliação de **População** através da função saúde (função  $FO$ ). A saúde calculada para cada cromossomo é armazenada no vetor **Saúde**. A próxima ação do AG consiste na chamada do procedimento *Melhor*, o qual retorna o melhor indivíduo da **População**, que é colocado na primeira posição de **NovaPopulação**. Portanto, o AG utilizado é elitista [2].

Após a avaliação de **População** e a seleção do melhor indivíduo, começa o laço para o preenchimento das posições de **NovaPopulação**, a partir da posição 2 pois a posição 1 já fora preenchida com o melhor indivíduo de **População**. Todos os novos indivíduos são criados através de operações de cruzamento e mutação, realizadas sobre indivíduos de **População** obtidos através do procedimento *Seleção*. Esse procedimento executa a seleção competitiva, tal como definida na seção 1.4.2. O operador de seleção é o único operador que interage diretamente com a população atual.

A seleção pode acontecer uma ou duas vezes para cada elemento da nova população, dependendo da ocorrência ou não do operador cruzamento. Sendo um operador probabilístico, o cruzamento é um evento associado a uma probabilidade  $P_C$ . Essa eventualidade é garantida pela variável aleatória  $X$ , cuja função densidade de probabilidade é constante entre 0 e 1. Assim, quando  $X$  é menor que  $P_C$ , o cruzamento deverá ocorrer e o procedimento de seleção é executado duas vezes a fim de obter os cromossomos paternos **A** e **B**. O resultado do cruzamento entre estes dois cromossomos é copiado para **C**. Caso o cruzamento não ocorra, **C** será fruto de uma seleção simples.

Semelhante ao cruzamento, o operador mutação ocorre associado a uma probabilidade  $P_M$ . Caso ocorra, o resultado da etapa anterior, o cromossomo **C**, sofrerá um desvio aleatório como descrito em (1.5), resultando em **C'**. Caso a mutação não ocorra, **C'** será uma cópia de **C**.

Assim, o resultado de todos os operadores combinados é o cromossomo  $C'$ , o qual constituirá a população seguinte juntamente com outros cromossomos obtidos da mesma forma. Ao final de cada iteração do AG, a nova população toma o lugar da população atual. A geração, isto é, o ciclo formado pelos mecanismos de avaliação, seleção, cruzamento e mutação, poderão repetir-se novamente até que a saúde dos indivíduos da população não melhore mais ou, simplesmente, até que o número de gerações alcance o limite estipulado.

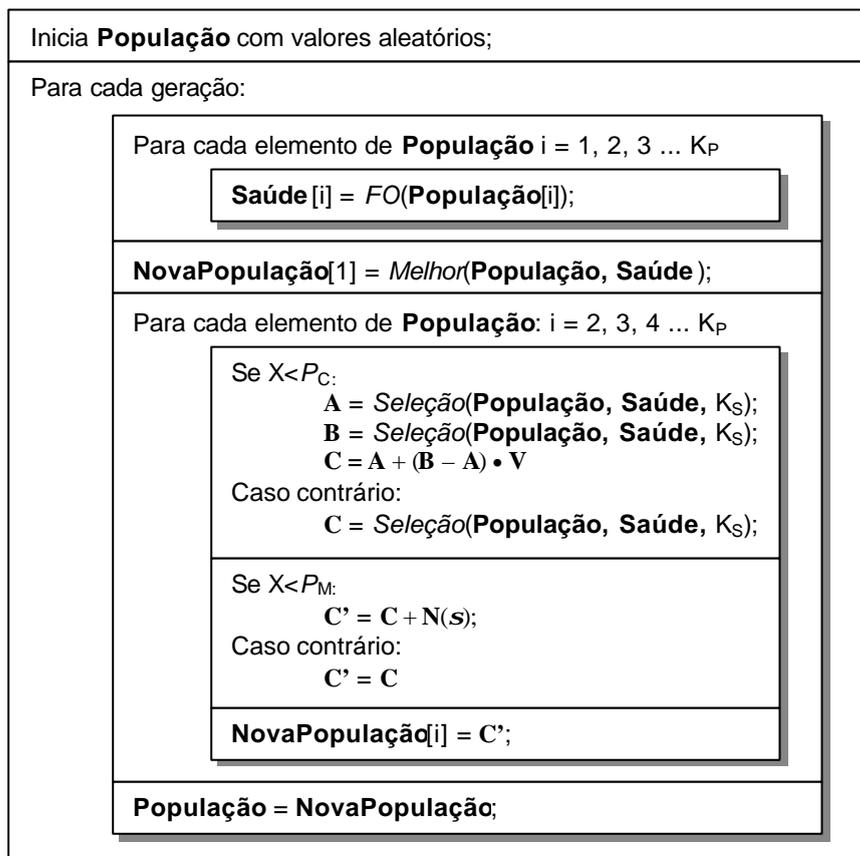


Figura 1.8: Diagrama de funcionamento de um AG feito através de pseudocódigo.

A discussão sobre o funcionamento do AG mostrado no diagrama da Figura 1.8 revela cinco parâmetros essenciais: o número de indivíduos da população ( $K_P$ ), o número de indivíduos do subconjunto de competição ( $K_S$ ), a probabilidade de cruzamento ( $P_C$ ), de mutação ( $P_M$ ) e o desvio padrão do procedimento de mutação ( $s$ ). Todos esses parâmetros regulam características

importantes, que permitem que o AG seja mais ou menos eficiente e robusto. Para cada problema, existe uma combinação ideal desses parâmetros. Essa combinação pode ser determinada de forma empírica, executando o AG diversas vezes e tentando diferentes combinações de valores dos parâmetros. Outra forma seria criar um algoritmo adaptativo, no qual os parâmetros são alterados, de acordo com a necessidade, à medida que o AG evolui [8]. Por simplicidade, para este exemplo, os parâmetros foram definidos empiricamente, com os seus valores mostrados na Tabela 2.

Tabela 1.2: Parâmetros do AG

Parâmetro	Valor
$K_P$	50
$K_S$	5
$P_C$	70%
$P_M$	De 10 a 1%
$s$	De 50 a 0.1%

Embora as variáveis  $P_M$  e  $s$  não sejam adaptativas, isto é, não se modifiquem automaticamente ao problema ou ao estado da população na geração corrente, variam em função do número da geração como proposto por [8]

$$y = y_0 \left( \frac{y_1}{y_0} \right)^{\frac{t-1}{T-1}}, \quad (1.5)$$

onde:

$y$  é o valor de  $P_M$  ou  $s$  para o número de geração atual  $t$ ;

$y_0$  é o valor de  $y$  para  $t = 1$ ;

$y_1$  é o valor de  $y$  para  $t = T$ ;

$T$  é o número total de gerações.

De acordo com a Tabela 2, os valores iniciais ( $y_0$ ) e finais ( $y_1$ ) para  $P_M$  são respectivamente 10% e 1%. Para o parâmetro  $s$  são respectivamente 50% e 0.1%. Valores de probabilidade de mutação e desvios maiores nas gerações iniciais intensificam a exploração do espaço de buscas e aumentam as chances de localização do ótimo global. Uma vez encontrada a vizinhança de um ótimo, probabilidades de mutação e desvios menores permitem melhorar a qualidade da solução final, de forma similar como faria um método de busca local.

### 1.5.6. Desempenho e Resultados Obtidos pelo AG

Nesta seção o funcionamento do AG para síntese de grades de duas camadas será acompanhado. A intenção é comprovar sua eficiência e robustez na procura da melhor solução de grade que atenda as especificações exigidas para este exemplo.

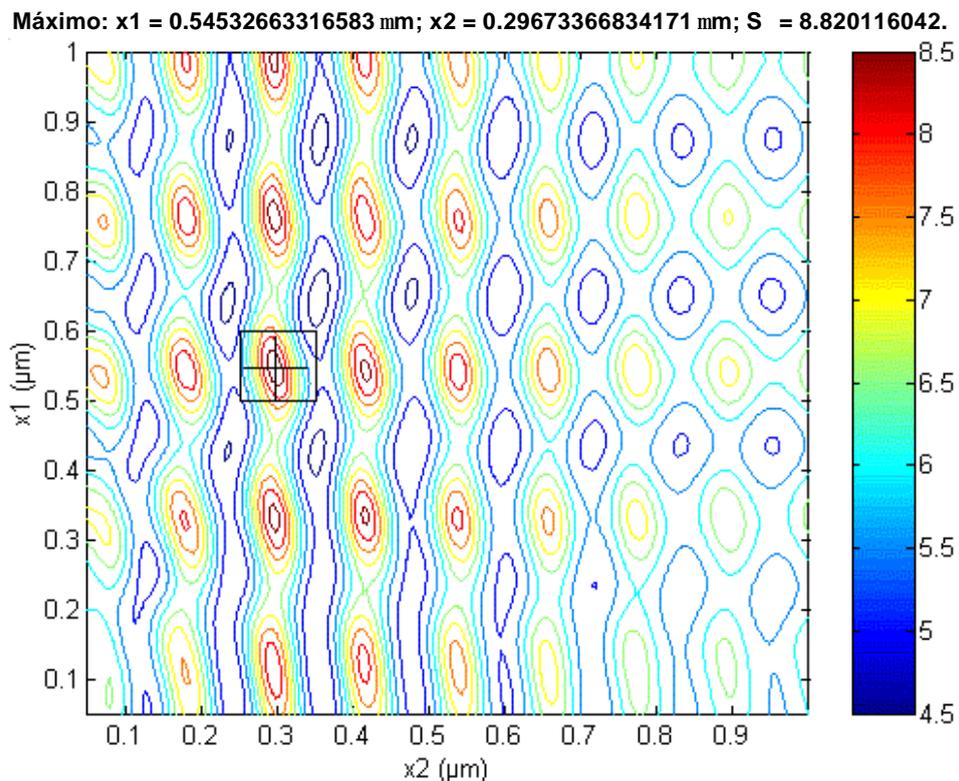


Figura 1.9: Espaço de busca como um gráfico de contornos com a solução ótima e vizinhança destacadas.

Como o espaço de soluções para este problema é pequeno, é possível enumerar todas as possibilidades de forma semelhante como feito para gerar o gráfico da Figura 1.5. Dessa forma, pode-se descobrir a solução quase ótima. A Figura 1.9 mostra um gráfico de contornos onde a melhor solução e vizinhanças foram postas em destaque. Os valores de  $x_1$  e  $x_2$  mostrados para o máximo foram obtidos com erro em torno de  $6 \times 10^{-4} \%$ .

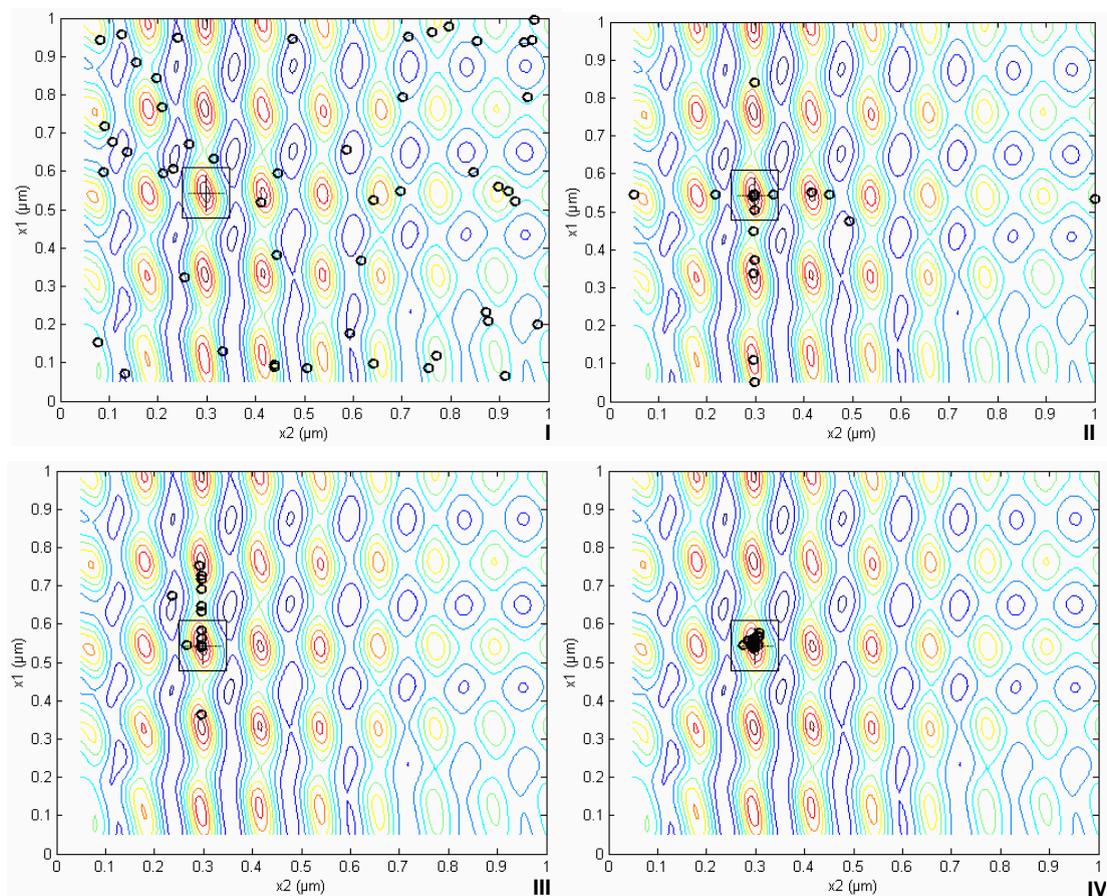


Figura 1.10: Situação da população inicial (I), após 100 gerações (II), após 200 gerações (III) e após 300 gerações (IV).

A Figura 1.10 mostra quatro estágios de evolução do AG para 300 gerações. O primeiro estágio, representado pelo quadro I, registra a situação da população inicial aleatória. O quadro II mostra a população depois de 100

gerações; o quadro III para 200 e o último para todas as 300 gerações. As marcas menores circulares representam os indivíduos da população e a marca maior é a solução calculada da Figura 1.9.

Percebe-se que após 100 gerações a vizinhança do máximo global já é explorada. Após 200 gerações as marcas circulares concentram-se ainda mais próximas do quadrado que envolve a marca da solução supostamente ótima. Ao término das 300 gerações, todas as marcas encontram-se dentro deste quadrado. Os valores obtidos para  $x_1$ ,  $x_2$  e  $S$  foram respectivamente  $0.545346421534536 \mu\text{m}$ ,  $0.2967352488410591 \mu\text{m}$  e  $8.820116315$ .

Os resultados mostram que o AG superou o método enumerativo, obtendo uma solução de melhor de saúde. Em termos de desempenho o AG também apresenta vantagens. Utilizando chamadas da FO como parâmetro de medida, como esta é acionada 50 vezes para cada geração, por 300 gerações, o total chega a 15000 acionamentos da FO para o AG. Comparando com o método enumerativo, apenas para gerar os gráficos da Figura 1.5 e 1.9 foram necessários 40000 pontos, correspondendo este mesmo número de chamadas da FO. Para chegar na localização aproximada da solução, mostrada na Figura 1.9, foi necessário enumerar o espaço de busca em etapas, reduzindo cada vez mais a região de busca em torno da solução. Foram utilizadas 3 etapas com 40000 pontos de amostragem, totalizando 120000 pontos: 8 vezes mais do que necessário para o AG.

## **1.6. PROPOSTA DE DISSERTAÇÃO**

Sintetizar um filtro óptico baseado em grade consiste em se determinar o conjunto de camadas dielétricas cuja resposta em frequência atenda as necessidades impostas pelo problema em questão. Um conjunto de procedimentos capazes de efetuar essa tarefa é considerado um método ou técnica de síntese.

Devido a grande utilidade das grades, foram feitas muitas pesquisas sobre métodos de síntese. Como resultado, atualmente existem várias técnicas

para projetos de grades, a maioria destas possuem pouca complexidade e são especializadas na síntese de dispositivos ópticos mais simples e comuns. Poucos são os métodos de síntese mais gerais, capazes de sintetizar, na medida do possível, qualquer dispositivo para qualquer resposta em frequência necessária.

Os métodos mais gerais são normalmente complexos devido a impossibilidade de simplificação ou particularização do problema, o que se caracteriza através equações diferenciais difíceis de se solucionar analiticamente. Dependendo do grau de complexidade do método, é imprescindível a combinação de técnicas de síntese ou otimização diferentes, como os algoritmos genéticos. Dentro deste cenário, o AG tem se destacado tanto como ferramenta de pré-otimização quanto de pós-otimização. Como ferramenta de pré-otimização, pelo fato de conseguir localizar eficientemente a região do espaço de buscas no qual a solução ótima se encontra. Assim, uma técnica de busca local pode ser aplicada em seguida, obtendo a solução ótima rapidamente. Como ferramenta de pós-otimização, devido sua flexibilidade ao permitir otimizar vários parâmetros simultaneamente.

Essa aplicabilidade tanto como pré como pós-otimização fomenta as discussões sobre o AG como ferramenta de síntese e otimização completa, uma vez que consegue conciliar eficiência e flexibilidade.

Uma outra possibilidade, ainda insuficientemente explorada, seria a utilização de técnicas tradicionais embutidas dentro do AG. Isso pode ser feito, por exemplo, modificando a forma de codificação: armazenando no cromossomo parâmetros para a construção de uma grade mediante estratégias exploradas por outras técnicas de síntese.

Esta dissertação pretende discutir essas duas possibilidades: a aplicação do AG puro, como ferramenta completa de síntese e otimização, e o AG de alguma forma combinado com outras estratégias exploradas pelos métodos tradicionais de síntese. Interessa comparar a eficiência e o desempenho obtidos para as duas possibilidades, além de discutir formas mais adequadas de organização destes algoritmos para aplicação na computação paralela. Como o

desempenho é uma das principais limitações dos algoritmos genéticos aplicados à síntese de grades, pretende-se explorar formas de paralelização e aplicação do AG em *clusters*.

## 1.7. ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO

A dissertação é formada por 5 capítulos estruturados da seguinte forma:

O Capítulo 2 mostrará a teoria necessária para análise de grades. Basicamente serão mostrados uma técnica matricial baseada na teoria dos modos acoplados e a tradicional formulação de Born&Wolf para grades de filmes finos. Também serão abordadas questões sobre o planejamento e o desempenho computacional das técnicas numéricas. As discussões sobre modelos e análises devem ser suficientes para elucidar todo o funcionamento da função objetivo do AG, para o problema específico de síntese de grades.

O Capítulo 3 é dedicado às formas de codificação para o AG. Serão mostradas estratégias de codificação tradicionais e uma estratégia de codificação por sobreposição de grades, proposta pelo autor. Também serão discutidas formas gerais de organização do algoritmo, para que seja possível sua implementação em computadores paralelos de alto desempenho.

O Capítulo 4 é o capítulo dos resultados. As questões sobre eficiência e desempenho levantadas ao longo dos Capítulos 2 e 3 serão atestadas por meio de exemplos. Serão apresentados e comparados os desenvolvimentos de algoritmos genéticos convencionais e melhorados, paralelos e não paralelos.

O Capítulo 5 é a conclusão. Todos os benefícios obtidos através das melhorias e adaptações dos algoritmos genéticos, discutidos nos capítulos anteriores, serão apreciados. Propostas adicionais de aperfeiçoamento do AG para seu uso em computadores paralelos serão apresentadas como propostas de trabalhos futuros, juntamente com outras contribuições possíveis não abordadas na dissertação.

## **CAPÍTULO 2: ANÁLISE DE GRADES DE BRAGG**

Neste capítulo será mostrado como obter as curvas de refletividade (em função frequência ou do comprimento de onda) para as grades de Bragg em fibra e para as grades de filmes finos. O cálculo da refletividade é de vital importância para o procedimento de avaliação (função objetivo) do qual depende o funcionamento do AG. A literatura está repleta de técnicas diferentes capazes de realizar essa tarefa. Porém, neste capítulo, serão apresentadas apenas duas técnicas de análise de grades de Bragg mais tradicionalmente utilizadas, ambas com formulação matricial. A primeira delas é o resultado da particularização da teoria dos modos acoplados para o modelo de seções uniformes [4][9]. A segunda técnica é adaptada para análise de grades de filmes finos [1][3][10]. Além de mostrar essas duas alternativas para a análise de grades de Bragg, este capítulo também mostrará como essas técnicas podem ser utilizadas na função objetivo (FO). Também será mostrada uma maneira simples e eficiente de melhorar do desempenho computacional da FO.

### **2.1. A TEORIA DOS MODOS ACOPLADOS E GRADES EM FIBRA**

Nesta dissertação será mostrado apenas como a teoria dos modos acoplados pode ser aplicada para a análise de grades de Bragg uniformes. A solução analítica encontrada para este caso simples será utilizada em uma formulação mais geral, capaz de obter a resposta em frequência de grades aperiódicas.

A teoria dos modos acoplados foi desenvolvida inicialmente para grades uniformes, oferecendo para estas uma solução analítica fechada. Contribuições posteriores estenderam o modelo de forma a permitir analisar estruturas não uniformes, embora isso possa ser rigorosamente feito apenas através da integração numérica do par de equações diferenciais acopladas [9].

Uma outra alternativa para análise de grades aperiódicas é dividi-las em seções de comprimento muito maior do que o período da corrugação. Cada

seção pode ser aproximada como uma grade uniforme, uma vez que a variação do índice efetivo médio é muito pequena dentro de cada seção. Assim, uma grade aperiódica pode ser aproximada por uma seqüência de grades uniformes, cada uma delas representada por uma matriz de transferência. A matriz de transferência de toda a grade pode ser obtida através do produto de todas as matrizes das seções que a integram [4][9].

Essa técnica de análise matricial baseada no modelo de seções é simples e muito satisfatória para análise de grades apodizadas, especialmente para grades muito longas. É fato que as grades em fibra são particularmente longas, o que é justificado pela pequena amplitude da variação média do índice de refração induzida na fibra pelos processos de fabricação disponíveis [9].

As grades em fibra são usualmente fabricadas expondo a fibra óptica dopada à luz ultravioleta, cuja intensidade segue um padrão em função do eixo axial da fibra. O padrão da luz ultravioleta é transcrito para a fibra na forma de uma perturbação do índice de refração efetivo. De forma simplificada, para o modo guiado de interesse, essa perturbação do índice pode ser descrita através da seguinte expressão [4][9][11]:

$$n(z) = n_{ef} + \Delta n_{ef}(z) \{ 1 + \nu(z) \cos [ 2\pi z/\Lambda + f(z) ] \}, \quad (2.1)$$

onde:

$n$  é o índice de refração efetivo em função da dimensão axial  $z$ ;

$n_{ef}$  é o índice efetivo da fibra sem perturbação;

$\Delta n_{ef}(z)$  é a variação média do índice efetivo em função de  $z$ ;

$\nu$  é o índice de modulação (visibilidade de franjas);

$\Lambda$  é o período nominal da grade;

$f(z)$  é a fase da perturbação em função de  $z$  (variável responsável pelo *chirp* da grade).

As propriedades ópticas da grade em fibra são muito influenciadas pela variação da perturbação do índice  $\Delta n_{ef}(z)$  ou  $\nu(z)$ , e pelo período de “modulação”  $\Lambda$  [4]. Uma característica importante a respeito de (2.1) é que o produto

$\Delta n_g(z) \cdot v(z)$  dificilmente supera a ordem de  $10^{-3}$ , conseqüentemente as grades precisam de comprimentos da ordem de milímetros para alcançar o nível de refletividade desejável.

### 2.1.1. As Equações de Modos Acoplados

Segundo a teoria dos modos acoplados, é possível escrever a componente transversal do campo elétrico (transversal em relação ao eixo axial da fibra  $z$ ) como uma superposição de modos ideais, tais como os que se propagariam caso não existisse qualquer perturbação de índice de refração. Essa expressão para o campo elétrico pode ser escrita como uma somatória de modos indexados por  $j$  [4][9]:

$$\mathbf{E}_t(x, y, z, t) = \sum_j [ A_j(z) \exp(-i\mathbf{b}_j z) + B_j(z) \exp(i\mathbf{b}_j z) ] \mathbf{e}_{jt}(x, y) \exp(i\omega t), \quad (2.2)$$

onde  $i^2 = -1$ ,  $A_j(z)$  e  $B_j(z)$  são as amplitudes dos campos que se propagam nas direções  $+z$  e  $-z$  respectivamente, para o modo  $j$ . O termo  $\mathbf{e}_{jt}(x, y)$  descreve o comportamento do modo transversal  $j$  em função da geometria da fibra [4][9]. Sem qualquer perturbação do índice de refração, os modos que se propagam na fibra não podem trocar energia. Por outro lado, com a grade, os modos que se propagam no mesmo sentido ou em sentidos opostos se alimentam reciprocamente através da reflexão. As ondas que se refletem nas perturbações ao longo da estrutura da grade podem se interferir construtivamente ou destrutivamente, dependendo do comprimento do período da corrugação. Essa interação entre os modos, isto é, o acoplamento, pode ocorrer de maneiras diferentes. Nas grades de reflexão, também chamadas de grades de Bragg, o acoplamento ocorre nos modos com os campos que se propagam em sentidos contrários, por exemplo, entre os campos de amplitude  $A_j$  e  $B_j$ . Nas grades de transmissão, o acoplamento ocorre entre os modos que se propagam no mesmo sentido, por exemplo, entre os campos de amplitude  $A_j$  e  $A_{j+1}$ . As condições de

máxima reflexão ou transmissão da onda incidente são apenas casos particulares do fenômeno de acoplamento. Para o caso das grades de Bragg, o acoplamento que pode ser descrito matematicamente através de (2.3) e (2.4) [4][9]:

$$\frac{dA_j}{dz} = i \sum_k A_k (K_{kj}^t + K_{kj}^z) \exp[i(\mathbf{b}_k - \mathbf{b}_j)z] + i \sum_k B_k (K_{kj}^t - K_{kj}^z) \exp[-i(\mathbf{b}_k + \mathbf{b}_j)z], \quad (2.3)$$

$$\frac{dB_j}{dz} = -i \sum_k A_k (K_{kj}^t - K_{kj}^z) \exp[i(\mathbf{b}_k + \mathbf{b}_j)z] - i \sum_k B_k (K_{kj}^t + K_{kj}^z) \exp[-i(\mathbf{b}_k - \mathbf{b}_j)z]. \quad (2.4)$$

Em (2.3) e (2.4),  $K_{kj}^t$  representa o coeficiente de acoplamento transversal entre os modos  $j$  e  $k$ , calculado através de [4][9]

$$K_{kj}^t(z) = \frac{w}{4} \iint dx dy \Delta \mathbf{e}(x, y, z) \mathbf{e}_{\mathbf{k}t}(x, y) \cdot \mathbf{e}_{\mathbf{j}t}^*(x, y), \quad (2.5)$$

onde  $\Delta \mathbf{e}$  é a perturbação expressa em termos de permissividade, sendo  $\Delta \mathbf{e} \equiv 2n\Delta n$ , com  $\Delta n \ll n$ . O coeficiente de acoplamento longitudinal  $K_{kj}^z$  é calculado de forma análoga a  $K_{kj}^t$ , mas geralmente é omitido pois  $K_{kj}^z \ll K_{kj}^t$  para os modos em fibra [4][9].

Na maioria das grades em fibra, a variação do índice de refração é considerada transversalmente uniforme e ocorre apenas no núcleo. Assim, é possível reescrever a expressão (2.1) substituindo  $\Delta n_e(z)$  por  $\Delta n_{co}(z)$  (variação média do índice de refração do núcleo da fibra). Essa consideração permite reescrever (2.5) como

$$K_{kj}^t(z) = \mathbf{s}_{kj}(z) + 2\mathbf{k}_{kj}(z) \cos \left[ \frac{2\mathbf{p}}{\Lambda} z + \mathbf{f}(z) \right], \quad (2.6)$$

onde:

$$\mathbf{s}_{kj}(z) = \frac{Wn_{co}}{2} \Delta n_{co}(z) \iint \mathbf{e}_{kt}(x, y) \cdot \mathbf{e}_{jt}^*(x, y) \cdot dx dy, \quad (2.7)$$

$$\mathbf{k}_{kj}(z) = \frac{v}{2} \Delta \mathbf{s}_{jk}(z). \quad (2.8)$$

Em (2.7)  $\mathbf{s}$  representa o coeficiente de acoplamento médio “DC” (médio no período). O termo  $\mathbf{k}$  em (2.8) representa o coeficiente de acoplamento “AC” [4][9].

Nas próximas subseções as equações de (2.3) até (2.8) serão particularizadas para o caso das grades uniformes de reflexão (grades de Bragg). Por fim, será mostrado como a solução analítica obtida para o caso uniforme pode ser utilizada na técnica matricial.

### 2.1.2. As Grades de Bragg Uniformes e a Formulação Matricial

Nas grades de reflexão, o acoplamento ocorre entre os modos de amplitude  $A(z)$  e  $B(z)$  idênticos, mas contra-propagantes. Próximo ao comprimento de onda em que o acoplamento entre esses modos torna-se máximo, as equações acopladas (2.3) e (2.4) podem ser simplificadas como se segue (aproximação síncrona)[4][9]:

$$\frac{dR}{dz} = i\hat{\mathbf{S}}R(z) + i\mathbf{k}S(z), \quad (2.9)$$

$$\frac{dS}{dz} = -i\hat{\mathbf{S}}S(z) - i\mathbf{k}^* R(z). \quad (2.10)$$

Onde  $R(z) = A(z) \exp(i\mathbf{d}z - \mathbf{f}/2)$ ,  $S(z) = B(z) \exp(-i\mathbf{d}z + \mathbf{f}/2)$ ,  $\mathbf{k}$  é o coeficiente de acoplamento “AC” calculado através de (2.8) e  $\hat{\mathbf{S}}$  é o coeficiente de auto-acoplamento dado por [4][9]:

$$\hat{\mathbf{s}} \equiv \mathbf{d} + \mathbf{s} - \frac{1}{2} \frac{d\mathbf{f}}{dz}. \quad (2.11)$$

O parâmetro de sintonia  $\mathbf{d}$  pode ser definido como

$$\mathbf{d} \equiv 2\mathbf{p}n_{ef} \left( \frac{1}{I} - \frac{1}{I_D} \right), \quad (2.12)$$

onde  $I_D \equiv 2n_{ef}\Lambda$  é o comprimento de onda de projeto da grade de Bragg. O parâmetro  $\mathbf{s}$  que aparece em (2.11) é o mesmo coeficiente de acoplamento “DC” definido em (2.7). A derivada  $(1/2) d\mathbf{f}/dz$  descreve o *chirp* do período da grade, onde  $\mathbf{f}(z)$  é a mesma fase definida em (2.1).

Para uma grade de Bragg monomodo, as expressões que definem os parâmetros  $\mathbf{s}$  e  $\mathbf{k}$  podem ser rescritas de forma mais simplificada como se segue [4][9]:

$$\mathbf{s} = \frac{2\mathbf{p}}{I} \Delta n_{ef}, \quad 2.13$$

$$\mathbf{k} = \mathbf{k}^* = \frac{\mathbf{p}}{I} v \Delta n_{ef}. \quad 2.14$$

Uma vez que a grade é uniforme,  $\Delta n_{ef}$  e  $v$  são constantes e  $d\mathbf{f}/dz = 0$ . Portanto,  $\mathbf{k}$ ,  $\mathbf{s}$  e  $\hat{\mathbf{s}}$  também são constantes. Dessa forma, (2.9) e (2.10) tornam-se simples equações diferenciais ordinárias de primeira ordem acopladas, para as quais existe solução fechada. A Figura 2.1 mostra uma grade de comprimento  $L$  sobre o eixo  $z$  juntamente com os campos de amplitude  $R(0)$ ,  $R(L)$ ,  $S(0)$  e  $S(L)$  em suas posições convencionadas. A refletividade para essa grade pode ser determinada considerando que a onda é incidente de  $z = -\infty$  e  $R(0) = 1$  e  $S(L) = 0$ . Os coeficientes de reflexão em termos de campo  $r = S(0)/R(L)$  e de potência (refletividade)  $\Gamma = |r|^2$  podem ser calculados respectivamente pelas expressões

$$r = \frac{-k \sinh(\mathbf{g}L)}{\hat{S} \sinh(\mathbf{g}L) + i\mathbf{g} \cosh(\mathbf{g}L)} \quad (2.15)$$

e

$$\Gamma = \frac{\sinh^2(\mathbf{g}L)}{\cosh^2(\mathbf{g}L) - \hat{S}^2/k^2}, \quad (2.16)$$

onde o parâmetro  $\mathbf{g}$  é dado por

$$\mathbf{g} \equiv \sqrt{k^2 - \hat{S}^2}. \quad (2.17)$$

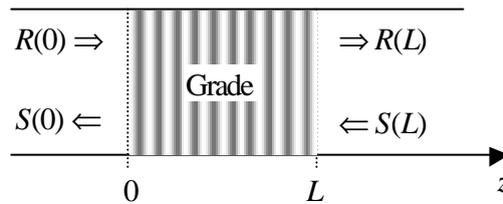


Figura 2.1: Grade em relação ao eixo  $z$  convencional e os campos de amplitude  $R$  e  $S$  em  $z = 0$  e  $z = L$ .

De acordo com (2.16), a refletividade é máxima quando  $\hat{S} = 0$ . Essa condição pode ser expressa em termos de comprimentos de onda através de [4]

$$I_{\max} = \left(1 + \frac{\Delta n_{ef}}{n_{ef}}\right) I_D, \quad (2.18)$$

onde  $I_{\max}$  é o comprimento de onda onde a máxima refletividade ocorre.

Através de (2.15) e (2.16) é possível representar a grade de Bragg uniforme como um sistema linear de entradas  $R(0)$  e  $S(0)$  e saídas  $R(L)$  e  $S(L)$ . Utilizando uma representação vetorial para as entradas e saídas, e considerando a grade uniforme como uma seção de comprimento  $\Delta z$ , é mais

adequado descrever a relação entre a amplitude dos campos antes e após a grade através de uma relação matricial

$$\begin{bmatrix} R(z + \Delta z) \\ S(z + \Delta z) \end{bmatrix} = \mathbf{M} \begin{bmatrix} R(z) \\ S(z) \end{bmatrix}, \quad (2.19)$$

onde  $\mathbf{M}$  representa a matriz de transferência para a grade, dada por

$$\mathbf{M} = \begin{bmatrix} \cosh(\mathbf{g}\Delta z) - i\frac{\hat{S}}{\mathbf{g}}\sinh(\mathbf{g}\Delta z) & -i\frac{\mathbf{k}}{\mathbf{g}}\sinh(\mathbf{g}\Delta z) \\ i\frac{\mathbf{k}}{\mathbf{g}}\sinh(\mathbf{g}\Delta z) & \cosh(\mathbf{g}\Delta z) + i\frac{\hat{S}}{\mathbf{g}}\sinh(\mathbf{g}\Delta z) \end{bmatrix}. \quad (2.20)$$

O parâmetro  $\mathbf{g}$  em (2.20) é o mesmo definido em (2.17).

Em geral, para as grades em fibra não uniformes, os parâmetros  $\Delta n_{ef}(z)$ ,  $v(z)$  e  $f(z)$  possuem variação muito lenta, observável apenas em comprimentos comparáveis ao da própria grade e, portanto, muito maiores do que o período médio da corrugação. É possível modelar esse tipo de grade como uma seqüência de seções uniformes, dentro dos quais esses parâmetros permanecem constantes. Assim sendo, cada seção poderá ser representada por uma matriz de transferência  $\mathbf{M}_k$  diferente, calculada através de (2.20), onde  $k$  é o indexador para a seção. As amplitudes dos campos na seção  $k$  são dadas em função das amplitudes dos campos da seção  $k - 1$ , através da matriz de transferência  $\mathbf{M}_k$ . Por sua vez, as amplitudes da seção  $k - 1$  são dadas em função das amplitudes da seção  $k - 2$ , através da matriz de transferência  $\mathbf{M}_{k-1}$ . Seguindo essa lógica recursiva até a primeira seção da estrutura, é possível escrever as amplitudes das componentes tangenciais dos campos da última seção em função da amplitude das amplitudes da primeira

$$\begin{bmatrix} R_N \\ S_N \end{bmatrix} = \mathbf{M}_T \begin{bmatrix} R_0 \\ S_0 \end{bmatrix}, \quad (2.21)$$

onde  $N$  é o número de seções;  $R_N$  e  $S_N$  são as amplitudes dos campos após a última seção da grade;  $R_0$  e  $S_0$  são as amplitudes dos campos antes da primeira seção da grade e  $\mathbf{M}_T$  é a matriz de transferência total dada por

$$\mathbf{M}_T = \mathbf{M}_N \cdot \mathbf{M}_{N-1} \cdot \dots \cdot \mathbf{M}_k \cdot \dots \cdot \mathbf{M}_1. \quad (2.21)$$

Em geral, o tamanho e número de seções são arbitrários e dependem da precisão desejada para o problema. Como as equações (2.13) e (2.14) perdem a validade para grades de poucos períodos, deve-se apenas garantir que  $\Delta z \gg \Lambda$ . Em compensação  $\Delta z$  pode ser feito tão grande quanto se queira, o que beneficia a representação de grades quase uniformes [4]. Para o caso de grades com deslocamentos discretos de fase entre as seções  $k-1$  e  $k$ , é possível modelar esse deslocamento inserindo uma matriz de fase  $\mathbf{M}_{Fk}$  em (2.21) entre  $\mathbf{M}_k$  e  $\mathbf{M}_{k-1}$ , definida como [4]

$$\mathbf{M}_{Fk} = \begin{bmatrix} e^{-if/2} & 0 \\ 0 & e^{if/2} \end{bmatrix}, \quad (2.22)$$

onde  $f$  é o deslocamento de fase. A matriz definida em (2.22) também pode ser utilizada para modelar um espaçamento  $\Delta L$  entre duas grades; nesse caso:

$$\frac{f}{2} = \frac{2\mathbf{p} \cdot n_{ef}}{\mathbf{l}} \Delta L. \quad (2.23)$$

Através dessa formulação matricial é possível implementar grades *apodizadas* e com *chirp*, bastando para isso definir os valores de  $s$ ,  $k$  e de  $(1/2)d\mathbf{q}/dz$  constantes, relativos ao centro de cada seção. Entretanto, é necessário cautela para variar o valor do período da grade  $\Lambda$  entre as seções; uma vez que as aproximações feitas para as equações (2.13) e (2.14) são

válidas apenas para comprimentos da onda incidente relativamente próximos do valor  $I_{\max}$ . A Figura 2.2 resume o modelo geral para as grades seccionadas. O valor e a variação do período da corrugação em relação ao comprimento das seções foram exagerados em favor da compreensão do modelo.

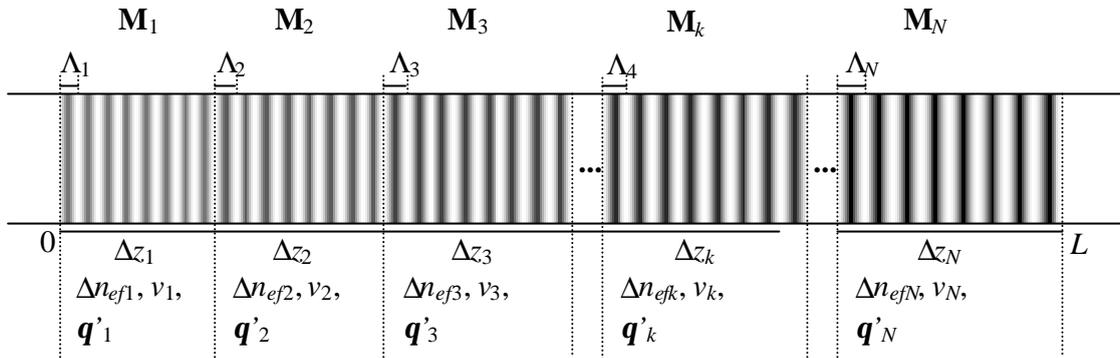


Figura 2.2: Representação de uma grade não uniforme modelada em seções. O gradiente de tons representa a variação do índice de refração.

## 2.2. ANÁLISE DE GRADES UTILIZANDO O MODELO DE FILMES FINOS

A técnica de análise matricial para grades mostrada nesta seção segue a formulação descrita por Born&Wolf [10]. Nesta formulação, a grade é considerada como uma pilha de  $N$  filmes ou camadas dielétricas de índice  $n_k$ , como mostrado na Figura 2.3. Cada camada é considerada infinita nas direções transversais  $x$  e  $y$ , porém possuem espessuras  $\Delta z_k$ . Essa técnica de análise consiste em calcular as matrizes de transferência para cada camada da estrutura e, a partir de então, seguir de forma semelhante como feito para a técnica das seções uniformes, abordada no item 2.1.2. A diferença é que, ao invés das matrizes de transferência representarem trechos da grade onde existem padrões de variação do índice efetivo, as matrizes representam um trecho discreto do guia, no qual o índice de refração é absolutamente constante.

Para aplicação desta formulação, tal como mostrada nesta dissertação, é suficiente considerar o material das camadas isotrópico, linear, homogêneo, não-dispersivo e não-magnético. Não existem restrições para a análise de

grades de qualquer período em qualquer janela de intervalos de comprimentos de onda, desde que o padrão de variação do índice de refração possa ser discretizado e aproximado como uma seqüência de camadas homogêneas. Em outras palavras, a técnica de Born&Wolf [10] pode ser aplicada em grades sem que nestas ocorra necessariamente o fenômeno do acoplamento dos modos; ou independente se as grades são de reflexão ou de transmissão.

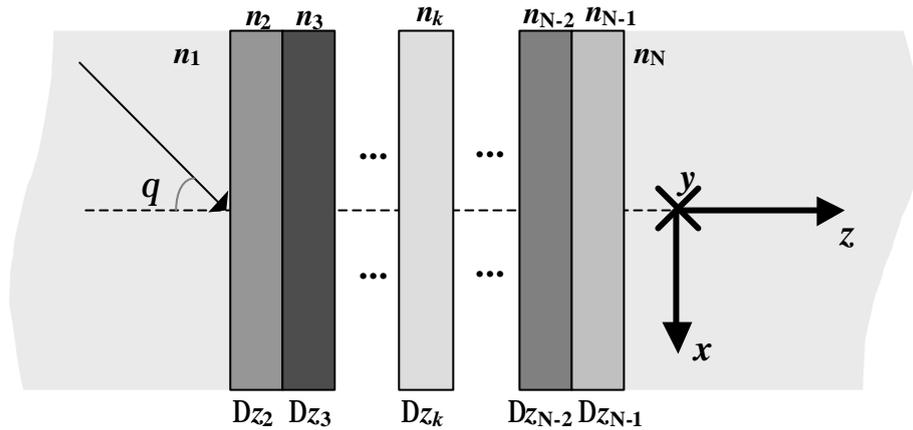


Figura 2.3: Modelo de guia formado por camadas dielétricas finas semi-infinitas.

Como pode ser visto na Figura 2.3, a onda é incidente na primeira camada de índice  $n_1$  sob o ângulo de incidência  $q$ . Considerando essa onda plana, os campos que a compõe podem assumir as polarizações TE ou TM.

Para complementar o modelo geométrico da grade, proposto através da Figura 2.3, é necessário uma forma de representação para os campos que se propagam na camada  $k$  da estrutura, para um modo em particular. Esses campos podem ser descritos no domínio da frequência através de [3][10]

$$\mathbf{E}_k(z) = \hat{\mathbf{u}} \left( A_k e^{-ig_k z} + B_k e^{ig_k z} \right) \quad (2.24)$$

E

$$\mathbf{H}_k(z) = (\hat{\mathbf{u}} \times \hat{\mathbf{z}}) \left( A_k e^{-ig_k z} - B_k e^{ig_k z} \right) \mathcal{Y}_k, \quad (2.25)$$

onde:

$\hat{\mathbf{u}}$  é o vetor unitário na direção  $+y$  ( $\hat{\mathbf{y}}$ ), para a polarização TE e  $+x$  ( $\hat{\mathbf{x}}$ ), para a polarização TM;

$(\hat{\mathbf{u}} \times \hat{\mathbf{z}})$  é o produto vetorial entre o vetor unitário da direção do campo elétrico e o vetor unitário da direção  $+z$ ;

$A_k$  e  $B_k$  são as amplitudes dos campos que se propagam na camada  $k$ , respectivamente nas direções  $+z$  e  $-z$ ;

$g_k$  é a constante de fase, ao longo da direção  $z$ , na camada  $k$ ;

A constante de fase  $g_k$  pode ser calculada através de

$$g_k = k_0 \sqrt{(n_k)^2 - (n_1 \sin \mathbf{q})^2}, \quad (2.26)$$

onde

$k_0 = 2\pi/\lambda_0$  é o número de onda do espaço livre;

$\lambda_0$  é o comprimento de onda no espaço livre;

$n_k$  é o índice de refração da camada  $k$ ;

$n_1$  é o índice de refração da primeira camada da estrutura (cobertura) e

$\mathbf{q}$  é o ângulo de incidência da onda na primeira camada da estrutura.

O parâmetro  $Y_k$  em (2.25) representa a admitância para o material que constitui a camada  $k$  da grade. Seu valor deve ser calculado em função da polarização da onda. Para a polarização TE,  $Y_k$  é dado por [3]

$$Y_k = \frac{g_k}{k_0 Z_0} \quad (2.27)$$

e para o modo TM

$$Y_k = \frac{k_0 (n_k)^2}{g_k Z_0}, \quad (2.28)$$

onde  $Z_0 = 120\pi$  é a impedância característica do espaço livre.

Em (2.24) e (2.25)  $z$  pode variar, por exemplo, de 0 a  $\Delta z_k$ . Porém, para a determinação da matriz de transferência de cada camada  $k$  importa obter os campos apenas sobre as interfaces de separação de uma camada para outra, isto é, para  $z = 0$  e  $z = \Delta z_k$ . De acordo com as condições de contorno, as componentes tangenciais dos campos da camada  $k - 1$ , para  $z = \Delta z_{k-1}$ , e da camada  $k$ , para  $z = 0$ , devem ser iguais, ou seja:

$$\begin{bmatrix} E_{tk}(z=0) \\ H_{tk}(z=0) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} E_{t(k-1)}(z=\Delta z_{k-1}) \\ H_{t(k-1)}(z=\Delta z_{k-1}) \end{bmatrix}. \quad (2.29)$$

Onde o subscrito  $t$  em (2.29) indica que os valores consistem nas componentes tangenciais dos campos, que são os mesmos campos de (2.24) e (2.25) sem a notação vetorial dadas pelos vetores unitários  $\hat{\mathbf{u}}$  e  $(\hat{\mathbf{u}} \times \hat{\mathbf{z}})$ .

Aplicando (2.24) e (2.25) em (2.29), obtém-se as seguintes relações:

$$A_k + B_k = A_{k-1}e^{-ig_{k-1}\Delta z_{k-1}} + B_{k-1}e^{ig_{k-1}\Delta z_{k-1}} \quad (2.30)$$

e

$$(A_k - B_k)Y_k = (A_{k-1}e^{-ig_{k-1}\Delta z_{k-1}} - B_{k-1}e^{ig_{k-1}\Delta z_{k-1}})Y_{k-1}. \quad (2.31)$$

Isolando as amplitudes dos campos da camada  $k$  em função das amplitudes dos campos da camada  $k-1$  e escrevendo as relações na forma matricial, obtém-se:

$$\begin{bmatrix} A_k \\ B_k \end{bmatrix} = \mathbf{M}_k \begin{bmatrix} A_{k-1} \\ B_{k-1} \end{bmatrix}, \quad (2.32)$$

onde

$$\mathbf{M}_k = \begin{bmatrix} \frac{(Y_k + Y_{k-1})}{2Y_k} e^{-ig_{k-1}\Delta z_{k-1}} & \frac{(Y_k - Y_{k-1})}{2Y_k} e^{ig_{k-1}\Delta z_{k-1}} \\ \frac{(Y_k - Y_{k-1})}{2Y_k} e^{-ig_{k-1}\Delta z_{k-1}} & \frac{(Y_k + Y_{k-1})}{2Y_k} e^{ig_{k-1}\Delta z_{k-1}} \end{bmatrix}. \quad (2.33)$$

A equação matricial (2.32) mostra como as amplitudes dos campos de uma camada em particular podem relacionar-se com as amplitudes dos campos de uma camada anterior. Assim como na técnica matricial das seções uniformes, o produto de todas as matrizes de cada camada da estrutura define a matriz de transferência total  $\mathbf{M}_T$  da grade:

$$\mathbf{M}_T = \prod_{k=N}^2 \mathbf{M}_k. \quad (2.34)$$

Então as amplitudes dos campos da última camada podem ser calculadas em função das amplitudes dos campos da primeira camada:

$$\begin{bmatrix} A_N \\ B_N \end{bmatrix} = \mathbf{M}_T \begin{bmatrix} A_1 \\ B_1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} M_{11} & M_{12} \\ M_{21} & M_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} A_1 \\ B_1 \end{bmatrix}. \quad (2.35)$$

Onde  $M_{11}$ ,  $M_{12}$ ,  $M_{21}$  e  $M_{22}$  são os elementos da matriz  $\mathbf{M}_T$  2x2.

Os coeficientes de reflexão  $r$  e de transmissão  $t$  podem ser calculados respectivamente através das relações  $B_1/A_1$  e  $A_N/A_1$ . Fazendo  $A_1 = 1$  e  $B_N = 0$ , esses coeficientes podem ser expressos em função dos elementos da matriz  $\mathbf{M}_T$ :

$$r = -\frac{M_{21}}{M_{22}}, \quad (2.36)$$

$$t = \frac{M_{11}M_{22} - M_{21}M_{12}}{M_{22}}. \quad (2.37)$$

Os coeficientes de reflexão (refletividade) e de transmissão em termos de potência podem ser calculados respectivamente por  $\Gamma = |r|^2$  e  $t = |t|^2$ .

### 2.3. GRADES DE BRAGG EM FIBRAS SEGUNDO O MODELO DE FILMES FINOS

Dependendo da técnica empregada para a fabricação da grade em fibra, o perfil de índice obtido pode ser contínuo, como descrito pela expressão (2.1), ou descontínuo. Seja qual for o formato do perfil, sempre é possível adaptá-lo ao modelo de multicamadas discretas, adequado à formulação de Born&Wolf [10][12].

A Figura 2.4 mostra como um perfil de índice contínuo pode ser aproximado para um formato discreto. O modelo de filmes finos será tanto mais apurado quanto mais finas e numerosas forem as camadas empregadas. Esta é a diferença fundamental entre as duas metodologias para análise de grades em fibra: o número de matrizes de transferência necessárias para análise. Para que o modelo de filmes finos seja o mais preciso possível, as espessuras das camadas devem ser muito menores do que o período da grade. Por outro lado, para a técnica das seções uniformes, o comprimento de cada seção precisa ser muito maior do que o comprimento do período (cerca de 100 vezes maior) [4]. Essa enorme diferença de escala se traduz na necessidade de pelo menos 1000 vezes mais matrizes para a formulação de Born e Wolf. Ainda assim, embora a matriz de transferência de uma seção uniforme represente um trecho considerável de grade, o seu cálculo demanda tanta complexidade matemática ou recursos computacionais quanto o cálculo da matriz de transferência de apenas uma camada, através de (2.31). Isso significa claramente que a análise de grades em fibra utilizando a formulação de Born&Wolf deverá de fato exibir um desempenho computacional bem menor do que a técnica das seções uniformes; o que pode até constituir um sério obstáculo à utilização dessa técnica nas funções objetivo dos algoritmos genéticos.

A Figura 2.5 mostra um perfil descontínuo de período  $\Lambda$ . Esse tipo de perfil de índices é tradicionalmente conseguido através da fabricação utilizando

máscaras de fase [11]. A modelagem desse tipo de grade em fibra é muito mais natural que no caso contínuo, pois cada período da grade pode ser claramente representado por apenas 2 camadas. Conseqüentemente, a exigência computacional para a análise de grades com esse tipo de perfil degrau pode ser menor. Além disso, para um trecho de grade homogêneo, as camadas se alternam idênticas em uma seqüência de períodos. Portanto, a matriz de transferência total pode ser obtida através apenas de operações de multiplicação entre matrizes idênticas previamente determinadas.

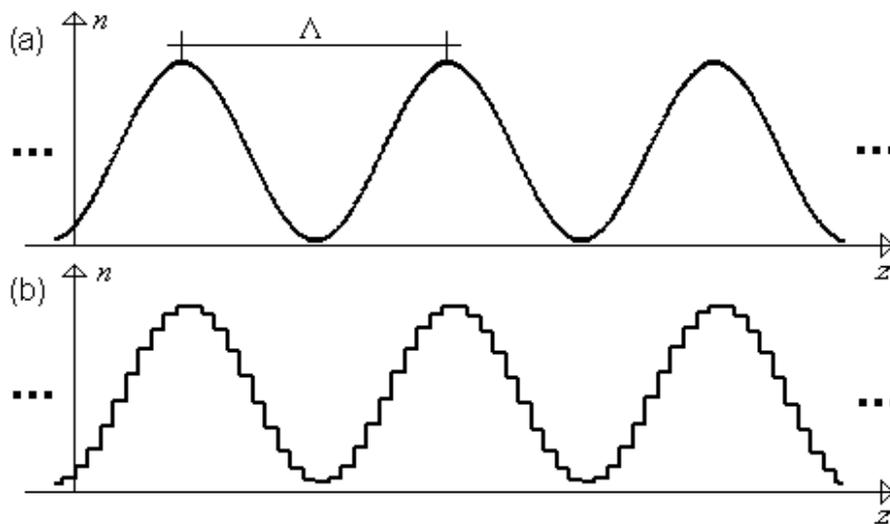


Figura 2.4: Comparação entre um perfil de índices de variação gradual (a) e um perfil aproximado para níveis discretos (b), adequado ao modelo de filmes finos.

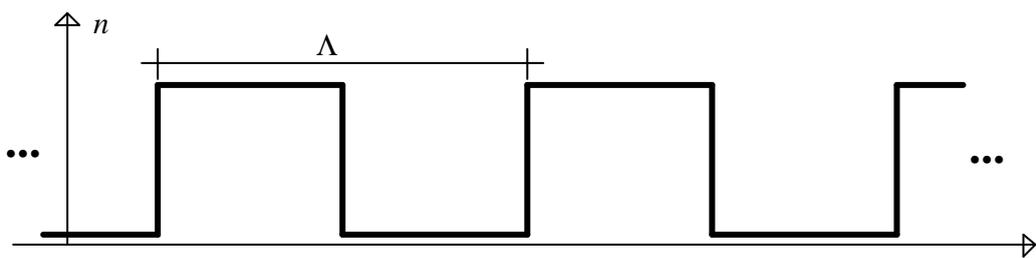


Figura 2.5: Perfil de índices de refração descontínuo.

## 2.4. CONSIDERAÇÕES A CERCA DA FUNÇÃO OBJETIVO DO AG

A função objetivo (FO) ou função saúde é a conexão entre o problema físico sendo otimizado e o algoritmo genético (AG) [13]. É o procedimento responsável pela qualificação dos indivíduos dentro do AG.

Para executar essa qualificação e gerar um valor de saúde apropriado, a FO deve primeiramente decodificar um cromossomo e gerar uma grade correspondente. Essa tarefa pode ser feita de muitas formas diferentes, dependendo da estratégia de codificação adotada. No próximo capítulo serão mostradas possíveis estratégias para a codificação e como essas estratégias podem afetar o desempenho do AG. Por enquanto, considera-se que já se tenha realizado a operação de decodificação do cromossomo e que a grade já esteja disponível segundo o modelo das seções uniformes ou dos filmes finos.

A FO utilizada nesta dissertação retorna um valor de saúde definido através de [6][13]

$$S = \left( \frac{1}{N_P} \sum_{k=1}^{N_P} \left\{ \frac{[\Gamma(\mathbf{I}_k) - \Gamma_D(\mathbf{I}_k)]}{\Delta\Gamma_k} \right\}^2 \right)^{-1}, \quad (2.38)$$

Onde

$N_P$  é o número de amostras;

$k$  é o índice da amostra;

$\Gamma(\mathbf{I}_k)$  é a refletividade obtida para a grade em questão, segundo o modelo das seções uniformes ou dos filmes finos, para o comprimento de onda  $\mathbf{I}_k$ ;

$\Gamma_D(\mathbf{I}_k)$  é a refletividade desejada para o comprimento de onda  $\mathbf{I}_k$  e

$\Delta\Gamma_k$  é a tolerância associada ao comprimento de onda  $k$ .

Embora nesta dissertação importa otimizar apenas a curva de refletividade em função do comprimento de onda  $\Gamma(I)$ , a expressão (2.38) poderia ser utilizada para comparar quaisquer outras curvas, como por exemplo, a curva do coeficiente de transmissão em termos de potência  $t(I)$ . A incidência da onda na grade será considerada sempre normal, isto é,  $q = 0$  para a análise segundo o modelo de filmes finos.

Um aspecto importante sobre (2.38) é a necessidade de comparação de uma curva em  $N_P$  amostras. Isso significa que a técnica de análise deve ser acionada também  $N_P$  vezes. O problema é que valor adequado para o número de amostras depende muito do formato da curva de refletividade e, em geral, costuma ser muito grande, chegando a alcançar a ordem de  $10^3$ . Porém, uma quantidade muito grande de amostras pode prejudicar o desempenho da FO, que naturalmente já concentra quase todo o custo computacional do AG. Descobrir uma maneira de reduzir o número de amostras garantindo, mesmo assim, a qualidade do valor de saúde calculado, chega a ser fundamental para a viabilização do algoritmo genético aplicado à síntese de grades.

#### 2.4.1. O Mecanismo de Redução do número de Amostras (MRA)

Uma forma simples de se reduzir o número de amostras é utilizar um número pequeno de pontos, porém deslocados aleatoriamente em relação ao início da janela de análise. Para a expressão (2.38), o comprimento de onda  $I_k$  normalmente seria dado em função do índice  $k$  através de

$$I_k = I_{min} + (k - 1) \Delta I, \quad (2.39)$$

onde  $I_{min}$  é o mínimo comprimento de onda (início) da janela de análise e  $\Delta I$  é o passo discreto que separa  $I_k$  de  $I_{k+1}$ . O deslocamento não homogêneo das amostras pode ser feito em relação a  $I_{min}$ , adicionado uma variável  $\Delta I_{min}$  aleatória de média nula e função densidade de probabilidade uniforme no intervalo  $[-\Delta I/2; +\Delta I/2]$ :

$$I_k = I_{min} + \Delta I_{min} + (k - 1) \Delta I. \quad (2.37)$$

O mesmo valor de  $\Delta I_{min}$  é utilizado para analisar todos os indivíduos da mesma população. Em uma geração em que a população necessitar de nova análise, um novo valor de  $\Delta I_{min}$  será obtido. Essa estratégia baseia sua eficácia no fato do AG não exigir uma qualificação absoluta da FO, 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  $I_k$  em relação à janela garante que os intervalos entre as amostras sejam eventualmente explorados de uma geração para outra. Será mostrado no Capítulo 4 que essa estratégia de redução do número de amostras pode trazer excelentes resultados, sendo capaz de reduzir a ordem de  $N_P$  de  $10^3$  para até  $10^2$ , ou até mesmo para poucas dezenas.

### **CAPÍTULO 3: CODIFICAÇÃO E PARALELIZAÇÃO DE ALGORITMOS GENÉTICOS PARA SÍNTESE DE GRADES**

O algoritmo genético opera a otimização atuando sobre seqüências numéricas compactas conhecidas como cromossomos, que representam uma entidade real que se deseja otimizar. Para o problema de síntese de grades de Bragg, os cromossomos representam as próprias grades.

O procedimento capaz de obter uma grade através de um cromossomo é chamado de “decodificação”. Por outro lado, o procedimento capaz gerar um cromossomo a partir de uma grade é chamado de “codificação”. Na codificação binária, a grade é descrita na forma de cromossomo através de uma seqüência de *bits*. Na codificação real, a grade é descrita na forma de cromossomo através de uma seqüência de números reais.

A codificação real é um procedimento muito simples e consiste freqüentemente apenas na escolha dos parâmetros que melhor representam o problema que se deseja solucionar. A escolha dos parâmetros corretos é muito importante para o bom desempenho ou viabilidade do algoritmo genético (AG). As formas de codificação real normalmente utilizadas para a síntese de grades de Bragg baseiam-se no próprio modelo adaptado para a metodologia de análise, como o modelo das seções uniformes, para a análise de grades em fibra, e o modelo multicamadas, adequado para análise de filtros de filmes finos (ambas as técnicas de análise foram discutidas no Capítulo2). Neste capítulo será mostrado como essas formas de codificação podem ser realizadas e como o cromossomo pode ser representado para cada caso. Em seguida, uma nova forma de codificação proposta será apresentada, que se caracteriza pela independência de qualquer um dos modelos utilizados para análise de grades em fibra ou de multicamadas.

Adicionalmente, serão mostradas também várias estratégias de paralelização do AG propostas pela literatura [2]. Por fim, será mostrada como uma dessas estratégias de paralelização pode ser adaptada especificamente ao problema de síntese de grades.

### 3.1. VANTAGENS DA CODIFICAÇÃO REAL SOBRE A CODIFICAÇÃO BINÁRIA

A codificação pode ser entendida como o processo em que uma entidade real que se deseja otimizar é representada de forma compacta e adequada às manipulações próprias do AG [2].

A codificação binária utiliza um vetor de *bits* para representar os parâmetros que definem o problema real. Cada um dos parâmetros é associado a um sub-vetor dentro do cromossomo binário. O número de *bits* utilizado para representar cada parâmetro determina a resolução ou precisão da codificação. O cromossomo, segundo a codificação binária, pode ser representado como [1][2]

$$\mathbf{X} = \{ x_1(1), x_1(2), x_1(3), \dots, x_j(k-1), x_j(k), x_j(k+1), \dots, x_N(M-2), x_N(M-1), x_N(M) \}, \quad (3.1)$$

onde  $x_j(k)$  é o gene (*bit*)  $k$  do cromossomo referente ao parâmetro  $j$ ;  $N$  é o número de parâmetros codificados e  $M$  é o número de elementos (genes) do vetor  $\mathbf{X}$ .

Por outro lado, na codificação real, o número de genes associado a cada parâmetro é sempre igual a 1. Cada gene é na verdade um valor ponto-flutuante cuja precisão depende do padrão de representação numérico utilizado. O vetor cromossomo real pode ser definido como [5]

$$\mathbf{X} = \{ x_1, x_2, x_3, \dots, x_{j-1}, x_j, x_{j+1}, \dots, x_{N-2}, x_{N-1}, x_N \}, \quad 3.2$$

onde  $x_k$  é um gene e também o próprio parâmetro  $k$ ;  $N$  é o número de parâmetros de  $\mathbf{X}$ .

Percebe-se, através de (3.2), que para o cromossomo real não existem formalmente operações de codificação ou decodificação. Essa simplicidade já constitui uma grande vantagem em relação à codificação binária. Uma outra vantagem da codificação real é a inexistência de problemas de resolução, uma

vez que cada gene é um ponto-flutuante cuja representação computacional padronizada é normalmente muito satisfatória [5].

Também constitui uma vantagem o modo como o operador de mutação pode ser implementado com a codificação real. Para um vetor cromossomo real, a mutação normalmente consiste de um leve desvio aleatório de uma ou mais de suas componentes, como mostrado na seção 1.4.4. Por outro lado, no caso binário, a mutação em geral consiste na troca de um bit (ou gene) de 1 para 0 ou de 0 para 1. O problema é que mesmo a troca de apenas um bit pode representar uma alteração abrupta do parâmetro correspondente ou a ruína de algum esquema desejável [5]. É verdade que existem formas de codificação binária que eliminam esses problemas, porém complicam muito o processo de codificação-decodificação [1][2][5][8].

Por todos esses motivos, acredita-se que a codificação real seja a que melhor se adapta ao problema de síntese de grades de Bragg. Resta discutir de que forma e quais os parâmetros podem ser incluídos no cromossomo para cada tipo de problema, seja para a síntese de grades fracas (em fibra) ou fortes.

### **3.2. A CODIFICAÇÃO PARA GRADES EM FIBRA**

A forma de codificação apropriada para uma grade é definida pela técnica de análise que se pretende utilizar. Para as grades de Bragg em fibra normalmente é utilizada, por questões de desempenho, a técnica de análise baseada no modelo das seções uniformes. Portanto, interessa codificar um ou mais dos parâmetros que definem cada seção, isto é, o comprimento da seção  $\Delta z$ , a variação média do índice de refração  $\Delta n_{ef}$ , a visibilidade de franjas  $\nu$ , o período do grade  $\Lambda$  e o deslocamento discreto de fase entre as seções  $f$ , definidos na seção 2.1.2. O cromossomo para a codificação real de grades em fibra pode ser definido como

$$\mathbf{X} = \{ \Delta \bar{n}_{ef1}, \bar{v}_1, \bar{\Lambda}_1, \Delta \bar{z}_1, \bar{f}_1, \Delta \bar{n}_{ef2}, \bar{v}_2, \bar{\Lambda}_2, \Delta \bar{z}_2, \bar{f}_2, \dots, \Delta \bar{n}_{efk}, \bar{v}_k, \bar{\Lambda}_k, \Delta \bar{z}_k, \bar{f}_k, \dots, \Delta \bar{n}_{efN}, \bar{v}_N, \bar{\Lambda}_N, \Delta \bar{z}_N, \bar{f}_N \}, \quad (3.3)$$

onde  $N$  é o número de seções da grade;  $\Delta \bar{n}_{efk}, \bar{v}_k, \bar{\Lambda}_k, \Delta \bar{z}_k$  e  $\bar{f}_k$  são as componentes (ou genes) do vetor  $\mathbf{X}$  e representam respectivamente os parâmetros  $\Delta n_{ef}$ ,  $v$ ,  $\Lambda$ ,  $\Delta z$  e  $f$  para a camada  $k$ , porém normalizados em relação aos seus próprios limites extremos. Isso significa que o valor de todos os genes pertencem obrigatoriamente ao intervalo  $[0; 1]$ . Os parâmetros que constituem o cromossomo não precisam necessariamente obedecer exatamente a ordem mostrada em (3.3). Também nem todos estes parâmetros precisam ser obrigatoriamente incluídos no vetor  $\mathbf{X}$ , mas apenas os que interessa otimizar. Por exemplo,  $v$ ,  $\Lambda$ ,  $\Delta z$  e  $f$  poderiam ser fixados constantes e apenas a variação média do índice de refração  $\Delta n_{ef}$  de cada seção constituiria o cromossomo.

Um outro parâmetro que talvez fosse necessário incluir como mais um gene de  $\mathbf{X}$  é o comprimento total da grade  $L$ . Porém, sendo esse parâmetro uma somatória dos comprimentos de cada seção  $\Delta z_k$  que compõem a grade, a otimização dos comprimentos das seções poderia implicar na otimização de  $L$ . Além disso, seria difícil inserir  $L$  como mais um gene do cromossomo, ao lado dos parâmetros normais de cada seção, uma vez que o comprimento de cada seção tem restrições que devem ser respeitadas. Por exemplo, o gene correspondente a  $L$  poderia indicar um comprimento que encurtaria a grade com a última seção possuindo apenas alguns poucos períodos de corrugação. Nesse caso a formulação matricial baseada na teoria dos modos acoplados não poderia ser aplicada.

### 3.3. CODIFICAÇÃO PARA GRADES DE FILMES FINOS

Como discutido nos Capítulos 1 e 2, as grades que não podem ser representadas pelo modelo de seções uniformes (normalmente grades fortes e curtas), devem ser analisadas através do modelo de multicamadas. Assim, os

parâmetros que precisam ser inseridos no cromossomo são os mesmos que definem cada camada da estrutura, ou seja, a espessura  $\Delta z_k$  e o índice de refração  $n_k$ , onde o subscrito  $k$  indica a camada a que estes parâmetros pertencem. Como a formulação para o modelo de filmes finos [10] permite considerar perdas através de um índice de refração complexo, os parâmetros para cada camada são potencialmente três:  $\Delta z_k$ ,  $n_{rk}$  e  $n_{ik}$ , onde  $n_{rk}$  e  $n_{ik}$  são respectivamente a parte real e imaginária do índice de refração  $n_k$ . O cromossomo para a codificação real de grades segundo o modelo de filmes finos pode então ser definido de maneira geral como

$$\mathbf{X} = \{ \Delta \bar{z}_1, \bar{n}_{r1}, \bar{n}_{i1}, \Delta \bar{z}_2, \bar{n}_{r2}, \bar{n}_{i2}, \dots, \Delta \bar{z}_{k-1}, \bar{n}_{r(k-1)}, \bar{n}_{i(k-1)}, \Delta \bar{z}_k, \bar{n}_{rk}, \bar{n}_{ik}, \dots, \Delta \bar{z}_{N-1}, \bar{n}_{r(N-1)}, \bar{n}_{i(N-1)}, \Delta \bar{z}_N, \bar{n}_{rN}, \bar{n}_{iN} \}, \quad (3.4)$$

onde  $N$  é o número de camadas da estrutura representada por  $\mathbf{X}$ ;  $\Delta \bar{z}_k$ ,  $\bar{n}_{rk}$  e  $\bar{n}_{ik}$  são as componentes (ou genes) do vetor  $\mathbf{X}$  e representam respectivamente os parâmetros  $\Delta z_k$ ,  $n_{rk}$  e  $n_{ik}$  (da camada  $k$ ), porém normalizados em relação aos intervalos extremos próprios de cada parâmetro. Assim como no caso da codificação de seções para grades em fibra, alguns parâmetros podem ser omitidos da codificação. Por exemplo, como na maioria dos casos o índice de refração é considerado real, os termos  $\bar{n}_{ik}$  podem ser omitidos de (3.4).

Para otimizar o comprimento total da grade  $L$ , um gene correspondente poderia ser incluído no cromossomo em adição aos parâmetros das camadas. Porém, assim como no caso da codificação para o modelo das seções uniformes, a inclusão do parâmetro  $L$  não precisaria ser feita de forma explícita, uma vez que consiste na somatória das camadas que compõe a grade. Também há a chance de que o gene relativo ao comprimento total represente alguma violação de restrições. Por exemplo, caso o comprimento indicado para a grade corresponda a uma abreviação da última camada, que poderia adquirir uma espessura menor que o mínimo estabelecido.

### 3.4. UMA FORMA DE CODIFICAÇÃO ALTERNATIVA

De acordo com a formulação matricial baseada na teoria dos modos acoplados mostrada no Capítulo 2, o comprimento de onda onde a máxima refletividade ocorre para uma grade de Bragg é dada por  $I_{\max} = (1 + \Delta n_{ef}/n_{ef}) I_D$ , onde  $I_D$  é o comprimento de onda de projeto,  $\Delta n_{ef}$  é a variação média do índice de refração e  $n_{ef}$  é o índice de refração efetivo. O comprimento de onda de projeto, por sua vez, é dado por  $I_D = 2 n_{ef} \Lambda$ , onde  $\Lambda$  é o período da perturbação do índice de refração efetivo da grade [4].

Portanto, existe uma relação muito clara entre uma característica do perfil de índices de refração, a corrugação, e um comportamento espectral. Considerando  $\Delta n_{ef} \ll n_{ef}$ , uma corrugação de período  $\Lambda$  seria responsável por um pico de máxima refletividade centrado no comprimento de onda dado por  $2 \cdot n_{ef} \Lambda$ . Para se conseguir dois picos de máxima refletividade centrados em comprimentos de onda diferentes, basta utilizar um perfil de índices fruto da soma (sobreposição) de dois outros perfis de períodos diferentes [12][14].

Em [14] é mostrada uma técnica de fabricação de grades onde várias grades de períodos diferentes são escritas sobrepostas na mesma região da fibra óptica. Como conseqüência, existirão no espectro de refletividade vários picos de máximo lado a lado, um para cada grade componente participante da sobreposição. O perfil de índices para uma grade sobreposta poderia ser definido como uma somatória de perfis periódicos simples, similares ao definido pela expressão (2.1):

$$n(z) = n_{ef} + \sum_{k=1}^N \Delta n_{ef k} [1 + v_k \cdot \cos(2pz/\Lambda_k + q_k)], \quad (3.5)$$

onde  $N$  é o número de parcelas a serem somadas e o subscrito  $k$  identifica a que parcela os parâmetros estão associados (cada parcela está associada a uma grade componente). Admitindo-se que os parâmetros  $\Delta n_{ef k}$ ,  $v_k$ ,  $\Lambda_k$  e  $q_k$  sejam

constantes (independentes de  $z$ ) e que  $0 < \Delta n_{ef\ k} \ll 1$  e  $\Delta n_{ef\ k} v_k = A_k$ , (3.5) pode ser rescrita como

$$n(z) = n_{ef} + \sum_{k=1}^N A_k \cos(4\mathbf{p} \cdot n_{ef} z / \mathbf{l}_k + \mathbf{q}_k), \quad (3.6)$$

onde  $\mathbf{l}_k$  representa o comprimento de onda no qual ocorre o pico de máxima refletividade associado à grade sobreposta de índice  $k$ .

A equação (3.6) toma uma forma familiar parecida com a expressão para a série de Fourier, onde cada ordem corresponderia a uma grade componente. A resposta espectral para uma grade com esse tipo de perfil é de fato uma série de picos de máxima refletividade, cada um deles centrados em  $\mathbf{l}_k$ . A máxima refletividade de cada pico  $\Gamma_k$  não pode ser prevista com exatidão, embora seu valor seja certamente função de  $A_k$  ou da apodização feita no perfil da grade relativa à parcela  $k$  [4][12][14].

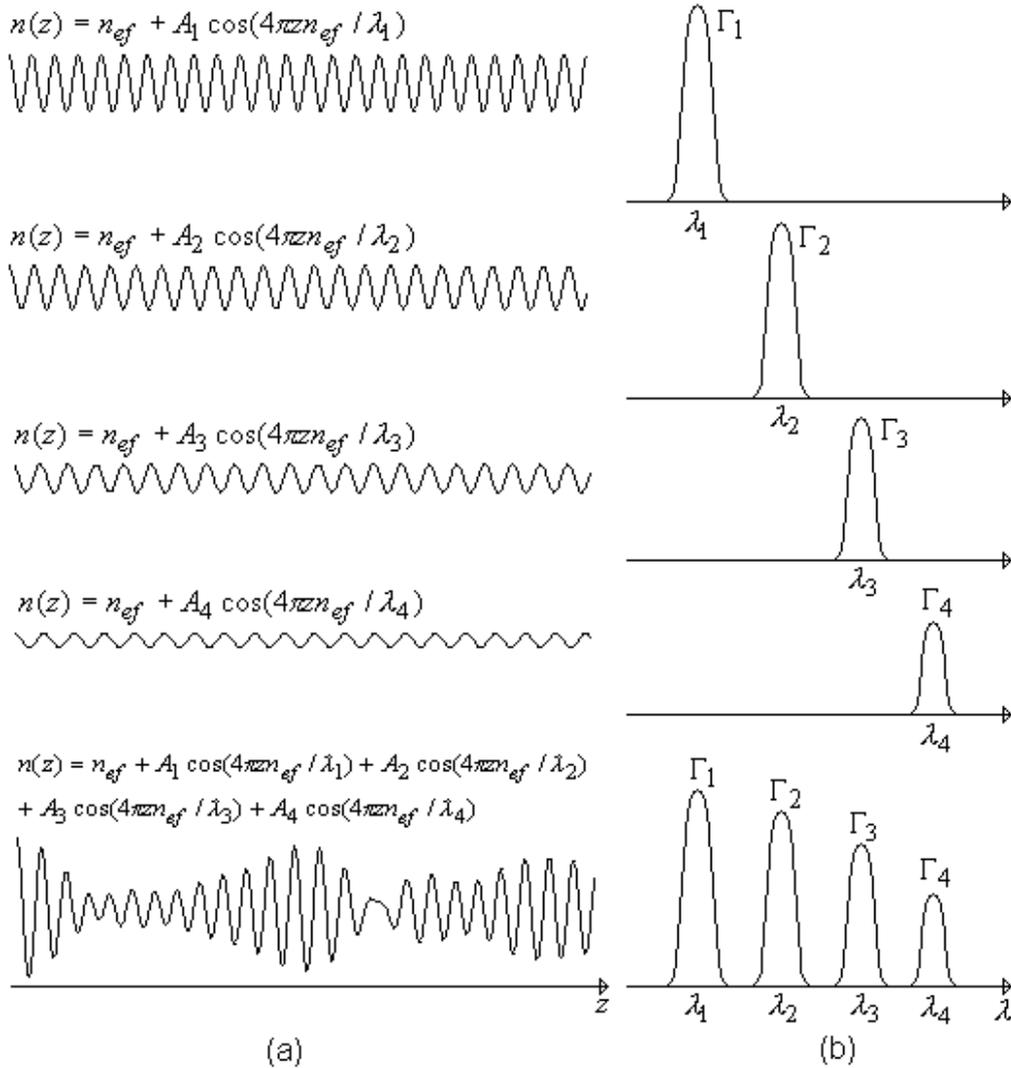


Figura 3.1: Quatro perfis de índices uniformes mais um quinto perfil composto por sobreposição (a); Esboço do que seria a resposta espectral dos perfis à esquerda (b).

A Figura 3.1 mostra de forma simplista quatro perfis uniformes e um perfil obtido através da sobreposição, cada um associado à sua respectiva suposta resposta espectral. A ilustração reforça a idéia de dependência dos valores de máxima refletividade  $\Gamma_k$  das respectivas amplitudes de perturbação  $A_k$ , comportamento este que é demonstrado em várias publicações, como por exemplo, em [4]. Dando prosseguimento à idéia, é possível controlar a amplitude, largura e posição dos picos de máxima refletividade da grade sobreposta por meio dos parâmetros que definem cada grade componente. De

acordo com (3.6) esses parâmetros consistem de  $A_k$ ,  $I_k$  e  $q_k$ . Propõe-se, nesta dissertação, uma codificação na qual o cromossomo seja composto exatamente por estes parâmetros normalizados, em relação aos seus valores extremos. Não seria apropriado comparar este método de codificação com os dois outros apresentados nas seções 3.3 e 3.4, principalmente por que fazer os valores de  $A_k$  proporcionais aos respectivos valores desejados para  $\Gamma_k$  já seria uma espécie de aproximação ou chute inicial. A população inicial para o AG poderia ser feita aleatória, porém variando em torno deste chute.

O cromossomo para a codificação por sobreposição pode ser formalmente definido como

$$\mathbf{X} = \{\bar{A}_1, \bar{I}_1, \bar{q}_1, \bar{A}_2, \bar{I}_2, \bar{q}_2, \dots, \bar{A}_{k-1}, \bar{I}_{k-1}, \bar{q}_{k-1}, \bar{A}_k, \bar{I}_k, \bar{q}_k, \bar{A}_{k+1}, \bar{I}_{k+1}, \bar{q}_{k+1}, \dots, \bar{A}_{N-1}, \bar{I}_{N-1}, \bar{q}_{N-1}, \bar{A}_N, \bar{I}_N, \bar{q}_N\}, \quad (3.7)$$

onde  $N$  é o mesmo número de grades componentes como definido para (3.5);  $\bar{A}_k$ ,  $\bar{I}_k$  e  $\bar{q}_k$  são os valores normalizados pertencentes ao intervalo  $[0; 1]$  dos respectivos parâmetros  $A_k$ ,  $I_k$  e  $q_k$ .

O número de grades componentes  $N$  é um parâmetro muito flexível e pode ser feito tão grande a ponto de fazer com que os picos de máxima refletividade se confundam no espectro, como mostrado na Figura 3.2. Dessa forma, é possível sintetizar formatos contínuos de curvas de refletividade em função do comprimento de onda, ao invés de apenas picos esparsos.

Há, entretanto, uma desvantagem da codificação através do cromossomo definido por (3.7) em relação aos outros dois tipos de codificação mostrados anteriormente. Trata-se da necessidade de decodificação formal do cromossomo, uma vez que a representação de (3.7) é feita no domínio de  $I$  e a grade é de fato representada por uma curva de índice de refração em função de sua direção axial. A decodificação do cromossomo pode ser feita através de (3.6), porém o perfil obtido não se adapta diretamente ao modelo das seções

uniformes. Por outro lado, a adaptação do perfil para o modelo multicamadas é natural, uma vez que consiste exatamente da curva de índices discretizada.

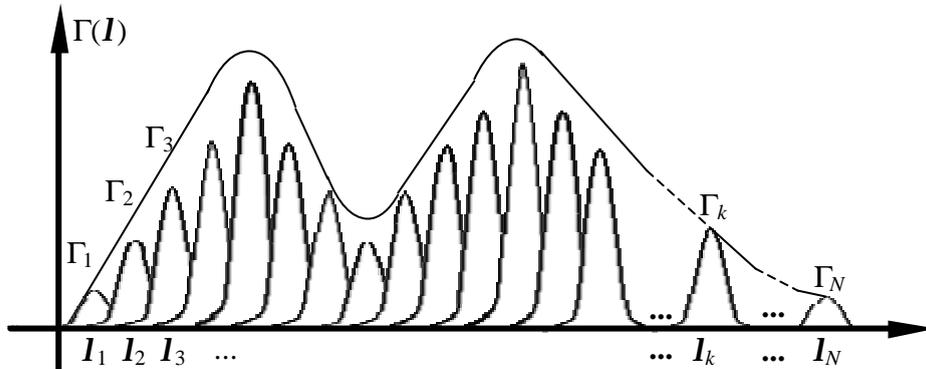


Figura 3.2: Curva de refletividade criada pela “condensação” de picos máximo.

Entretanto, por questões de desempenho ou para satisfazer o modelo de grades fabricadas segundo o processo das máscaras de fase [11], comumente o perfil discreto é aproximado para um perfil de apenas dois níveis de índices de refração. Para grades em fibra, essa representação não apenas viabiliza o uso da técnica de análise matricial de Born&Wolf [10], como permite modelar a grade em seções uniformes; graças ao fato da grade utilizando apenas dois valores de índices de refração (*binível*), obtida por sobreposição, normalmente ser constituída de uma série de trechos longos de amplitude e período de perturbação uniformes, separados por deslocamentos discretos de fase. Portanto, a codificação baseada em grades sobrepostas pode ser utilizada para sintetizar grades através do AG, sendo a função objetivo baseada em qualquer uma das duas técnicas de análise mostradas no Capítulo 2.

Além do procedimento de decodificação deixar o AG mais complexo, pode deixá-lo também mais lento, devido ao fato da discretização da curva do perfil de índices de refração exigir uma quantidade muito grande de amostras. De fato, quanto mais longa for a grade, maior deverá ser a quantidade de amostras, e, conseqüentemente, maior será o tempo necessário para a

decodificação. Esse problema deve afligir principalmente as grades em fibra, cujos comprimentos dos perfis podem alcançar alguns centímetros.

Diferente da codificação real para o modelo de seções uniformes ou multicamadas, o cromossomo (3.7) não possui termos que limitem o tamanho da estrutura. Assim sendo, é necessário incluir um gene em (3.7) que represente de forma explícita o comprimento total da grade  $L$ , caso seja interesse otimizar este parâmetro. Uma outra alternativa seria associar um comprimento  $L_k$  a cada grade  $k$  componente. Assim como ocorre para a amplitude de perturbação, o comprimento da grade também influencia o valor da refletividade do pico de máximo [4]. A Figura 3.3 mostra de que forma a grade sobreposta poderia ser fruto de uma combinação de perturbações de comprimentos diferentes. Entretanto, a presença de mais um parâmetro para cada grade componente, potencialmente capaz de controlar o valor de refletividade dos picos assim como  $A_k$ , não significa que as amplitudes de perturbação  $A_k$  não precisem mais ser consideradas no cromossomo. Os parâmetros  $A_k$  e  $L_k$  são na verdade complementares, de acordo com [4], e de qualquer forma a existência de mais parâmetros de controle apenas fornece mais graus de liberdade ao AG. O cromossomo definido através de (3.7) pode ser reescrito como

$$\mathbf{X} = \{\bar{A}_1, \bar{I}_1, \bar{q}_1, \bar{L}_1, \bar{A}_2, \bar{I}_2, \bar{q}_2, \bar{L}_2, \dots, \bar{A}_{k-1}, \bar{I}_{k-1}, \bar{q}_{k-1}, \bar{L}_{k-1}, \bar{A}_k, \bar{I}_k, \bar{q}_k, \bar{L}_k, \dots, \bar{A}_{N-1}, \bar{I}_{N-1}, \bar{q}_{N-1}, \bar{L}_{N-1}, \bar{A}_N, \bar{I}_N, \bar{q}_N, \bar{L}_N\}, \quad (3.8)$$

onde  $\bar{L}_k$  representa o parâmetro  $L_k$ , porém normalizado em relação aos valores extremos previstos.

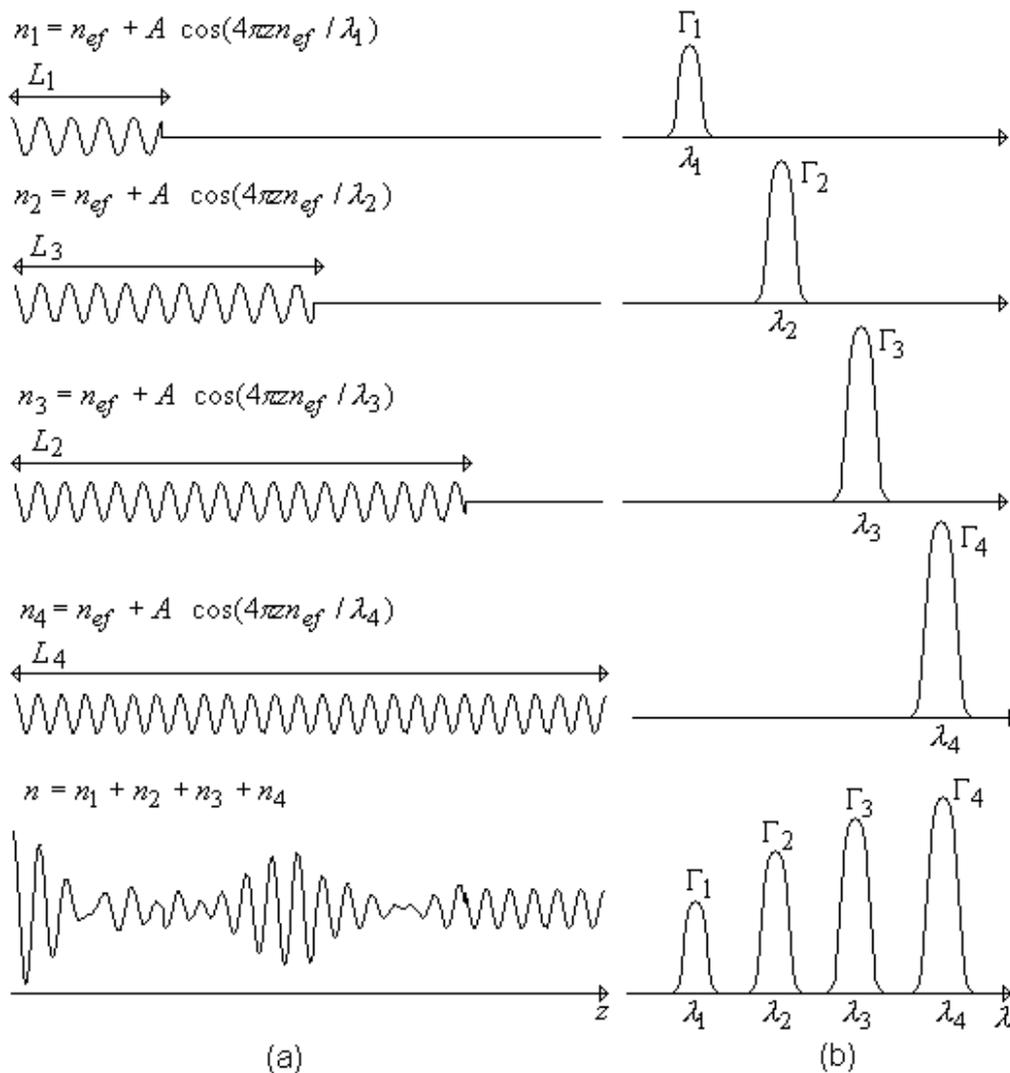


Figura 3.3: Quatro perfis de índices uniformes de comprimentos diferentes mais um quinto perfil composto por sobreposição (a); Esboço do que seria a resposta espectral dos perfis à esquerda (b).

### 3.5. PARALELIZAÇÃO DO ALGORITMO GENÉTICO

Para o problema de síntese de grades de Bragg utilizando algoritmos genéticos, as numerosas iterações de análises realizadas pela função objetivo (função saúde) podem consumir em demasia os recursos computacionais disponíveis. Conseqüentemente, o algoritmo genético pode chegar a demandar um tempo de processamento muito grande. Uma forma de resolver esse

problema seria paralelizar o AG; uma solução cada vez mais acessível, principalmente com a popularização dos *clusters* Beowulf [15].

A paralelização é uma estratégia utilizada em computação para se obter resultados mais rápidos de grandes e complexas tarefas. Uma grande tarefa pode ser dividida em partes para serem executadas simultaneamente; esse procedimento de divisão pode ser estruturado da seguinte forma:

1. Identificam-se tarefas menores no interior da tarefa maior a ser paralelizada;
2. Distribuem-se as pequenas tarefas por entre vários “trabalhadores”, que irão executá-la simultaneamente;
3. Coordenam-se os “trabalhadores”.

Felizmente estes três procedimentos são relativamente fáceis de se aplicar nos algoritmos genéticos, uma vez que estes são naturalmente paralelos. Particularmente, existe alguma experiência sobre a paralelização de algoritmos genéticos e já existem algumas estratégias de paralelização consagradas na literatura. Basicamente todas as estratégias existentes de alguma forma derivam das configurações estudadas por Grefenstette, por volta de 1981 [2]. Foi Grefenstette quem realizou os primeiros testes e comparações de implementações paralelas dos algoritmos genéticos. Dentre as configurações estudadas em seu trabalho destacam-se [2]:

1. Configuração mestre-escravo;
2. Configuração distribuída;
3. Configuração em rede.

A **configuração mestre-escravo** é mostrada através da Figura 3.4. Nela, um único processo mestre coordena  $N$  processos escravos. O processo mestre é responsável por todas as operações de seleção, cruzamento e mutação; enquanto os escravos apenas executam a função objetivo, além de

eventualmente realizar alguma busca local complementar [2]. Essa estratégia de paralelização é de implementação bastante simples, embora possa haver problemas de sincronia, principalmente caso as tarefas realizadas pelos escravos ocorram em lapsos de tempo muito variados. Uma outra característica desse tipo de estratégia é a dependência exagerada de todo o sistema em relação apenas ao processo mestre [2].

Na **configuração distribuída**, mostrada na Figura 3.5,  $N$  processos executam concorrentemente, realizando todas as tarefas pertinentes ao AG; porém compartilhando a mesma memória distribuída. Essa configuração pode precisar de coordenação entre os processos para evitar que acessem ao mesmo tempo o mesmo segmento de memória, embora isso não represente de fato uma desvantagem. Como a memória é distribuída, o sistema não depende absolutamente de um processo em particular, o que torna esta configuração mais robusta e imune a eventuais falhas do que a configuração mestre-escravo [2].

Para a **configuração em rede**, mostrada na Figura 3.6,  $N$  algoritmos genéticos completos e autônomos são executados, cada um possuindo sua própria memória independente. Cada um desses processos efetua as operações de seleção, cruzamento e mutação sobre uma população própria. A comunicação entre processos ocorre apenas para compartilhar os melhores indivíduos obtidos por um processo local para todos os outros conectados. Esta configuração reduz consideravelmente a necessidade de comunicação e os processos são muito mais independentes uns dos outros.

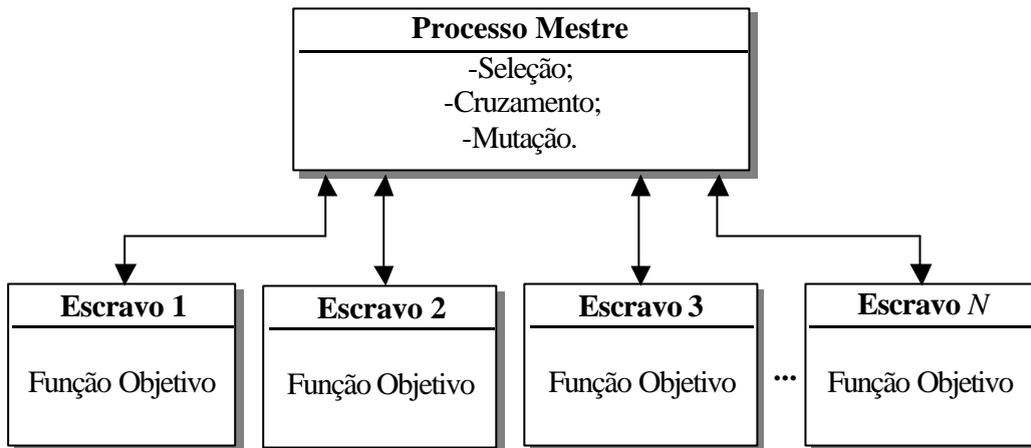


Figura 3.4: Algoritmo genético paralelo segundo a configuração mestre-escravo.

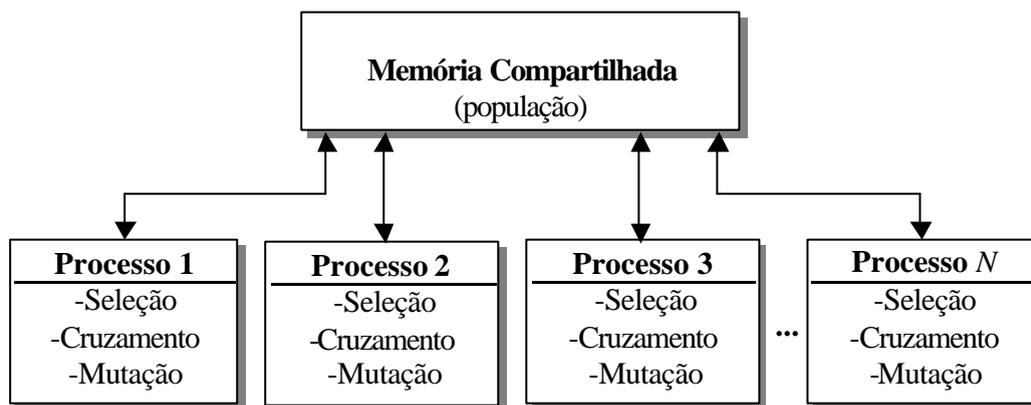


Figura 3.5: Algoritmo genético paralelo segundo a configuração distribuída.

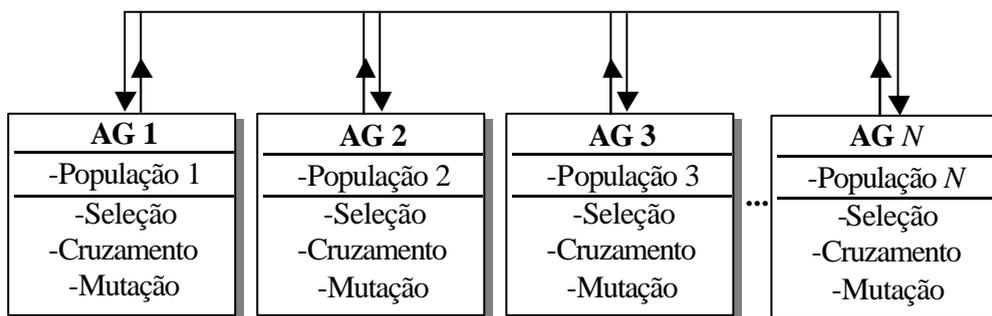


Figura 3.6: Algoritmo genético segundo a configuração em rede.

### 3.5.1. Algoritmo Genético Paralelo para Síntese de Grades

#### 3.5.1.1. Termos utilizados em computação paralela

Alguns conceitos importantes precisam ser abordados antes de iniciar o estudo de caso para paralelização do AG para a síntese de grades de grades. São os conceitos de balanceamento de carga, granularidade, decomposição, *speedup* e eficiência de paralelização.

O **balanceamento de carga** é a divisão da quantidade de tarefas na mesma proporção da capacidade computacional dos nós que integram o *cluster*. Os *cluster* dedicados utilizando PCs com Linux e bibliotecas de comunicação MPI possuem configurações de hardware normalmente homogêneas, isto é, todos os nós (computadores) da rede possuem normalmente a mesma capacidade computacional. Entretanto, caso não esteja assegurada essa homogeneidade, é responsabilidade do programa paralelo distribuir as tarefas proporcionais à capacidade de processamento de cada nó. A distribuição das tarefas por entre os processadores deverá ser sempre de maneira tal que o tempo da execução das partes seja o mais próximo possível. Se essa exigência não for satisfeita, o desempenho do programa paralelo será menor, pois freqüentemente ocorrerão processos ociosos aguardando parâmetros de alguma outra tarefa obrigatória ainda em curso [13][15].

A **granularidade** é a razão entre computação e comunicação. Pode ser classificada como “fina” ou “grossa”. Na granularidade fina as tarefas executam um pequeno número de instruções entre os ciclos de comunicação. Isso prejudica o desempenho do programa paralelo, que pode chegar a dedicar mais tempo para a comunicação do que para a computação. Na granularidade grossa, ao contrário, as tarefas executam um grande número de instruções entre os ciclos de comunicação. Quanto mais grossa for a granularidade, maior será o desempenho do programa paralelo, porém também existirão menos maneiras de divisão das tarefas e, conseqüentemente, mais difícil será o balanceamento de carga [13][15].

A **decomposição** consiste na estratégia de divisão do código que será executado em cada nó da máquina paralela. Há duas formas de decomposição: por **domínio** e **funcional**. Na decomposição **funcional**, o problema é dividido em diferentes tarefas que serão distribuídas por entre múltiplos processadores para execução simultânea. É adequada a um programa dinâmico e modular. Cada tarefa será na verdade um programa diferente. Por outro lado, na decomposição de **domínio**, os dados são decompostos em grupos que serão distribuídos por entre múltiplos processadores que executarão, simultaneamente, um mesmo programa [13][15].

O parâmetro **speedup** representa a relação entre o tempo de processamento serial (utilizando apenas 1 processador) e o tempo de processamento paralelo [14]. O valor obtido dessa relação deve ser o mais próximo possível do número de processadores utilizados: quanto mais próximo for, maior será a eficiência da paralelização obtida. A **eficiência de paralelização** é a relação entre o *speedup* e o número de processadores utilizados. Na prática tanto o *speedup* quanto a eficiência de paralelização podem ser utilizados para avaliar a qualidade da paralelização [13][15].

### 3.5.1.2. Estudo de uma estratégia de paralelização para o AG aplicado à síntese de grades

Com a popularização dos *clusters* Beowulf, as bibliotecas padrão MPI (*Message Passing Interface*) tornaram-se uma escolha muito comum para o desenvolvimento de programação paralela de alto desempenho [15].

Como o *cluster* Beowulf usando MPI organiza-se como uma rede cliente-servidor, é natural imaginar que a paralelização mestre-escravo adapta-se mais naturalmente do que as outras. De fato não haveria vantagem, a cerca da robustez, em se utilizar a configuração distribuída ou a configuração em rede, pois de qualquer forma o *cluster* é dependente de um servidor. É certo que as reduções de transferência de dados entre os processos paralelos para a configuração distribuída e, principalmente, a configuração em rede, poderia

constituir uma vantagem decisiva. Porém, a configuração mestre-escravo é muito simples de se compreender e implementar, portanto um bom ponto de partida para o entendimento da paralelização do AG aplicado à síntese de grades de Bragg. Além disso, o problema da síntese de grades utilizando o AG possui granulação muito grossa. Essa característica beneficia a utilização da estratégia de paralelização mestre-escravo.

De qualquer forma a paralelização do AG utilizando a configuração distribuída não seria viável devido à filosofia das bibliotecas de passagem de mensagem. Como cada nó acessaria a memória distribuída de forma quase aleatória; apenas um ambiente de passagem de mensagens orientado a eventos permitiria o uso dessa estratégia de paralelização. Quanto a esse aspecto a configuração em rede é bem mais vantajosa, haja vista permitir o uso de comunicação de forma similar como a utilizada na configuração mestre-escravo.

Por outro lado, a configuração do AG em rede possui um comportamento diferente do AG simples. A diferença se deve ao movimento cíclico de migração dos melhores indivíduos entre as populações dos nós do *cluster*. As migrações acabam por melhorar a diversidade de todas as populações, o que permite explorar de forma mais eficiente o espaço de buscas. Conseqüentemente, a solução obtida pelo AG em rede tende a obter uma saúde melhor do que a solução obtida pelo AG simples. Porém, como esta dissertação pretende basicamente comprovar a influência de vários tipos de esquemas de codificação no AG simples, a paralelização utilizando a configuração em rede deverá permanecer no horizonte, como uma proposta para trabalhos futuros.

A Figura 3.7 mostra o esquema para a paralelização do AG segundo a configuração mestre escravo [13]. Como pode ser observado, o AG não é executado completamente nos processos escravos. Por outro lado, a tarefa do mestre é praticamente igual a que seria para uma AG convencional não paralelo. Porém, em vez de calcular a saúde de toda a população, o mestre calcula apenas para uma parte. A população restante é dividida e cada parte é enviada para um computador escravo correspondente. Cada escravo analisa sua parte da população e retorna, para o processo mestre, uma tabela de valores de

saúde. O processo mestre agrupa as tabelas de saúde coletadas na forma de um único vetor, o qual é utilizado para dar prosseguimento ao AG. Como praticamente toda a carga computacional concentra-se no cálculo da saúde dos indivíduos, a paralelização da função objetivo representa de fato a paralelização do AG. O critério de parada pode ser baseado em um número limite de gerações ou na estagnação da evolução.

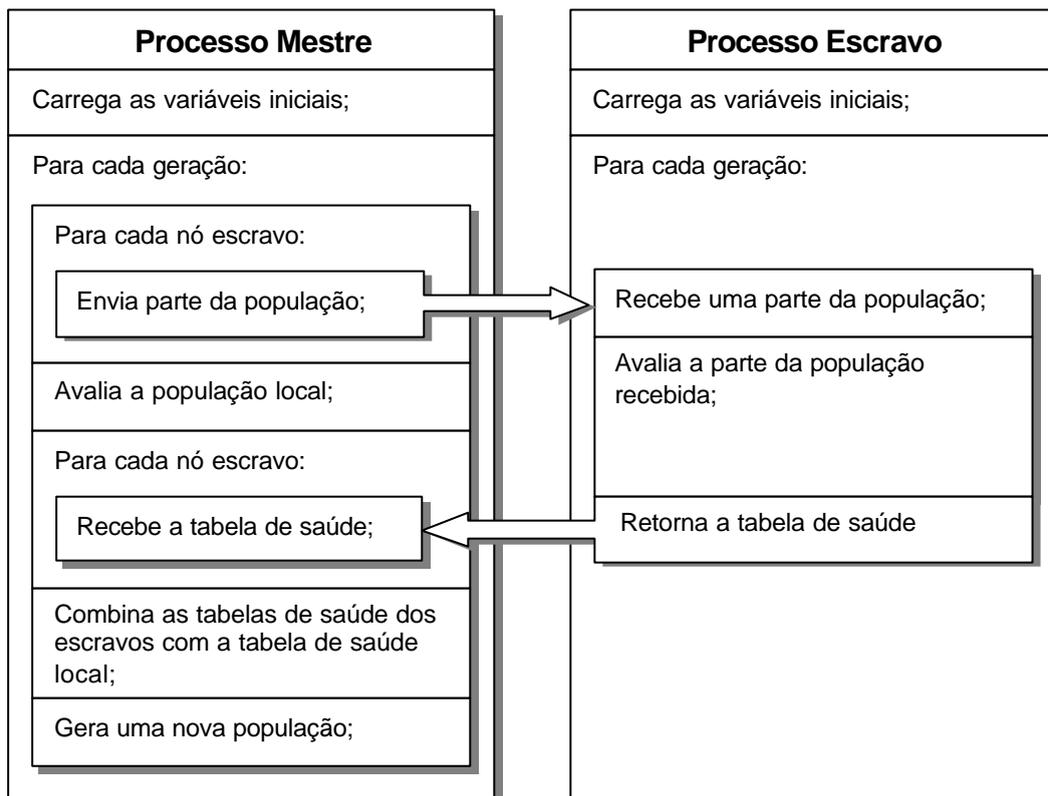


Figura. 3.7: Diagrama do programa paralelo para a configuração mestre-escravo.

Para realizar a decomposição dos processos em um mestre e vários escravos, como mostrado na Figura 3.7, é possível utilizar tanto a decomposição funcional quanto a decomposição por domínio. Entretanto, a escolha mais natural seria a decomposição por domínio, já que o processo mestre consiste de uma parte do AG, uma parte também presente no processo mestre.

Para a solução do problema do balanceamento de carga, a paralelização mestre-escravo pode utilizar um artifício muito simples. Como o processamento é proporcional ao número de indivíduos da população, a paralelização através da distribuição de partes da população com um número de indivíduos tamanhos proporcionais à capacidade de processamento de cada máquina garante a mesma carga para todos os nós utilizados no processamento do AG. Por exemplo, para um *cluster* homogêneo o número de indivíduos de cada parte da população enviada seria o mesmo.

## **CAPÍTULO 4: RESULTADOS**

Nos capítulos anteriores, os algoritmos genéticos e as técnicas de análise de grades de Bragg foram apresentados, com destaque a tópicos específicos a respeito das estratégias de codificação e paralelização. Resta mostrar o resultado prático da combinação de todos esses conhecimentos na elaboração de programas de síntese robustos e eficientes. Esse é o objetivo deste capítulo.

Primeiramente, serão comparadas as técnicas de análise de grades de Bragg através da formulação matricial derivada da teoria dos modos acoplados e da formulação de Born&Wolf [10]. O interesse é mostrar o quanto essas técnicas são computacionalmente exigentes e também o quanto elas podem ser aceleradas através da aplicação de alguns conceitos mostrados no Capítulo 2. Também será a oportunidade para comprovar o efeito da sobreposição de grades simples e o controle de parâmetros de projetos dessas estruturas, tais como o comprimento de onda de operação, a largura de banda e os valores máximos dos picos de refletividade mostrados no Capítulo 3.

Em seguida serão comparados os efeitos da aplicação das diferentes estratégias de codificação mostradas no Capítulo 3. O objetivo é comprovar se a codificação da sobreposição de grades pode melhorar a eficiência do algoritmo genético. Por fim, será mostrado como a paralelização do algoritmo genético aplicado à síntese de grades pode melhorar consideravelmente o desempenho computacional.

### **4.1. DESEMPENHO DA ANÁLISE DE GRADES EM FIBRA**

De acordo com o discutido no item 2.3, fica claro que a técnica de análise matricial derivada da teoria dos modos acoplados é aplicada apenas para análise de grades de Bragg periódicas com perturbação lenta na variação da amplitude, o que se aplica às grades impressas em fibra óptica. Além dessa restrição, a técnica é limitada para a análise em comprimentos de onda próximos ao ponto de operação no qual o acoplamento torna-se máximo. Porém, todas

essas limitações são contrabalançadas pelo desempenho computacional potencialmente muito superior ao que é possível de se obter através da técnica de análise baseada no modelo multicamadas.

Para exemplificar essa diferença de desempenho foi realizada a análise de uma grade uniforme com os seguintes parâmetros de projeto: variação média do índice de refração  $\Delta n_{ef} = 10^{-3}$ , “visibilidade de franjas”  $\nu = 1$ , comprimento de onda de projeto  $I_D = 1.55 \mu\text{m}$ , índice de refração efetivo da fibra  $n_{ef} = 1.45$  e comprimento da grade  $L = 0.01 \text{ m}$ . A Figura 4.1 mostra três curvas de refletividade em função do comprimento de onda para esta grade. Duas das curvas foram obtidas através da formulação de [10], baseada no modelo multicamadas; a terceira curva foi obtida através da formulação matricial baseada no modelo das seções uniformes [4].

Para o modelo das seções uniformes, foi necessária apenas uma matriz para representar toda a grade. Por outro lado, para o modelo de filmes finos foram necessárias 374194 matrizes, caso a discretização para o período da corrugação seja feita utilizando 20 regiões dielétricas. No exemplo da Figura 4.1, as duas curvas de refletividade foram obtidas utilizando apenas 5 e 2 camadas por período, totalizando 93550 e 37420 matrizes; respectivamente. Quanto menor for o número de camadas utilizadas para a discretização do período, menor será o número de matrizes, porém menor também será a precisão do modelo; o que pode se refletir em respostas espectrais distorcidas. O caso extremo é a representação de cada período da grade por apenas duas camadas, embora esse seja o modelo mais exato para representar grades fabricadas através do processo das máscaras de fase [11].

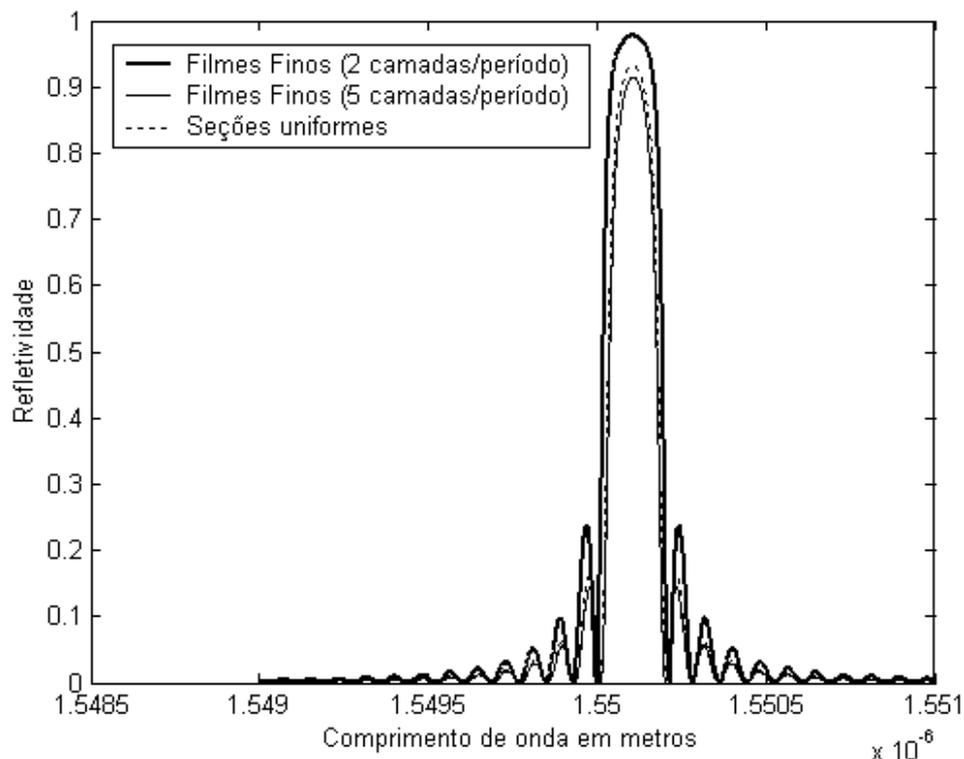


Figura 4.1: Comparação entre 3 curvas de refletividade obtidas através de duas técnicas de análise diferentes.

De acordo com a formulação de Born&Wolf para filmes finos, a matriz de transferência de uma grade com perfil de índice periódico pode ser obtida através do produtório da matriz característica do período. Isso significa que o desempenho computacional do procedimento de análise pode ser consideravelmente melhorado, uma vez que a matriz característica de toda a grade pode ser determinada através do produtório de matrizes características (idênticas) dos períodos. Mesmo assim, o desempenho obtido através do método baseado no modelo das seções uniformes de [4] é muito superior. Para a grade do exemplo da Figura 4.1, a curva de refletividade foi obtida aproximadamente 10 vezes mais rápida utilizando a técnica de [4] do que utilizando a técnica de análise de [10], com uma discretização de 5 camadas por período. A Tabela 4.1 mostra os tempos computacionais médios de 100 simulações para geração de curvas de refletividade de 1000 amostras. O computador utilizado para os testes foi um PC AMD Duron de 850 MHz. Os

programas foram compilados para as plataformas Linux e Win2000 utilizando parâmetros de compilação padrão.

Tabela 4.1: Tempos de processamento médio para o levantamento de uma curva de refletividade de 1000 amostras.

Técnica de análise	Tempo de processamento médio (segundos)		Observações
	Linux 2.4.18, gcc/g++ 3.2.	Win 2000, VC++ 6.0.	
Formulação matricial baseada na teoria dos modos acoplados	0.0064484	0.00931	Grade uniforme (representada por apenas 1 matriz)
	0.1530838	0.16223	20 camadas por período
Formulação matricial de Born e Wolf	0.114933	0.10125	10 camadas por período
	0.0953352	0.0705	5 camadas por período
	0.0837332	0.05218	2 camadas por período

A proximidade cada vez maior dos valores de tempo para a formulação de Born&Wolf [10], à medida que o número de camadas por período diminui, é justificada pelo fato de que apenas as matrizes características das camadas são calculadas. Conseqüentemente as operações para cálculo da matriz de transferência total resumem-se praticamente na multiplicação das matrizes características das camadas. Como o número de períodos é sempre o mesmo, o número de operações de multiplicação é também sempre o mesmo e, à medida que o número de camadas por período se reduz, o tempo de processamento converge para exatamente o tempo necessário para efetuar o produto de todas as matrizes.

Para completar a comparação de desempenho entre as técnicas matriciais de análise, é fundamental mostrar um exemplo envolvendo grades modeladas em várias seções (seção 2.1.2). A Figura 4.2 mostra duas curvas de

refletividade; a curva 1, gerada através da técnica matricial baseada na teoria dos modos acoplados [4], e a curva 2, através da técnica de análise de Born e Wolf [10]. A grade em questão possui visibilidade de franjas  $\nu$  constante igual a 1, uma variação da perturbação do índice ( $\Delta n_{ef}$ ) de formato gaussiano com valor máximo igual a  $4 \times 10^{-4}$  e comprimento de FWHM (*Full Width of Half Maximum*) de 0.3168 cm, como mostrado na Figura 4.3. Para análise através da metodologia baseada no modelo de seções uniformes, a grade foi dividida em 100 seções de comprimentos iguais. Para análise através da metodologia baseada no modelo de filmes finos, a grade foi discretizada utilizando apenas 2 camadas por período, como mostrado na seção 2.3.

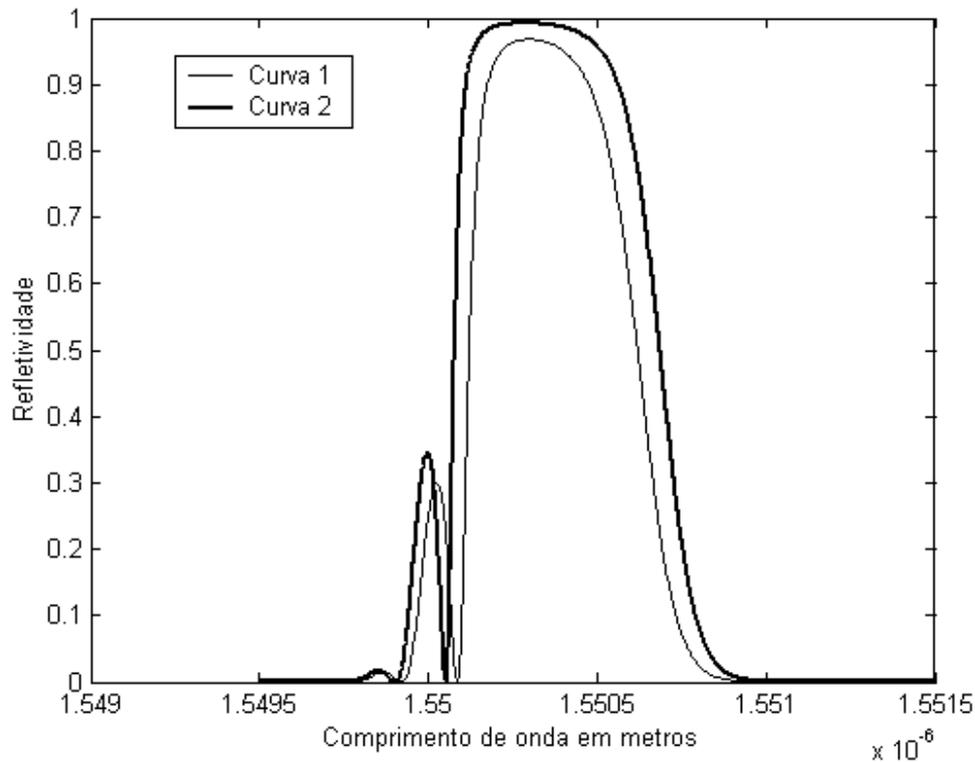


Figura 4.2: Curvas de refletividade para uma grade de perturbação gaussiana do índice de refração.

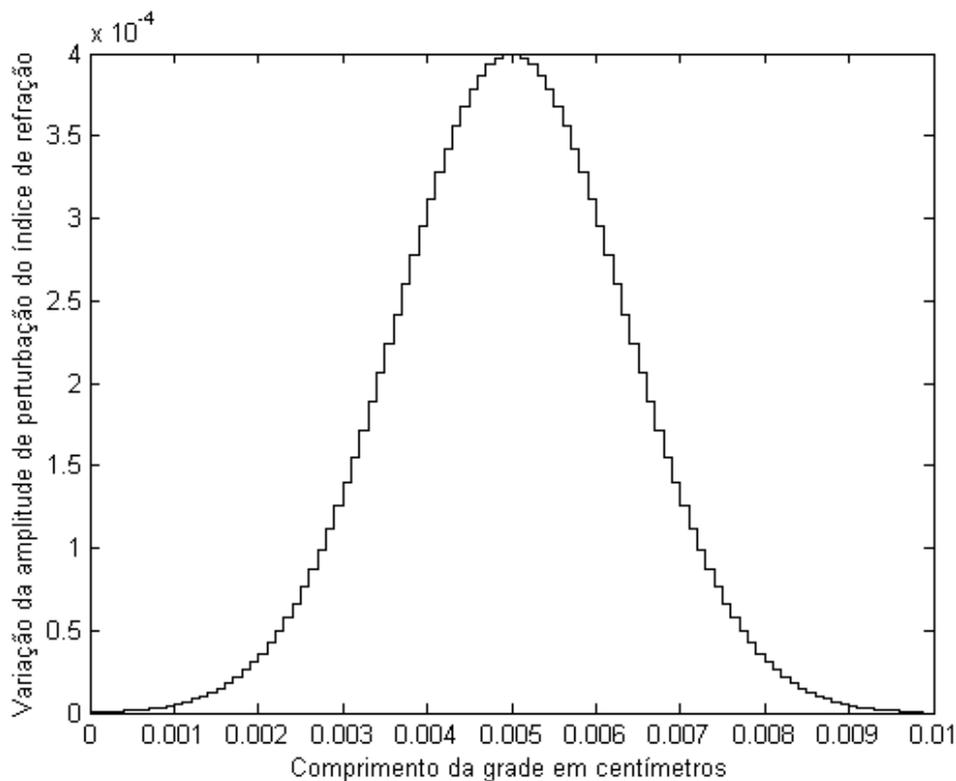


Figura 4.3: Curva da variação da amplitude de perturbação do índice de refração em função do comprimento da grade, para o exemplo da Figura 4.2.

Os tempos computacionais gastos para obtenção das curvas 1 e 2 da Figura 4.2 são relacionados na Tabela 4.2. Os valores foram obtidos sob as mesmas condições que a Tabela 4.1, isto é, no mesmo computador, médias feitas ao longo de 100 simulações e curvas de 1000 amostras. Com os valores da Tabela 4.2 já é possível estimar o tempo de processamento que levaria um algoritmo genético para síntese de grades em fibra. Considerando que o AG possua uma população de 50 indivíduos e seja planejado executá-lo em 4000 gerações, o tempo de processamento seria pelo menos  $4000 \times 50$  vezes maior do que o tempo necessário para analisar apenas 1 indivíduo. Utilizando a mesma metodologia de análise empregada para gerar a curva 1, o tempo total de processamento do AG seria de no mínimo 28.4 horas ou aproximadamente 1.2 dias, de acordo com a Tabela 4.2. Porém, caso fosse utilizada a mesma técnica de análise da curva 2, o tempo de processamento seria de pelo menos 161.88

horas ou aproximadamente 6.74 dias. Sob esse aspecto a paralelização do AG parece ser imprescindível.

Tabela 4.2: Tempos de processamento médio para o levantamento das curvas de refletividade do exemplo da Figura 4.2.

Curva	Tempo de processamento médio (segundos)		Observações
	Linux kernel v2.4.18, gcc/g++ 3.2.	Win 2000, VC++ 6.0.	
1	0.5119155	0.6948	Grade gaussiana representada por 100 seções
2	2.913756	4.0994	Seções discretizadas com 2 camadas por período

#### 4.2. A SOBREPOSIÇÃO DE GRADES

Antes de chegar aos algoritmos genéticos é preciso comprovar, através de exemplos, os efeitos espectrais da sobreposição de grades discutidos no Capítulo 3. Esses efeitos, que consistem na inserção de picos de máxima refletividade no espectro com o controle de sua largura de banda e amplitude, são essenciais para o entendimento da codificação baseada na sobreposição de grades.

Para efeito de demonstração da metodologia associada à otimização com relação aos parâmetros das grades componentes: variação da amplitude do índice de refração ( $A$ ), do comprimento ( $L$ ), ou de ambos, serão apresentados a seguir três projetos escolhidos adequadamente de modo a mostrar cada um desses casos com uma boa visualização. Esse procedimento foi realizado tomando-se como base à formulação apresentada no item 3.5.

#### 4.2.1. A variação das amplitudes dos índices de refração

Para o primeiro exemplo será considerada uma grade sobreposta de forma que o seu espectro de refletividade apresente 3 picos centrados nos comprimentos de onda  $I_1 = 1.5495 \mu\text{m}$ ,  $I_2 = 1.55 \mu\text{m}$  e  $I_3 = 1.5505 \mu\text{m}$ . Portanto a grade é fruto da sobreposição de 3 componentes cujos comprimentos de onda de projeto são exatamente  $I_1$ ,  $I_2$  e  $I_3$ . As amplitudes de perturbação para cada componente são iguais:  $A_1 = A_2 = A_3 = 6.67 \times 10^{-5}$ , onde  $A = \Delta n_{ef} \times v$ , escolhidos de forma a apresentar uma boa visualização do fenômeno através das curvas de refletividade. Todas as componentes também possuem comprimentos iguais:  $L_1 = L_2 = L_3 = 2 \text{ cm}$ . O resultado da sobreposição das 3 componentes é uma grade uniforme em termos do produto  $\Delta n_{ef} \times v$ , cujo valor é de  $2 \times 10^{-4} (A_1 + A_2 + A_3)$ , mas de período de perturbação variável ao longo de seu comprimento. O comprimento total da grade sobreposta é o mesmo de todas as componentes, ou seja, 2 cm. A Figura 4.4 mostra duas curvas de refletividade para a grade sobreposta. A curva 1 foi obtida através das metodologia de análise baseada no modelo de seções uniformes, enquanto que a curva 2 foi obtida através da metodologia baseada no modelo multicamadas com discretização feita com 2 camadas por período [Born]. Comprova-se, a partir da Figura 4.4, como esperado, a existência de 3 picos de máxima refletividade.

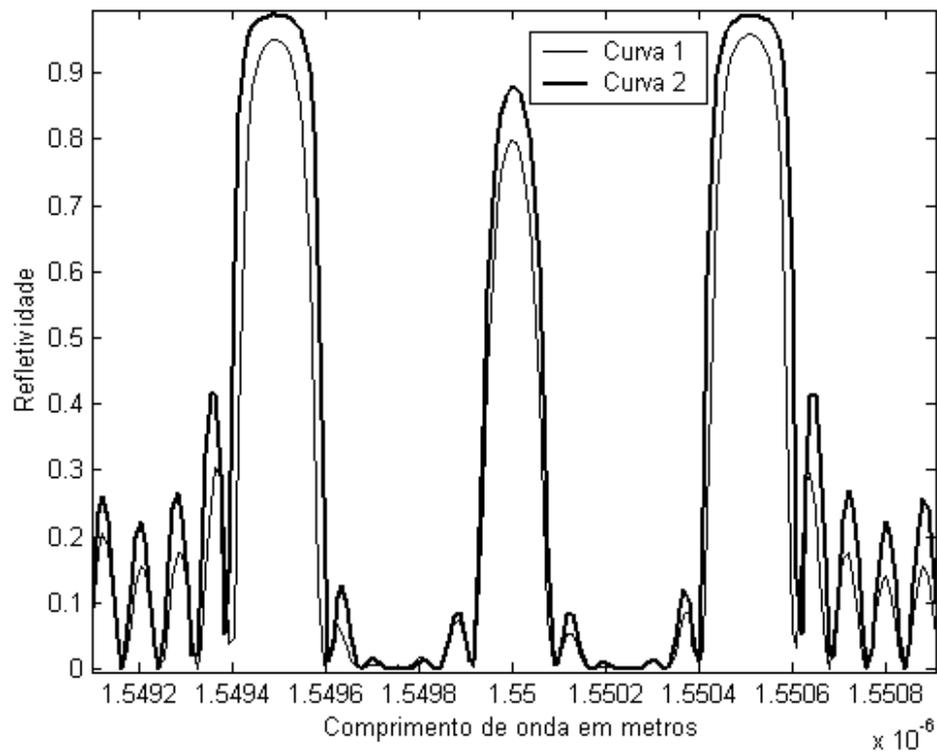


Figura 4.4: Curvas de refletividade de uma grade obtida pela sobreposição de três outras de amplitudes de perturbação iguais.

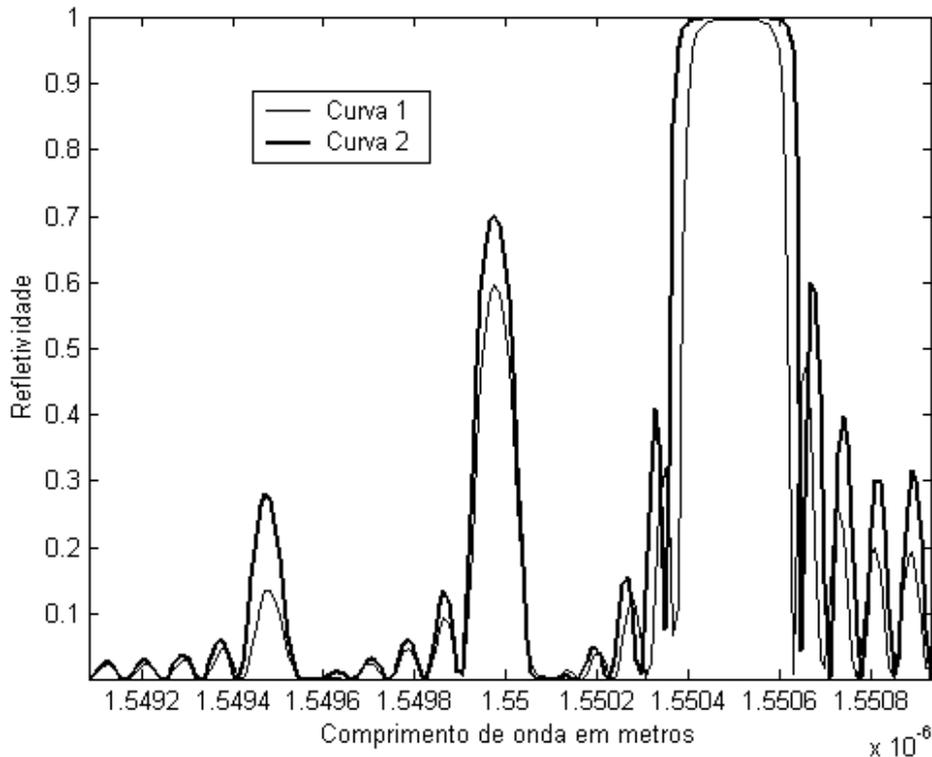


Figura 4.5: Curvas de refletividade de uma grade obtida pela sobreposição de três outras de amplitudes de perturbação desiguais e crescentes.

Para constatar a influência das amplitudes de perturbação das componentes, a Figura 4.5 mostra a curva de refletividade para uma grade de parâmetros bem parecidos dos da grade do exemplo da Figura 4.4, tendo como única diferença os valores das amplitudes de perturbação das componentes:  $A_1 = 2.86 \times 10^{-5}$ ,  $A_2 = 5.7 \times 10^{-5}$  e  $A_3 = 1.14 \times 10^{-4}$ , escolhidos de forma a apresentar uma boa visualização do fenômeno. A grade resultante é uniforme em relação ao produto  $\Delta n_{ef} \times \lambda$ , cujo valor é dado por  $A_1 + A_2 + A_3 \cong 2 \times 10^{-4}$ . Comprova-se a influência das amplitudes desiguais e crescentes, responsáveis por picos de refletividade de amplitudes variadas e de certa forma proporcionais. Do mesmo modo como na Figura 4.4, a curva 1 foi obtida através da metodologia baseada no modelo das seções uniformes, enquanto que a curva 2 foi obtida através da metodologia baseada no modelo multicamadas com discretização realizada com 2 camadas por período.

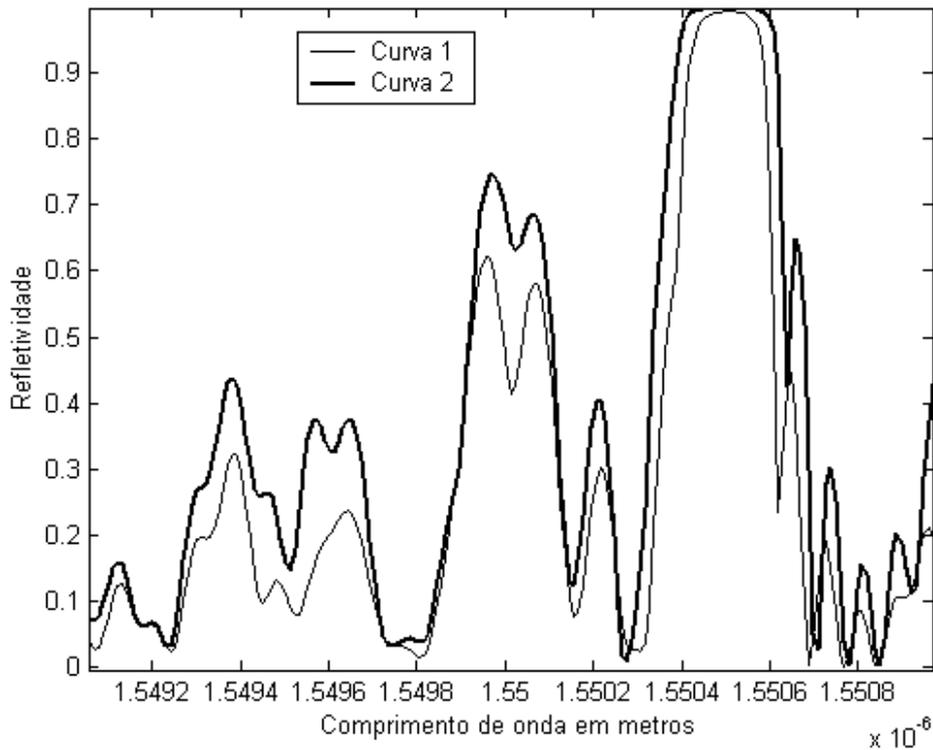


Figura 4.6: Curvas de refletividade de uma grade obtida pela sobreposição de três outras de mesmas amplitudes, mas de comprimentos desiguais e crescentes.

#### 4.2.2. A variação dos comprimentos das grades componentes

A Figura 4.6 mostra a influência exercida pelo comprimento das cada componentes. Cada uma delas agora possui as mesmas amplitudes utilizadas no exemplo da Figura 4.4, porém comprimentos diferentes:  $L_1 = 0.5$  cm,  $L_2 = 1$  cm e  $L_3 = 2$  cm (o comprimento total da grade é dado pela componente mais longa). Os resultados foram curvas de refletividade que seguem o mesmo aspecto das curvas da Figura 4.5, embora a aparência dos picos de refletividade seja mais espalhada e imprecisa.

### 4.2.3. A variação conjunta dos comprimentos e da amplitude dos índices das grades componentes

A Figura 4.7 mostra uma tentativa de equalização entre as influências do comprimento e amplitude de cada componente, mantendo-se os picos nas mesmas posições dos exemplos anteriores. As amplitudes das componentes foram  $A_1 = 2.86 \times 10^{-5}$ ,  $A_2 = 5.7 \times 10^{-5}$  e  $A_3 = 1.14 \times 10^{-4}$ ; e o comprimento das componentes:  $L_1 = 2$ ,  $L_2 = 1$  e  $L_3 = 0.5$  cm. O resultado é uma curva com picos espalhados de amplitude decrescente no espectro, porém de valores de refletividade máximos mais próximos do que nas curvas das Figuras 4.6 e 4.5.

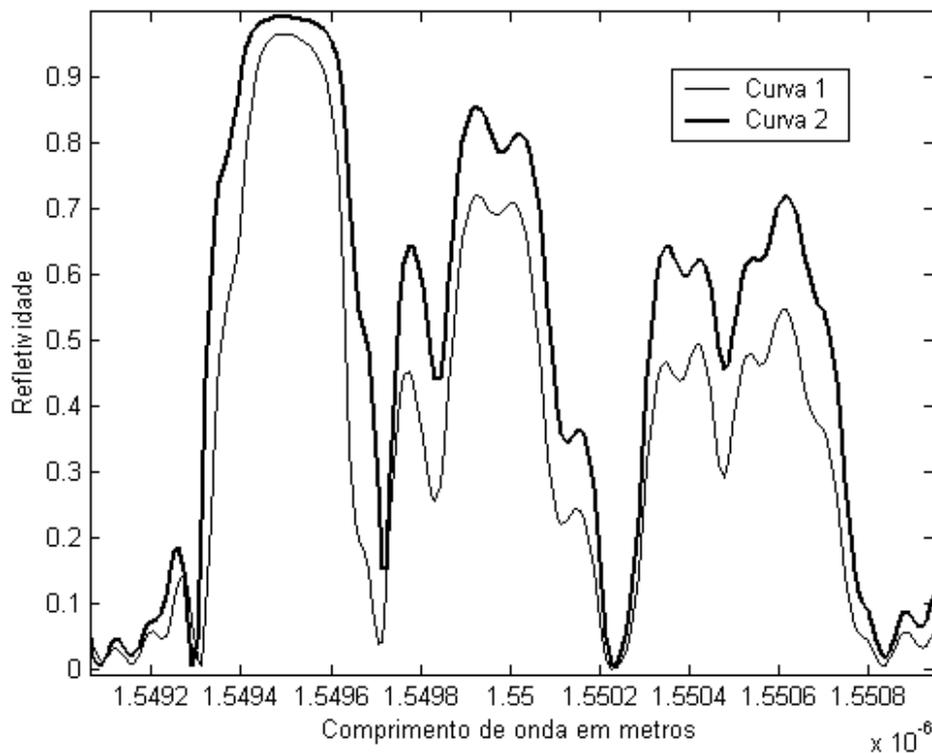


Figura 4.7: Curvas de refletividade de uma grade obtida pela sobreposição de três outras de amplitudes desiguais crescentes e comprimentos desiguais decrescentes.

Através desses exemplos, fica claro que é realmente possível controlar a posição, largura e amplitude dos picos de máxima refletividade. O problema é que o único aspecto dos picos que pode ser controlado com alguma precisão é o

comprimento de onda no qual são centrados. A amplitude e largura de banda são de fato influenciados pela amplitude de perturbação e comprimento das componentes, porém o resultado da sobreposição dificilmente será como planejado. Para grades fracas de comprimentos longos (elevada seletividade), o controle feito apenas através das amplitudes das componentes pode gerar respostas satisfatórias, quando se deseja picos esparsos de largura de banda reduzida [14]. Porém, se for o desejo obter grades com curvas de refletividade contínuas, formadas por aglomerações de picos, ou, simplesmente, grades curtas adequadas ao modelo de multicamadas, será obrigatório o uso de alguma técnica de otimização. Nesta dissertação propõe-se, nesse caso, a aplicação do algoritmo genético, por todas as justificativas mostradas no Capítulo 1.

#### **4.3. ALGORITMOS GENÉTICOS SERIAIS (NÃO PARALELOS)**

Nesta seção serão mostrados alguns exemplos de projetos de grades obtidos através de algoritmos genéticos. Ao todo serão mostrados 6 projetos seriais. Todos os projetos utilizaram essencialmente o mesmo procedimento de seleção e os mesmos operadores genéticos, com os mesmos parâmetros do exemplo simples introdutório do Capítulo 1 (Tabela 1.2). A implementação de todos os algoritmos genéticos seriais foi feita utilizando a linguagem C++, compilados através do programa Visual C++ 6.0 e executados em um computador PC AMD Duron de 850 MHz com o sistema operacional Windows 2000. A diferença entre os exemplos residiu apenas no tipo de codificação, o número de amostras utilizadas no procedimento de avaliação da FO (seção 2.4) e o uso ou não do mecanismo de redução do número de amostras MRA (subseção 2.4.1). A Tabela 4.3 mostra como estão organizados os projetos desta seção em relação a estas diferenças.

Tabela 4.3: Relação dos projetos seriais e diferenças a cerca do tipo de codificação, número de amostras e utilização do MRA.

Projeto	Tipo de codificação	Número de amostras	MRA utilizado?	
1	Grade 1	Convencional: grades em fibra	200	Não
	Grade 2	Convencional: grades em fibra	20	Sim
2	Sobreposição de grades		20	Sim
3	Sobreposição de grades		20	Sim
4	Convencional: filmes finos		20	Sim
5	Sobreposição de grades		20	Sim
6	Sobreposição de grades		20	Sim

Para o projeto 1 foram criadas duas grades diferentes executando o AG com um número diferente de amostras; ora não utilizando, ora utilizando o MRA. Comparando as duas grades obtidas esperas-se comprovar os efeitos positivos do MRA na melhoria do desempenho geral do AG.

Na Tabela 4.3, as codificações convencionais baseadas no modelo das seções uniformes e no modelo de filmes finos referem-se às estratégias de codificação mostradas respectivamente nas seções 3.2 e 3.3. A codificação por sobreposição de grades refere-se à estratégia de codificação mostrada na seção 3.4.

#### 4.3.1. Codificação real baseada no modelo das seções uniformes

##### 4.3.1.1. Projeto 1

O Projeto 1 consiste de uma grade projetada para operar na janela de 1.549  $\mu\text{m}$  a 1.551  $\mu\text{m}$  com reflexão total entre 1.5495  $\mu\text{m}$  a 1.5505  $\mu\text{m}$ , e com refletividade nula fora dessa banda, conforme mostrado na Figura 4.8. O comprimento dessa grade deve ser exatamente 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 ( $\nu$ ) deve ser menor ou igual a  $10^6$  para todas as 100 seções que formam a grade (cada seção terá um comprimento de  $100 \mu\text{m}$ ). O comprimento de onda de projeto ( $I_D$ ) nestas condições deve coincidir com o comprimento de onda para o qual a refletividade é máxima ( $I_{max}$ ), ou seja,  $I_D = 1.55 \mu\text{m}$ , de acordo com [4]. O valor escolhido para o índice de refração efetivo ( $n_{ef}$ ) é 1.45. O único parâmetro que será otimizado será a visibilidade de franjas de cada seção, parâmetro que poderá variar de forma que o produto  $\Delta n_{ef} \times \nu$  não extrapole o intervalo  $[0; 10^{-3}]$ . Para satisfazer as especificações do Projeto 1, o AG foi acionado duas vezes gerando duas grades diferentes. A primeira grade gerada (grade 1) utilizou 200 amostras para comparar as curvas de refletividade dentro processo de avaliação realizado pela função objetivo. A segunda grade (grade 2) utilizou o mecanismo de redução de amostras, o que permitiu reduzir o número de amostras para apenas 20. A Figura 4.8 mostra as curvas de refletividade de ambas as grades obtidas através do AG após 4000 gerações. A evolução da saúde em função dos números das gerações é mostrada na Figura 4.9. Porém, a eficiência superior do AG com o mecanismo de redução de amostras ativado pode ser observada completamente através da Figura 4.10, onde a variável saúde é mostrada em relação ao tempo de processamento em segundos, e não em relação ao número das gerações. A grade 1 foi obtida em pouco mais de 8 horas, enquanto a grade 2 foi obtida em pouco mais de 1 hora e meia, embora a grade 2 tenha alcançado um nível de saúde muito superior. De fato, a grade 2 apresenta uma curva de refletividade melhor embora o AG tenha utilizado muito menos amostras no procedimento de cálculo do valor de saúde realizado pela FO. A explicação para esse fenômeno está na utilização do MRA, que é capaz de melhorar a precisão da FO, como se muito mais do que 20 amostras tivessem sido utilizadas. O MRA utiliza amostras diferentes (igualmente espaçadas) em cada geração. Assim, como os indivíduos não alteram consideravelmente de uma geração para outra, o MRA acaba promovendo uma avaliação progressiva à medida que 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.

A Figura 4.11 mostra as curvas de amplitude de variação do índice de refração em função do comprimento das duas grades obtidas usando 200 e 20 amostras. É interessante notar que a solução obtida pelo AG utilizando o MRA aproxima-se de uma das melhores soluções proposta em [4]: uma grade cuja amplitude de variação de índice varia segundo um formato co-seno levantado. A Figura 4.12 compara a refletividade da grade 2 com a refletividade de uma grade seguindo um perfil co-seno levantado, a qual de fato possui lóbulos laterais pelo menos dez vezes menores do que a grade obtida pelo AG. Porém, como pode ser visto na Figura 4.11, a grade 2 é pelo menos 2 mm mais curta do que a grade co-seno levantado. Além disso, como pode ser visto na Figura 4.12, a transição de mínima para máxima refletividade nas bordas da banda é mais rápida para a grade sintetizada pelo AG. Essa característica concede a grade 2 um aspecto de banda mais ajustada ao intervalo no qual a refletividade deve ser 100%.

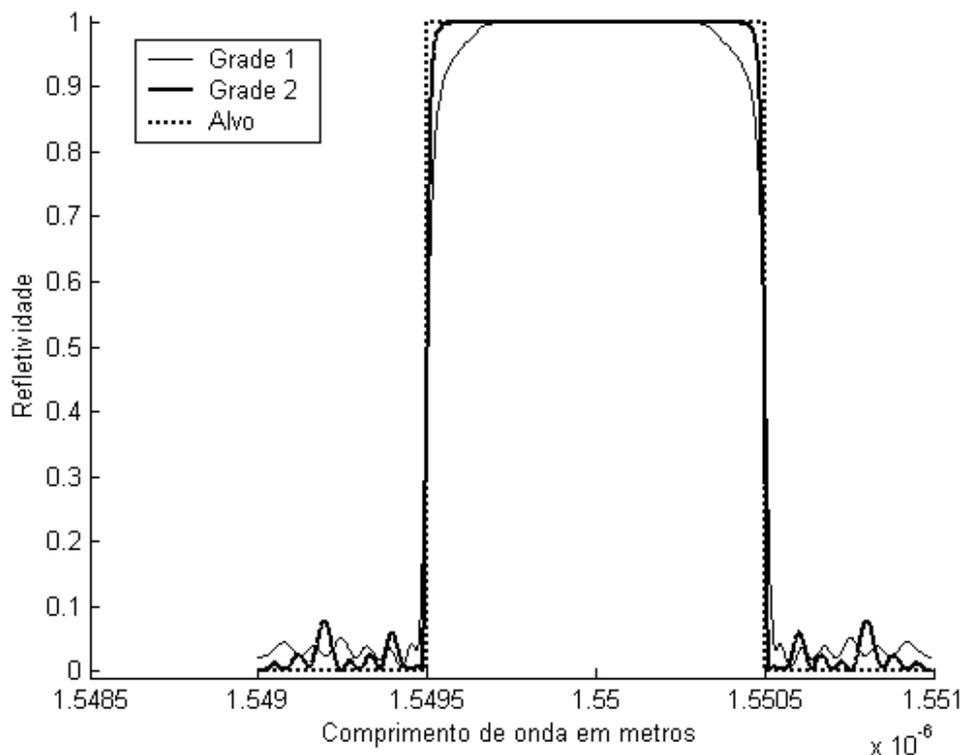


Figura 4.8: Curvas de refletividade em função do comprimento de onda obtida para o Projeto 1.

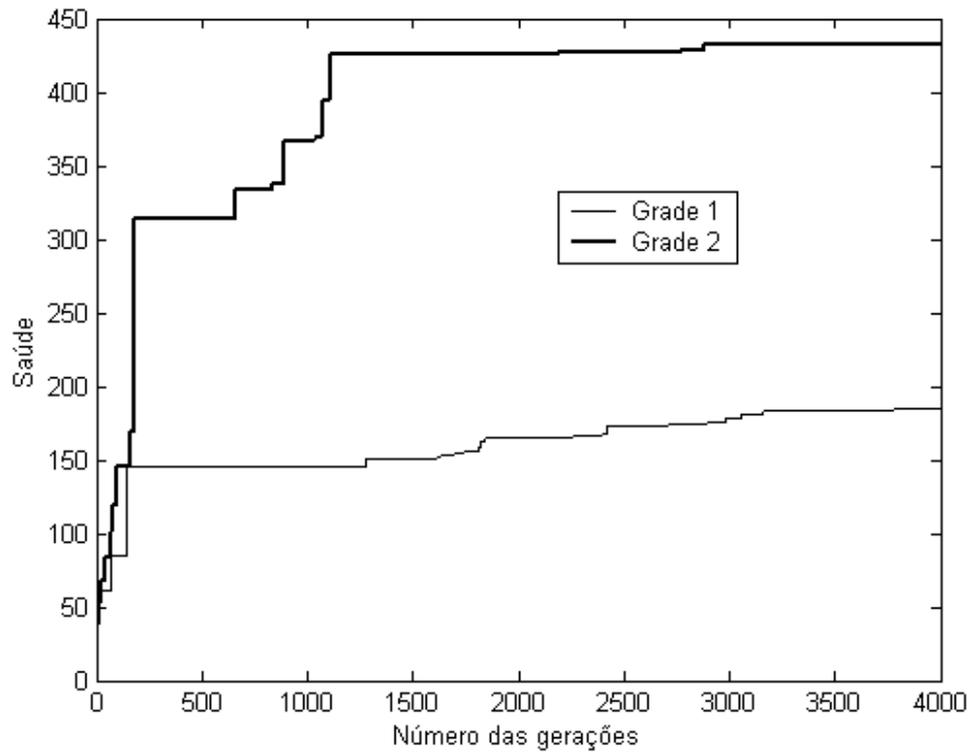


Figura 4.9: Evolução da saúde em função dos números das gerações para o Projeto 1.

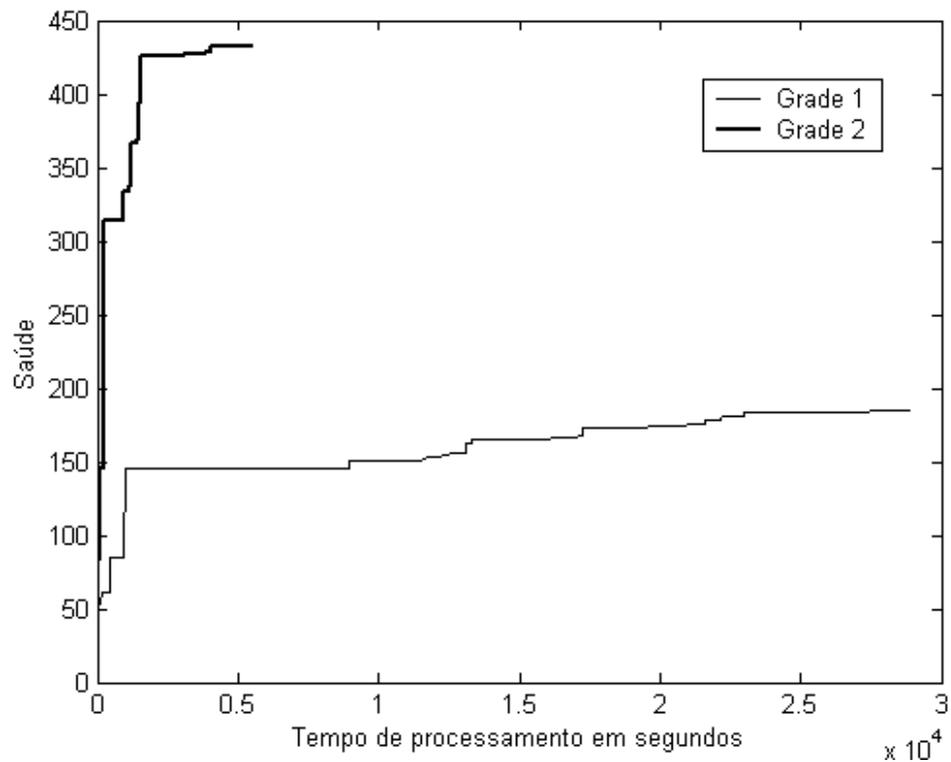


Figura 4.10: Evolução da saúde em função do tempo de processamento para o Projeto 1.

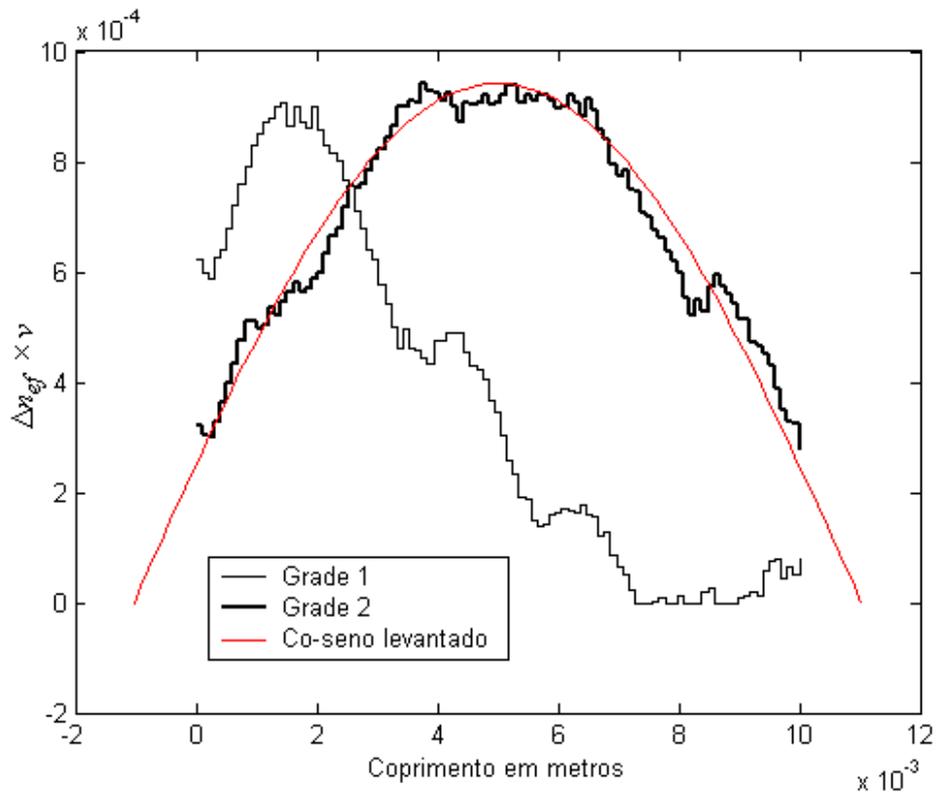


Figura 4.11: Perfis de  $\Delta n_{ef} \times \nu$  para as grades 1 e 2 comparadas a um perfil co-seno levantado.

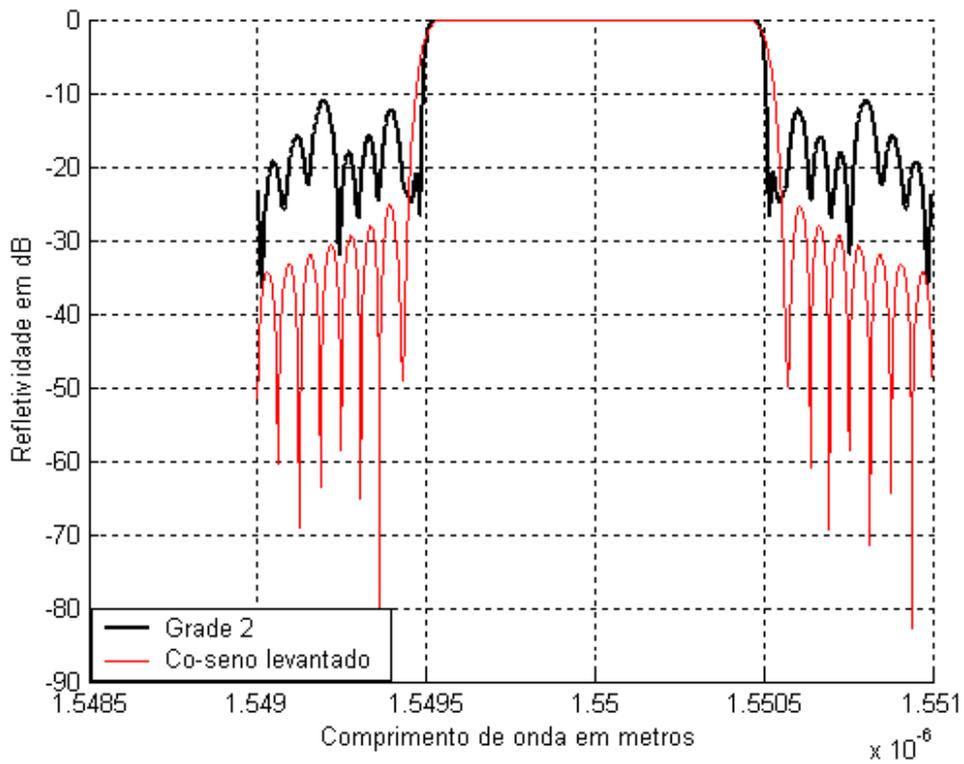


Figura 4.12: Comparação entre a refletividade da Grade 2 e a refletividade de uma grade de perfil co-seno levantado.

### 4.3.2. AG utilizando codificação baseada na sobreposição de grades e modelo das seções uniformes

#### 4.3.2.1. Projeto 2

Este projeto tem como objetivo obter uma grade que satisfaça as mesmas exigências de refletividade impostas ao Projeto 1. O comprimento da grade deve ser também de 1 cm. A variação média do índice de refração também deve ser próxima de zero ( $\Delta n_{ef} = 10^{-9}$ ) e a visibilidade de franjas ( $v$ ) deve ser no menor ou igual a  $10^6$  para todas as seções que formam a grade. O valor escolhido para o índice de refração efetivo ( $n_{ef}$ ) é 1.45. A grade gerada pelo AG é resultado da sobreposição de três grades componentes, cujos comprimentos de onda de projeto localizam-se no intervalo de 1.549 a 1.551  $\mu\text{m}$ . Para cada componente foram otimizados o comprimento de onda de projeto ( $I_D$ ) e a amplitude de perturbação ( $A$ ). Embora  $A$  seja nada mais que o produto  $\Delta n_{ef} \times v$ , a aproximação de uma grade gerada através de sobreposição para o modelo de seções uniformes é uma grade uniforme em relação a  $\Delta n_{ef}$  e  $v$ ; e não uniforme em relação ao período de perturbação do índice de refração ( $\Lambda$ ). O perfil para  $\Delta n_{ef} \times v$  pouco influencia a posição dos picos de máxima refletividade, embora influencie a relação entre a refletividade dos lóbulos principais e laterais. De acordo com [4], um dos formatos mais adequados para o produto  $\Delta n_{ef} \times v$  é o co-seno levantado, como mostrado na Figura 4.11. Portanto, esse será o perfil escolhido para o Projeto 2. O AG utilizando codificação baseada em sobreposição de grades ficará incumbido de calcular apenas os valores de  $\Lambda$  para cada seção da grade. A Figura 4.13 mostra a refletividade obtida para grade após 1000 gerações, juntamente com a curva do alvo. A Figura 4.14 mostra a evolução da saúde em função do tempo de processamento em segundos. A Figura 4.15 mostra os valores do comprimento de onda de projeto ( $I_D = 2n_{ef}\Lambda$ ) para cada seção em função do comprimento da grade. Finalmente, a Figura 4.16 compara a refletividade entre a grade obtida para o Projeto 2 e a refletividade de uma

grade co-seno levantado pura, com  $I_D = 1.55 \mu\text{m}$  para todas as seções e comprimento total da grade exatamente igual ao comprimento da grade sintetizada (1 cm).

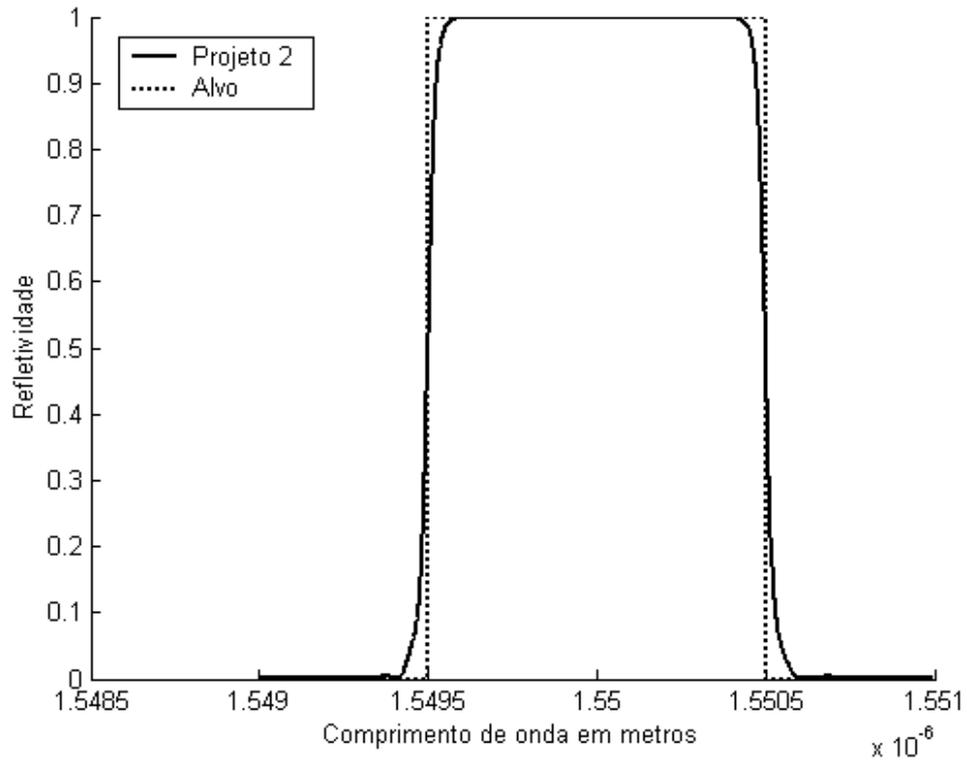


Figura 4.13: Curva de refletividade em função do comprimento de onda comparada com o alvo.

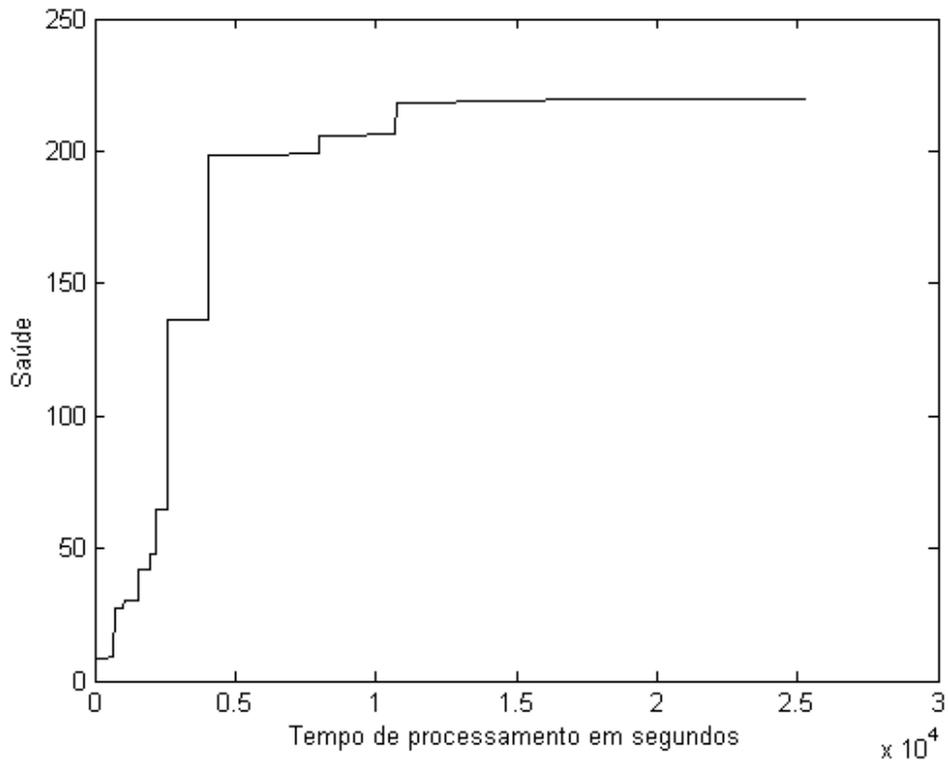


Figura 4.14: Evolução da saúde em função do tempo de processamento.

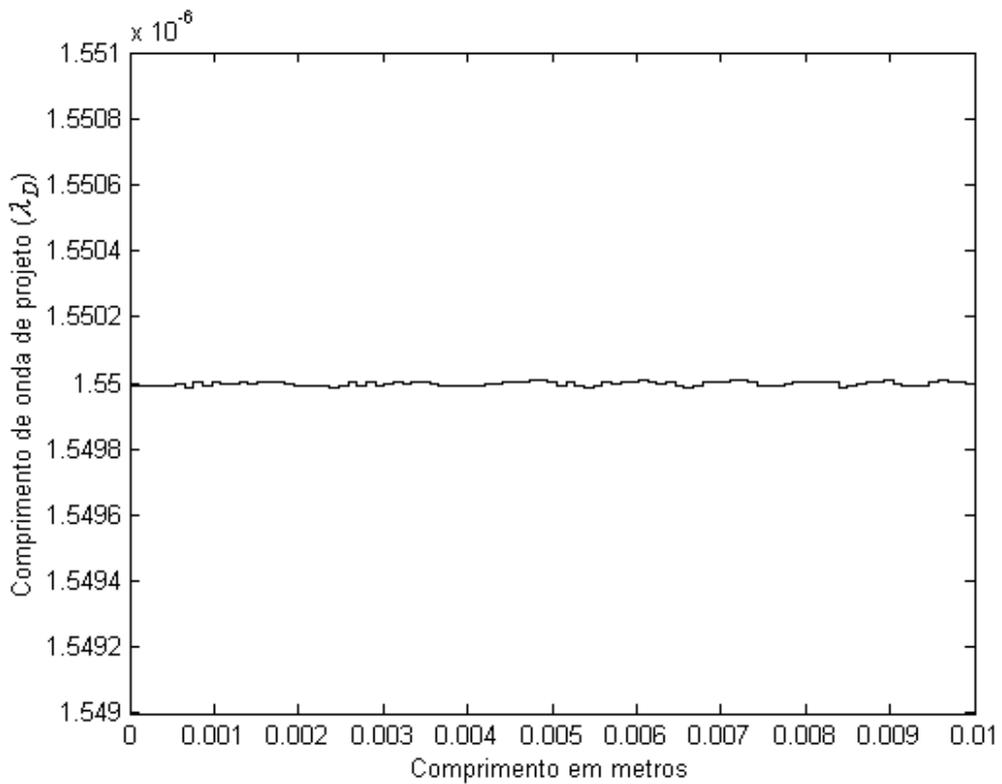


Figura 4.15: Comprimento de onda de projeto (em metros) para as seções ao longo da grade.

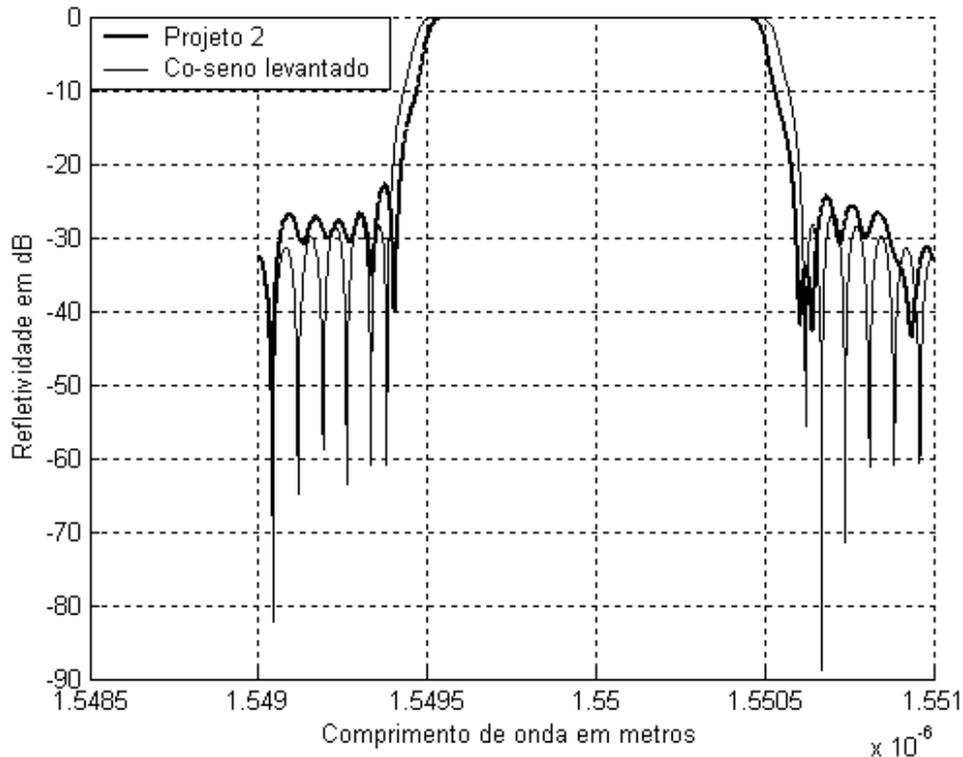


Figura 4.16: Comparação entre a refletividade da grade obtida para o Projeto 2 e a refletividade de uma grade de perfil co-seno levantado.

Como mostrado na Figura 4.15, o comprimento de onda de projeto para todas as seções convergiu praticamente para o mesmo valor utilizado no Projeto 1. Embora a grade sintetizada tenha o perfil co-seno levantado, a leve oscilação da curva da Figura 4.15 foi suficiente para modificar a resposta espectral, o que pode ser comprovado através da Figura 4.16. Os comprimentos de onda onde ocorrem as quedas de 3 dB coincidem com os limites impostos pela curva alvo, o que não acontece com a grade co-seno levantado com  $I_D = 1.55 \mu\text{m}$  absolutamente constante para todas as seções.

Mesmo utilizando o mecanismo de redução de amostras (apenas 20 amostras), o desempenho computacional do AG utilizando codificação de sobreposição de grades foi pior do que o AG utilizado no Projeto 1, sem o mecanismo de redução do número de amostras (conforme pode ser visto analisando-se as figuras 4.10 e 4.14). Esse comportamento já era esperado (seção 3.4), uma vez que boa parte do tempo de processamento foi gasto no procedimento de conversão (decodificação) da grade codificada em termos de

componentes para o modelo das seções uniformes. Comparando as figuras 4.10 e 4.14, constata-se que o tempo necessário para processar essa conversão é maior que o tempo necessário para se calcular a própria curva de refletividade da grade.

#### 4.3.2.2. Projeto 3

Como mostrado em [4], as grades que possuem apenas um pico de máxima refletividade são particularmente fáceis de se projetar e não é absolutamente necessário empregar algoritmos genéticos para obtê-las. Os projetos simples mostrados serviram apenas para confirmar a eficácia do AG aplicado na síntese de grades de Bragg, haja vista as soluções “ótimas” já serem bastante conhecidas para esses casos. Resta demonstrar a capacidade do AG para síntese de grades menos convencionais. Exatamente por isso este projeto não é um filtro rejeita-faixa como os projetos anteriores, mas um filtro passa-faixa. Agora a grade deve transmitir (ao invés de refletir) toda a luz entre os comprimentos de onda de 1.5495 a 1.5505  $\mu\text{m}$  e refletir (ao invés de transmitir) toda a luz fora deste intervalo e na faixa de comprimentos de onda que vai de 1.549 a 1.551  $\mu\text{m}$ . O número de componentes utilizadas foi de apenas 2, cujos comprimentos de onda de projeto ( $I_D$ ) puderam variar dentro da faixa total de otimização (de 1.549 a 1.551  $\mu\text{m}$ ). Os comprimentos das componentes ( $L$ ) também foram alvo de otimização, ficando limitados ao intervalo de 1 mm a 1 cm. Além de  $I_D$  e  $L$ , a amplitude de cada componente também foi otimizada, de forma que a amplitude total da grade resultante se mantivesse menor ou igual a  $1 \times 10^{-3}$  (para todas as seções  $\Delta n_{ef} = 1 \times 10^{-9}$  e  $\nu \leq 1 \times 10^6$ ). Assim como para o Projeto 2, a formatação da amplitude de perturbação do índice de refração da grade final (após ter sido convertida para o modelo das seções uniformes) também segue o formato co-seno levantado.

A Figura 4.17 mostra a curva de refletividade da grade obtida pelo AG após 1000 gerações, juntamente com a curva de alvo. A Figura 4.18 mostra a evolução da saúde do melhor indivíduo da população em função do tempo de

processamento. A Figura 4.19 mostra os valores do comprimento de onda de projeto ( $I_D = 2n_{ef}\Lambda$ ) para cada seção em função do comprimento da grade. Por fim, a Figura 4.20 mostra a refletividade da grade sintetizada em um gráfico em escala em dB.

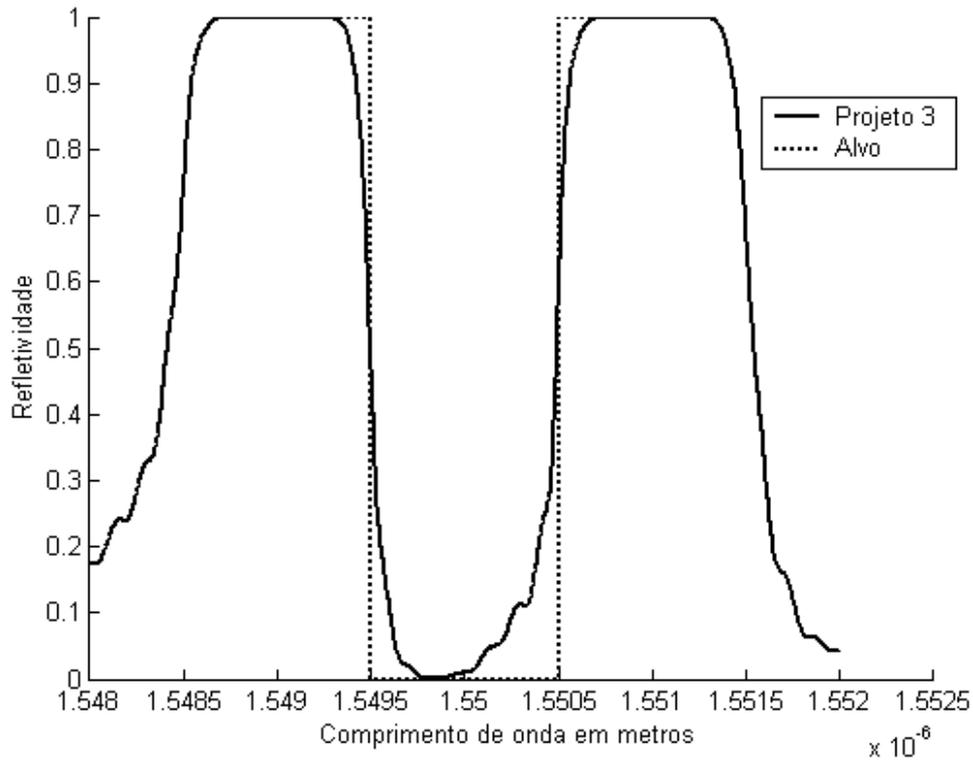


Figura 4.17: Curva de refletividade em função do comprimento de onda comparada com o alvo.

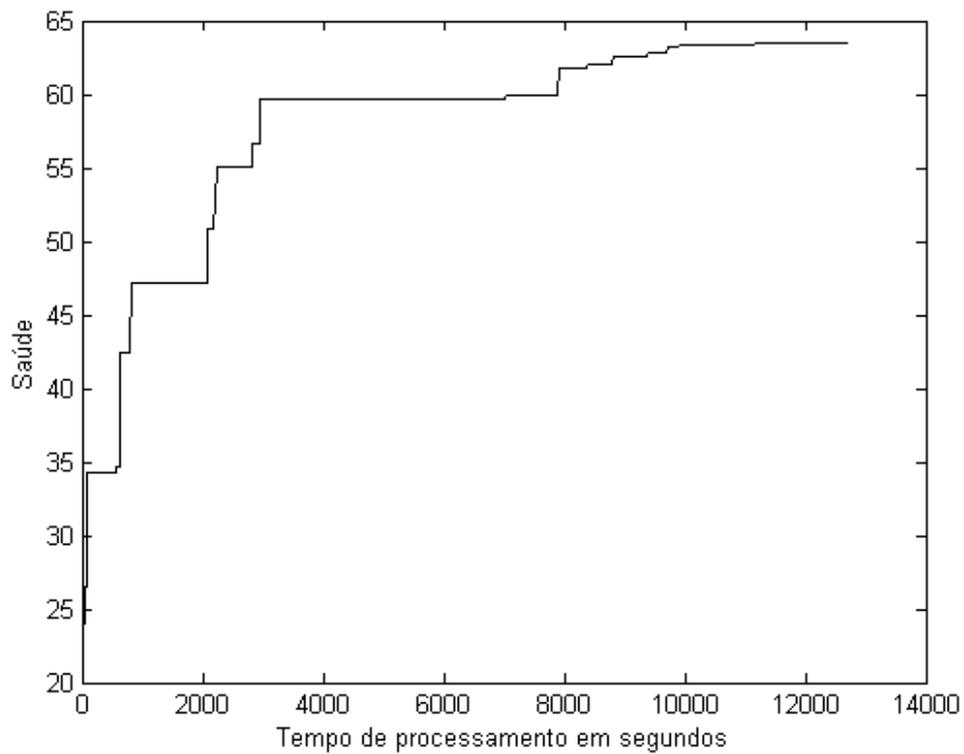


Figura 4.18: Evolução da saúde em função do tempo de processamento.

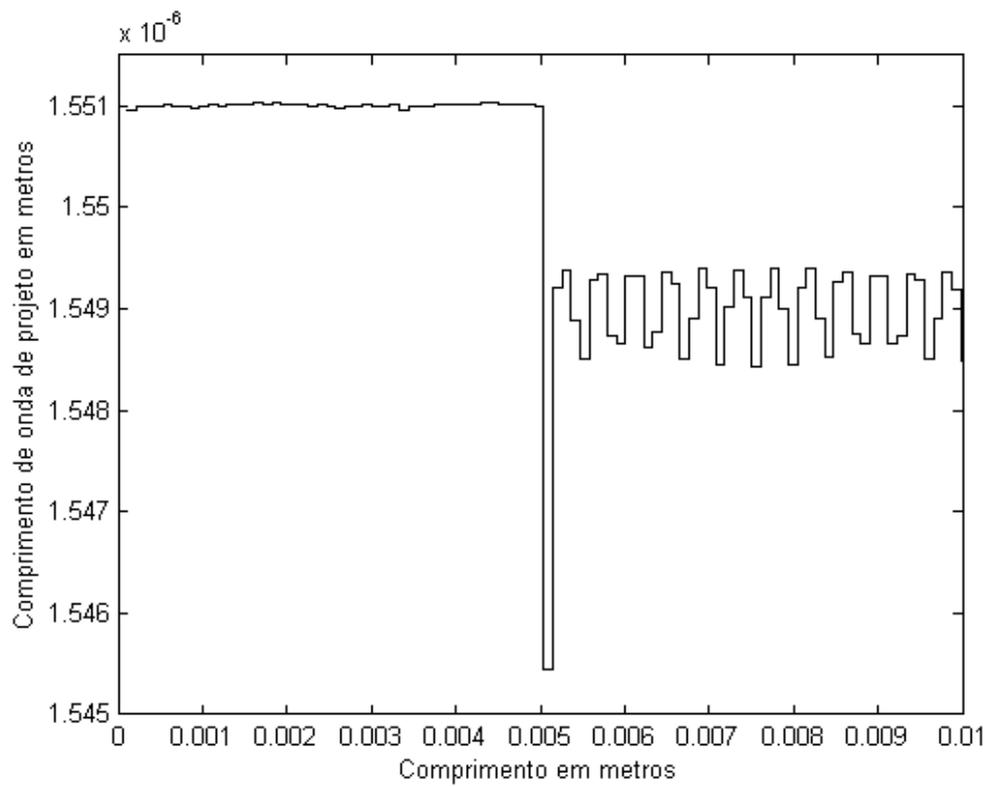


Figura 4.19: Comprimento de onda de projeto para as seções ao longo da grade.

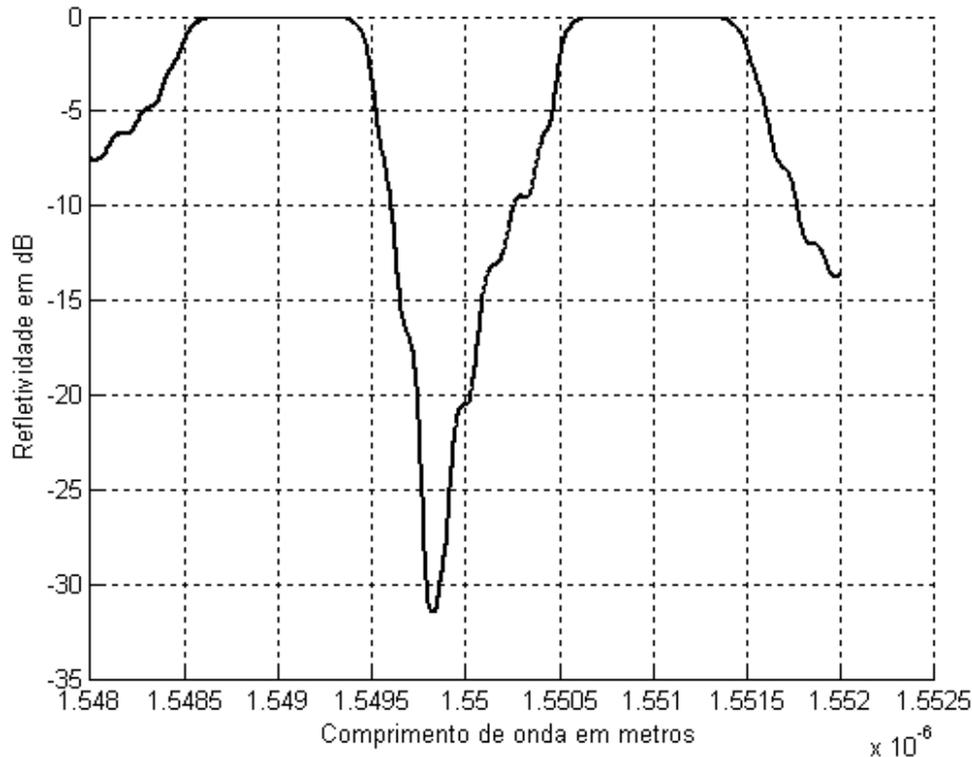


Figura 4.20: Curva de refletividade em dB para o Projeto 3.

A Figura 4.17 mostra claramente que, para um intervalo de comprimentos de onda mais amplo do que o definido pela curva alvo (que vai de 1.549  $\mu\text{m}$  a 1.551  $\mu\text{m}$ ), a grade pode ser entendida também como um filtro rejeita faixas em duas regiões: em torno de 1.549 e 1.551  $\mu\text{m}$ . Estes foram justamente os valores finais de  $I_D$  para as duas grades componentes utilizadas na codificação por sobreposição.

Comparando as figuras 4.18 e 4.14 constata-se que o tempo de processamento necessário para o Projeto 3 foi a metade do tempo necessário para processamento do Projeto 2. Essa grande diferença se explica pelo fato do Projeto 2 utilizar 3 grades componentes para a codificação por sobreposição, apenas uma componente a mais que o Projeto 3. Portanto, constata-se que o desempenho do procedimento de decodificação do AG não só depende do comprimento da grade como também do número de grades componentes utilizadas na codificação.

### 4.3.3. AG utilizando codificação real para síntese de grades de filmes finos

#### 4.3.3.1. Projeto 4

Para esse projeto deseja-se obter um filtro capaz de refletir toda a luz no intervalo de comprimentos de onda entre 0.5 e 0.55  $\mu\text{m}$  (aproximadamente a cor verde do espectro visível). Fora desse intervalo e ao longo da faixa que vai de 0.4  $\mu\text{m}$  a 0.65  $\mu\text{m}$  a grade deve permitir a passagem de luz. Os materiais disponíveis para o projeto possuem índices de refração 1.72 e 1.87, cujos valores são considerados invariáveis em função do comprimento de onda. Como não serão utilizados valores de índice de refração intermediários a 1.72 e 1.87, será utilizada a seguinte regra para obtenção da grade a partir de um cromossomo: caso o gene que define o valor do índice de alguma camada em particular seja maior ou igual a 0.5, o valor adotado será de 1.87; caso seja menor que 0.5, o valor adotado será 1.72. O número de camadas foi fixado em 25 e a grade está imersa no ar. As espessuras das camadas podem variar dentro do intervalo de 0.05 a 0.1  $\mu\text{m}$ , portanto o comprimento total da grade será no mínimo 1.25  $\mu\text{m}$  e no máximo 2.5  $\mu\text{m}$ . A incidência da luz na primeira camada da grade será sempre normal.

A Figura 4.21 compara a refletividade para uma grade obtida após 4000 gerações com a refletividade de uma grade de Bragg equivalente, isto é, uma grade constituída com o mesmo número de camadas, dos mesmos materiais alternados, mas com espessuras ópticas de 1/4 do comprimento de onda onde o pico de máxima refletividade está centrado (em 0.525  $\mu\text{m}$ ). A curva de alvo também é mostrada nesta figura. A Figura 4.22 mostra a evolução da saúde em função do tempo computacional em segundos. A Figura 4.23 mostra o perfil de índices de refração em função do comprimento da grade. Finalmente, a Figura 4.24 compara a curva de refletividade da grade de 1/4 de comprimento de onda com a curva de refletividade da grade sintetizada em uma escala em dB.

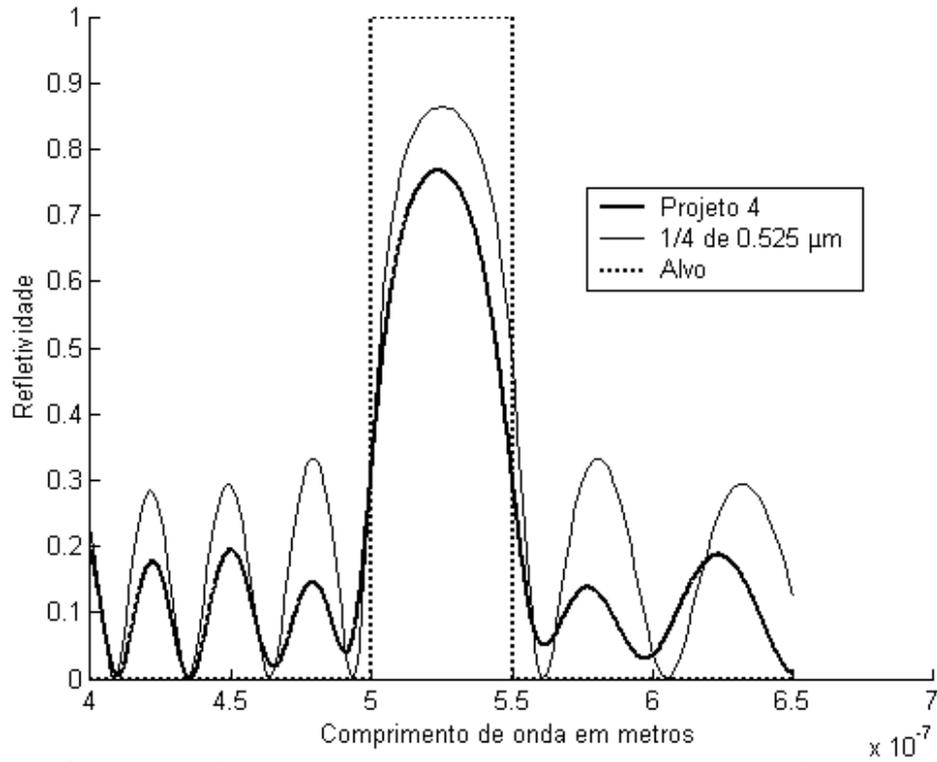


Figura 4.21: Curvas de refletividade da grade sintetizada, de uma grade de Bragg equivalente e a curva de alvo.

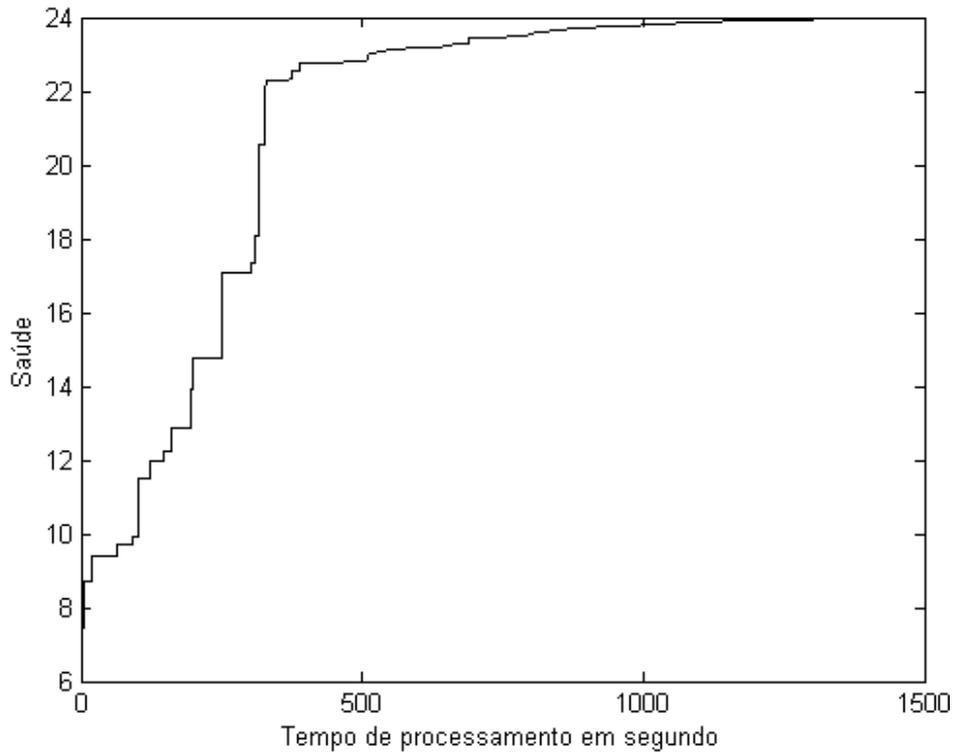


Figura 4.22: Evolução da saúde em função do tempo de processamento.

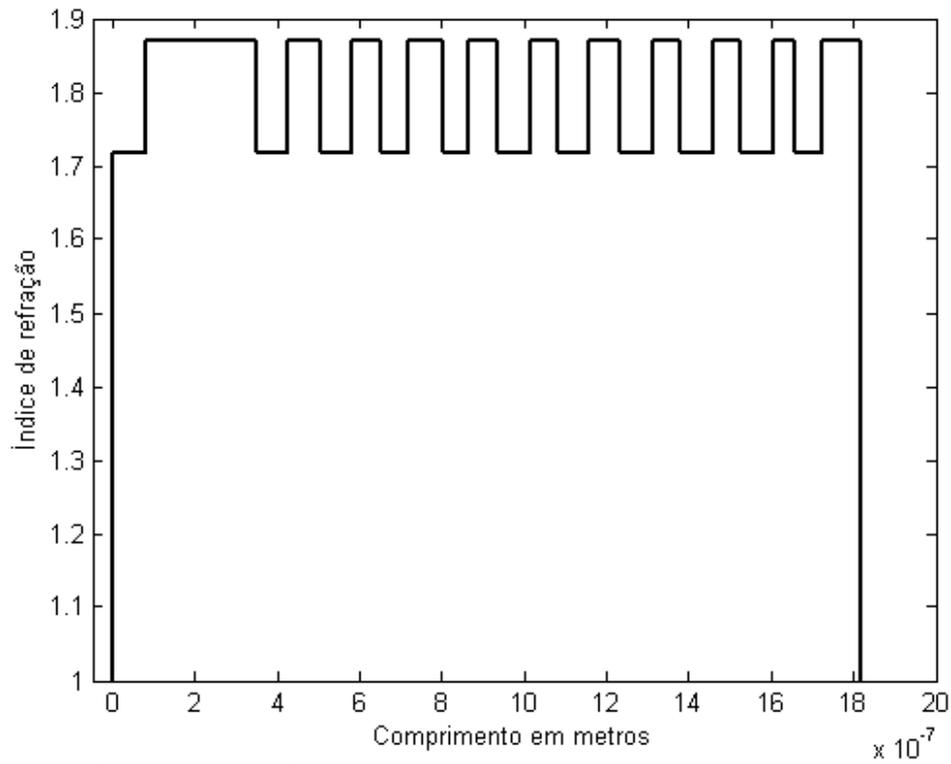


Figura 4.23: Perfil de índice de refração para o Projeto 4.

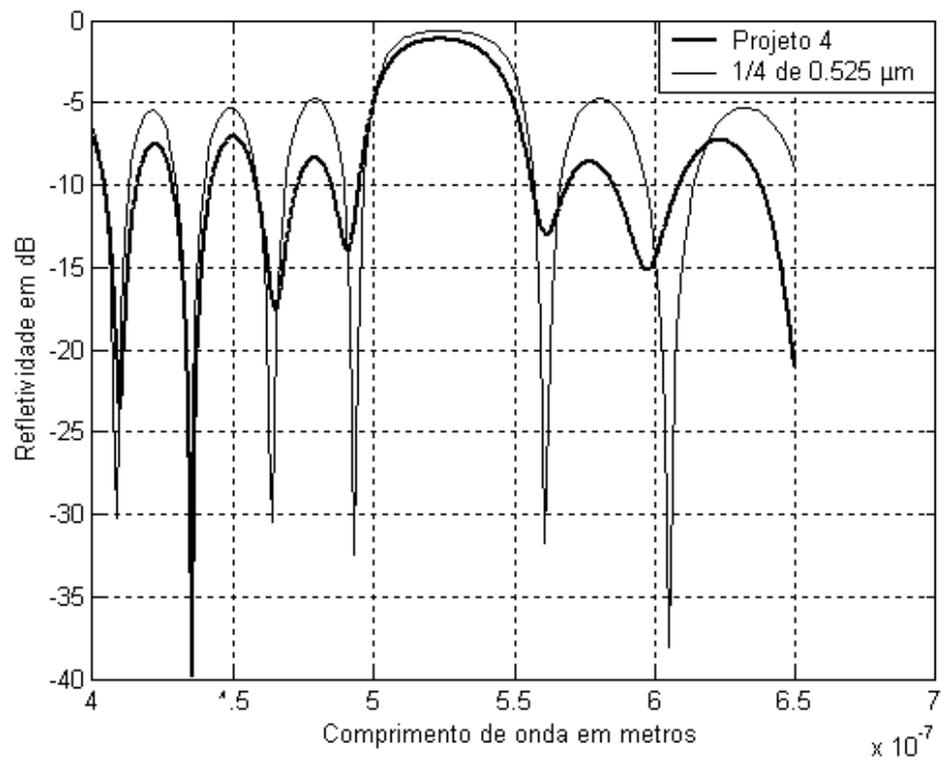


Figura 4.24: Curvas de refletividade em dB para a grade sintetizada e para a grade de Bragg equivalente.

Como pode ser observado através da Figura 4.21, o AG foi capaz de sintetizar uma grade melhor do que uma grade de Bragg de camadas de  $1/4$  de comprimento de onda. Embora a refletividade dentro da faixa de  $0.5$  a  $0.55 \mu\text{m}$  seja menor para o Projeto 4, a refletividade dos lóbulos laterais são menores, quando comparado com a refletividade do lóbulo principal. Essa característica fica ainda mais evidente através Figura 4.24.

Outro aspecto interessante a cerca da grade obtida para este projeto reside no formato do perfil de índice de refração. De acordo com a Figura 4.23, estão faltando 2 camadas das 25 fixadas para o projeto. De fato existem 25, porém 3 delas estão como que “soldadas” em uma única grande camada (camadas contíguas de mesmo índice de refração). De certa forma esse fenômeno funciona como uma forma de otimização do número de camadas, além da otimização dos valores do índice de refração e das espessuras.

#### **4.3.4. AG utilizando codificação por sobreposição de grades para síntese de grades de filmes finos**

##### **4.3.4.1. Projeto 5**

Este projeto utiliza a mesma curva de alvo e materiais que o projeto anterior, incluindo o meio no qual a grade estará imersa e o ângulo de incidência da luz. A diferença está no tipo de codificação do AG utilizado para sintetizar a grade. O Projeto 4 empregou a codificação real simples e direta dos parâmetros das 25 camadas estabelecidas. Porém, para este projeto foi utilizada a codificação por sobreposição de grades. Dentro da faixa de comprimentos de onda de  $0.4$  a  $0.65 \mu\text{m}$ , 100 componentes foram dispostas igualmente espaçadas quanto aos seus comprimentos de onda de projeto. Com as posições espectrais fixadas, restou ao AG otimizar a amplitude e o comprimento de cada componente. Os valores máximo e mínimo para as amplitudes das componentes são irrelevantes, devido os índices de refração serem fixados em  $1.72$  e  $1.87$ . Os

valores dos comprimentos de cada componente podem variar, juntamente com o comprimento total da grade, dentro do intervalo de 1.25 a 2.5  $\mu\text{m}$ .

Para aproximar o perfil de índices contínuo para um perfil discreto (com apenas dois níveis), o valor de índice de refração médio é utilizado como referência: quando a curva de índice se eleva acima da média, o índice de refração é truncado para 1.87; quando a curva cai abaixo da média, o índice é truncado para 1.72. Essa metodologia de aproximação é muito satisfatória, com o único inconveniente de poder gerar eventualmente camadas de espessura muito reduzida. Camadas muito finas na prática podem inviabilizar o processo de fabricação de filtros de filmes finos. Para evitar esse problema, camadas de espessura menor que 50 nm têm o valor de índice de refração invertido, isto é, se o índice é 1.87 torna-se 1.72 e vice-versa. Após isso, a camada invertida é incorporada à camada de mesmo índice de refração anterior ou posterior. Dessa forma a camada resultante provavelmente terá uma espessura de valor maior que o mínimo estabelecido de 50 nm.

A Figura 4.25 mostra a curva de refletividade da grade sintetizada, de uma grade de Bragg equivalente e a curva alvo. A Figura 4.26 compara a evolução da saúde para o Projeto 4 e 5 em função do número das gerações. A Figura 4.27 faz o mesmo, porém em relação ao tempo de processamento. A Figura 4.28 mostra o perfil de índices de refração para a grade sintetizada. Por fim, a Figura 4.29 reúne as curvas de refletividade para as grades do Projeto 4 e 5, além da grade de Bragg equivalente ao Projeto 5.

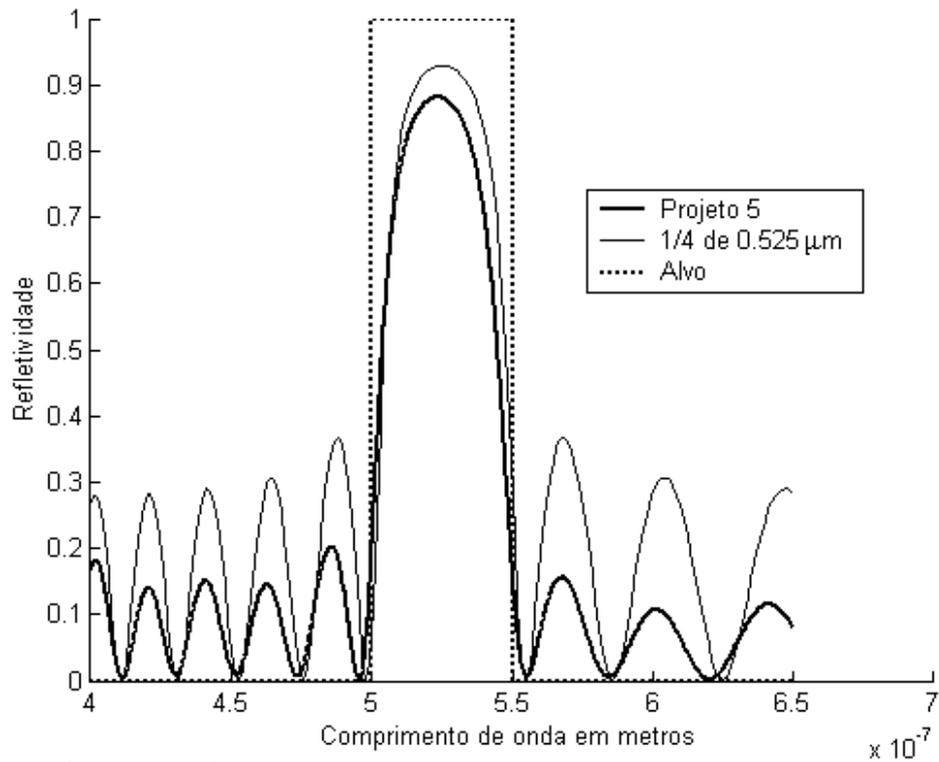


Figura 4.25: Curvas de refletividade da grade do Projeto 5 e de uma grade de Bragg equivalente comparadas à curva alvo.

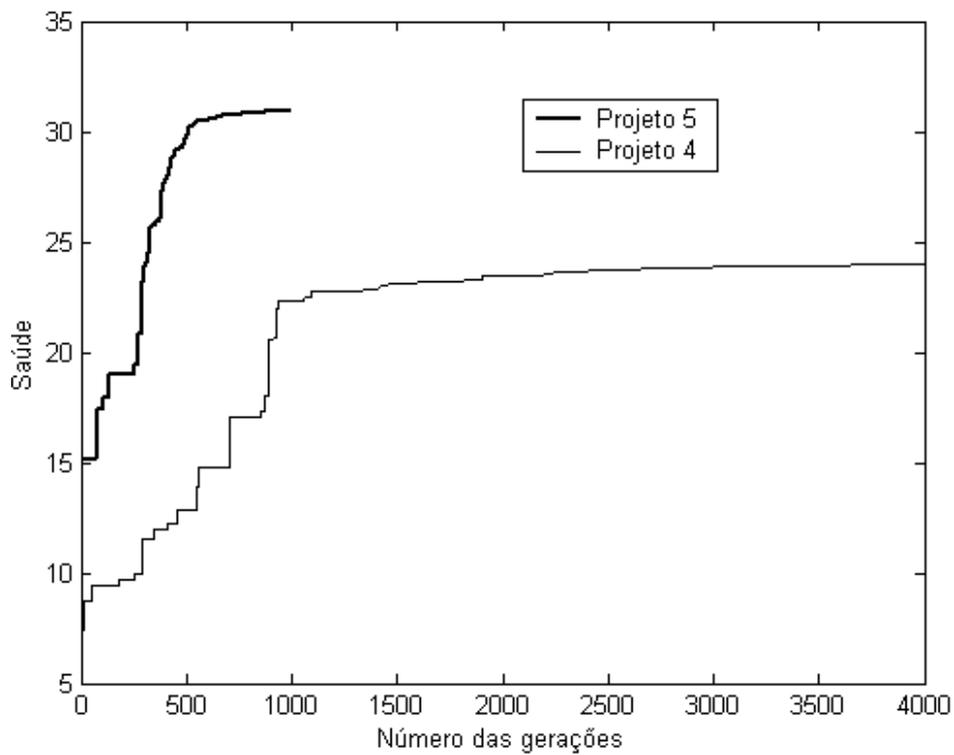


Figura 4.26: Evolução da saúde em função do número das gerações para o Projeto 4 e 5.

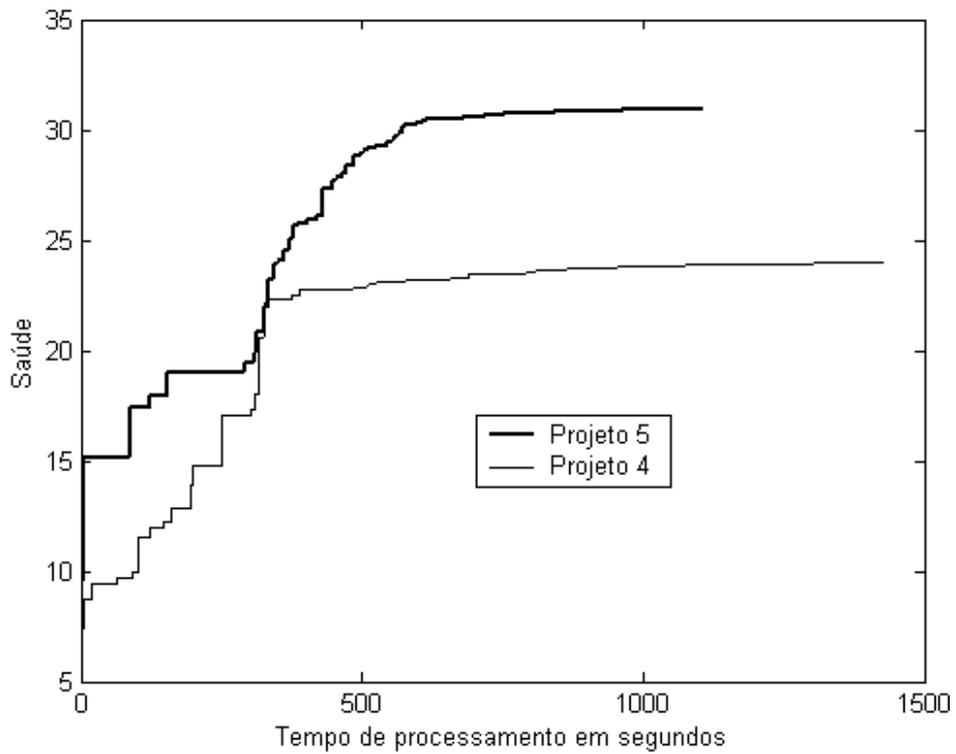


Figura 4.27: Evolução da saúde em função do tempo de processamento para o Projeto 4 e 5.

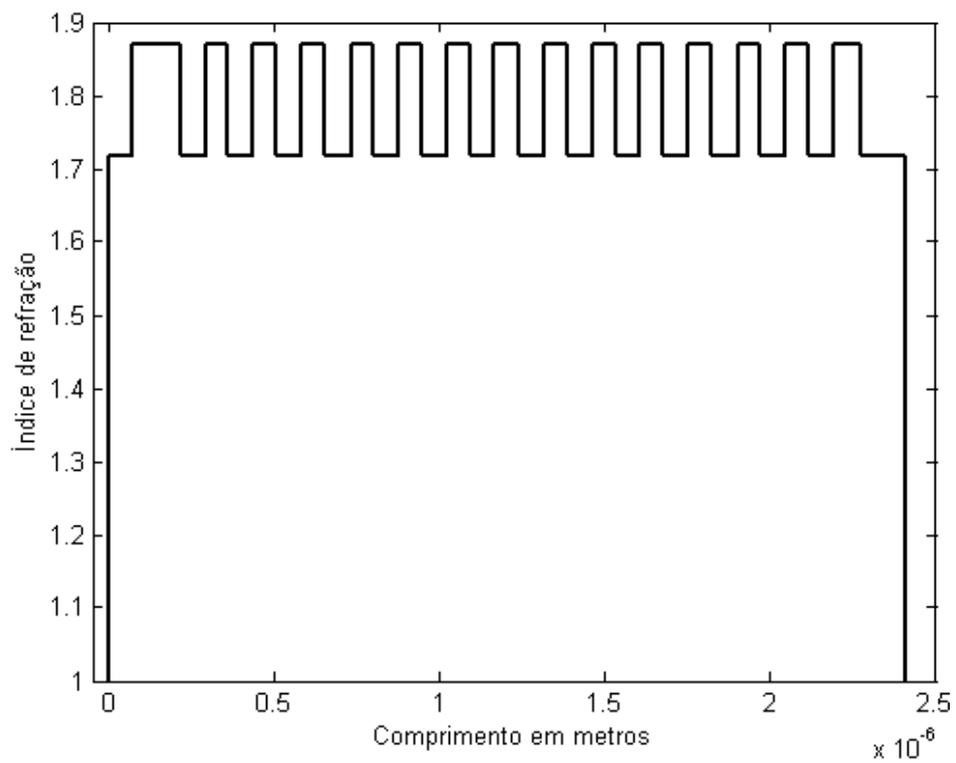


Figura 4.28: Perfil de índice de refração da grade sintetizada para o Projeto 5.

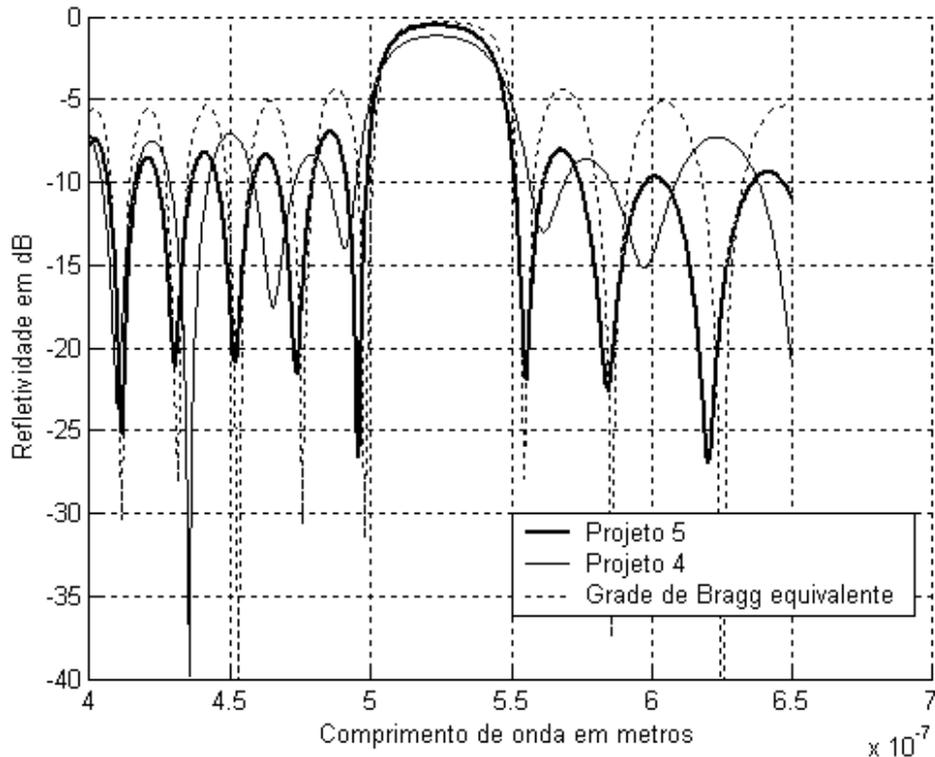


Figura 4.29: Curvas de refletividade para as grades do Projeto 4, 5 e de uma grade de Bragg equivalente ao Projeto 5.

Como pode ser observado através da Figura 4.25, a grade sintetizada pelo AG obteve uma diferença maior de refletividade entre o lóbulo principal e secundários do que a grade de Bragg equivalente. Comparando com o Projeto 4, através as Figura 4.29, o Projeto 5 obteve um nível de refletividade maior para o lóbulo principal do que o Projeto 4, além de uma banda mais ajustada ao intervalo desejado para a máxima refletividade.

A melhor qualidade do filtro reflete-se no valor da saúde, como pode ser constatado através da Figura 4.26. Porém, além que obter um valor de saúde melhor, o AG utilizando a codificação por sobreposição de grades precisou de menos gerações, o que significa claramente uma melhor eficiência do algoritmo. A eficiência computacional do AG para o Projeto 5 também foi melhor do que para o AG do Projeto 4, como pode ser observado através da Figura 4.27. Embora o procedimento de decodificação corresponda a uma perda de tempo de processamento considerável, haja vista terem sido utilizadas 100

componentes para a codificação por sobreposição, foram necessárias muito menos gerações do que o Projeto 4 (3000 gerações a menos).

É interessante notar também que não foi possível definir previamente o número de camadas para a grade, como foi feito para o Projeto 4. Utilizando a codificação por sobreposição, apenas se pode definir o comprimento mínimo e máximo que a grade pode apresentar. O número de camadas, portanto, é mais um característica otimizada pelo AG.

#### 4.3.4.2. Projeto 6

Para comprovar a superioridade do AG utilizando codificação baseada na sobreposição de grades, propõe-se para o Projeto 6 uma grade capaz de refletir 50% da energia luminosa na faixa de comprimentos de onda de 0.4 a 0.5  $\mu\text{m}$  (azul) e 100% na região do espectro que vai de 0.6 a 0.7  $\mu\text{m}$  (vermelho). Entre essas faixas, de 0.5  $\mu\text{m}$  a 0.6  $\mu\text{m}$ , 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  $\mu\text{m}$  a 0.7  $\mu\text{m}$ . A grade deverá operar imersa no ar e sob um ângulo de incidência normal.

Assim como para o Projeto 5, a codificação foi feita com 100 componentes uniformemente espalhadas ao longo de toda a faixa de comprimentos de onda que vai de 0.4  $\mu\text{m}$  a 0.7  $\mu\text{m}$ . Para cada componente foram otimizados sua amplitude e o seu comprimento. O comprimento de cada componente e, conseqüentemente, o comprimento total da grade pode variar de 1.25  $\mu\text{m}$  a 2.5  $\mu\text{m}$ . A espessura mínima permitida para uma camada foi fixada em 50 nm.

A Figura 4.30 mostra a curva de refletividade obtida para a grade sintetizada juntamente com sua curva de alvo. A Figura 4.31 mostra a evolução da saúde em função do tempo de processamento para as 1000 gerações. A Figura 4.32 mostra o perfil de índices de refração da grade.

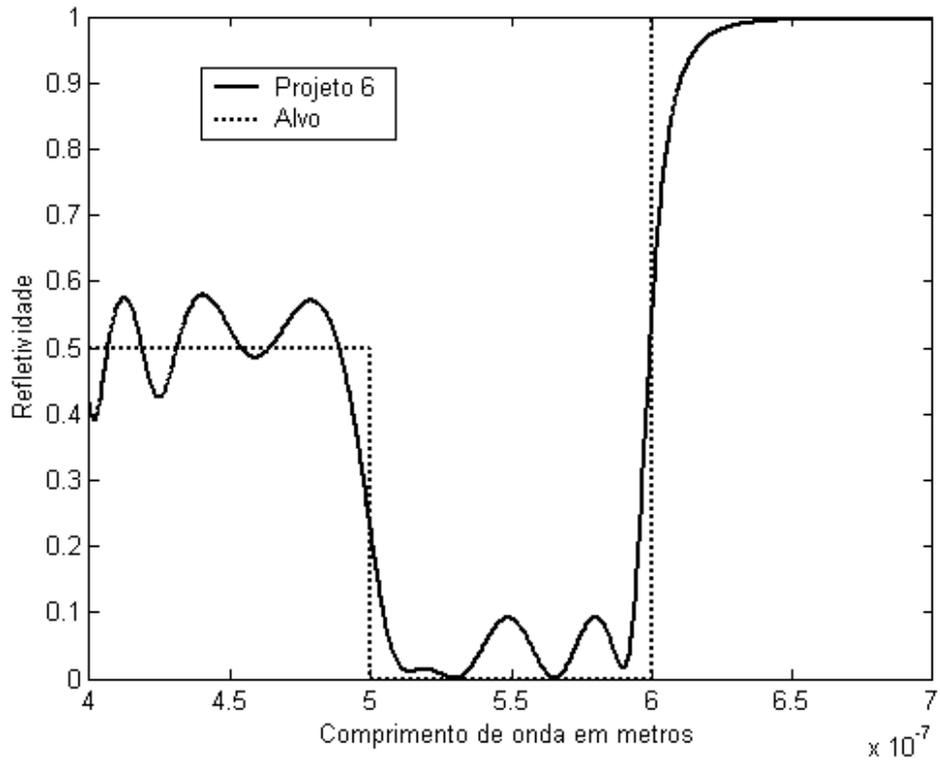


Figura 4.30: Curva de refletividade para o Projeto 6 e curva de alvo.

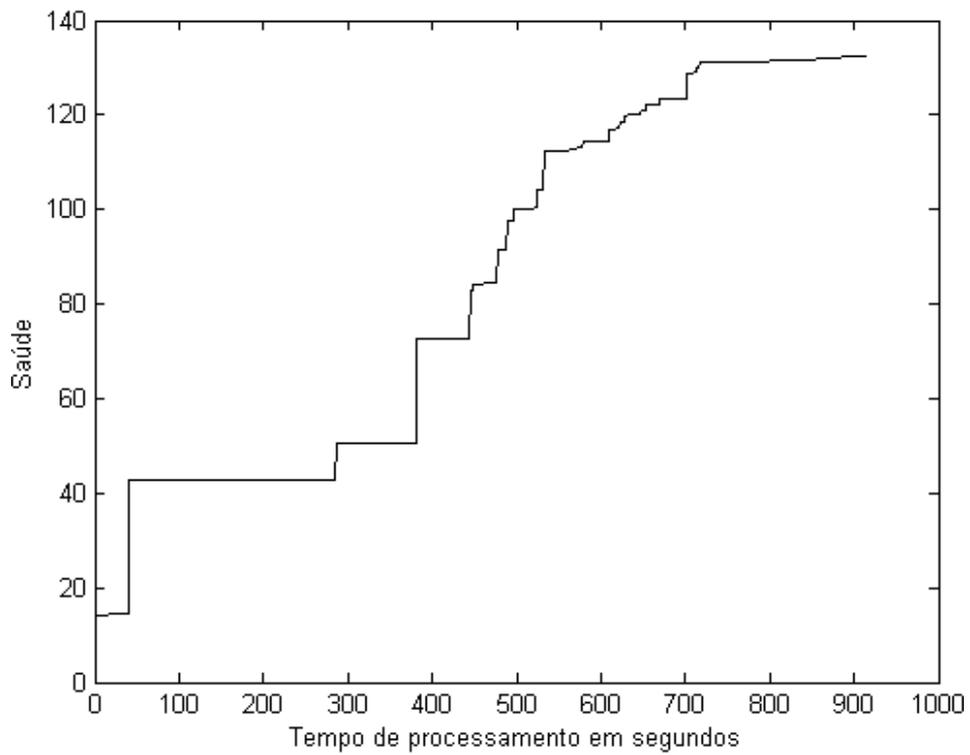


Figura 4.31: Evolução da saúde em função do tempo de processamento em segundos.

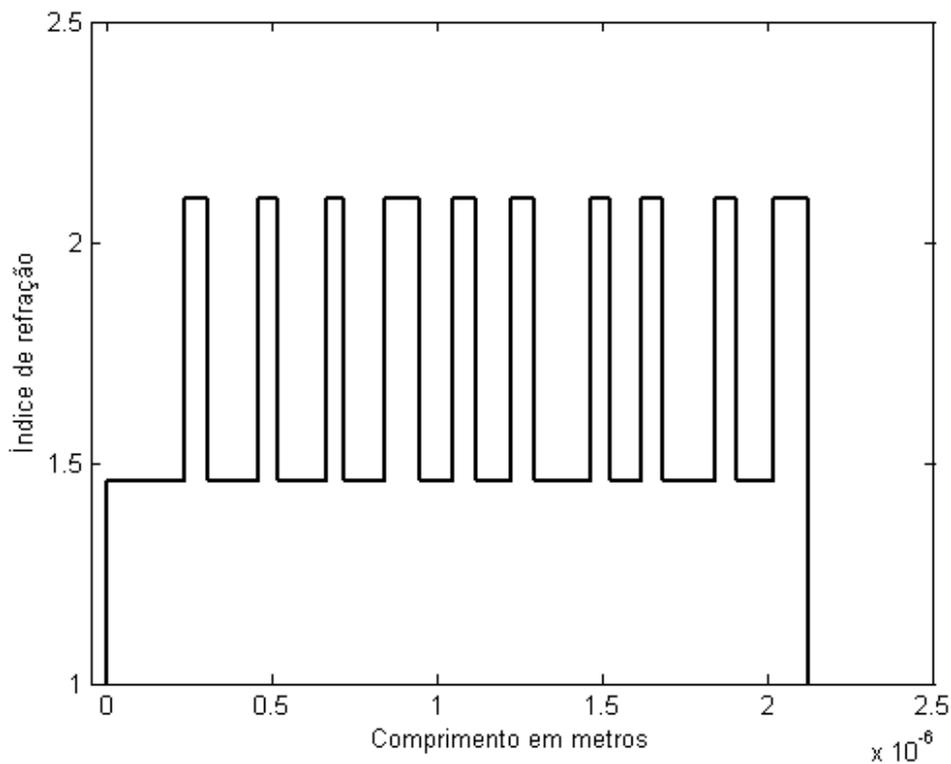


Figura 4.32: Perfil de índices de refração para o Projeto 6.

Este projeto pode ser considerado difícil porque, diferente dos Projetos 4 e 5, as exigências espectrais não podem ser atendidas por uma grade de Bragg simples. O aspecto da curva refletividade observado na Figura 4.30 denuncia dois picos de refletividade mas, mesmo sendo possível projetar grades de Bragg simples cuja curva de refletividade possua de fato dois picos de máxima refletividade, não é possível controlar o valor de refletividade do centro dos picos de forma independente e precisa tal como mostrado na Figura 4.30 [16].

#### 4.4. O AG PARALELO

O AG utilizado nos projetos paralelos a seguir utilizam a codificação real simples baseada no modelo das seções uniformes para grades em fibra (seção 3.2). Diferente do Projeto 1, a otimização será feita sobre os parâmetros  $\Delta n_{ef}$  e  $\Delta z$  de cada seção. Os outros parâmetros que definem cada seção permanecerão constantes. Além dessa diferença no foco da otimização, todos os outros parâmetros são também diferentes, desde os operadores genéticos até o número de indivíduos da população. A Tabela 4.4 mostra os valores dos parâmetros do AG comuns aos dois projetos que serão apresentados nesta seção.

Tabela 4.4: Parâmetros gerais do AG paralelo

Parâmetro	Valor
Número de indivíduos da população ( $K_P$ )	72
Capacidade (em indivíduos) do torneio para seleção competitiva ( $K_S$ )	10
Probabilidade de cruzamento ( $P_C$ )	70%
Probabilidade de mutação ( $P_M$ )	1%
Desvio padrão imposto pela mutação ( $s$ )	10%
Número de amostras utilizadas para o levantamento das curvas de refletividade ( $N$ )	1000

Como pode ser observado na tabela, os parâmetros  $P_M$  e  $s$  foram definidos constantes para todas as gerações, diferente dos projetos mostrados, onde estes parâmetros caem exponencialmente ao longo das gerações. O valor de 10% para  $s$  é relativo ao intervalo de cada parâmetro que deve ser otimizado. O parâmetro  $N$  de valor elevado denuncia a não utilização do mecanismo de redução de amostras MRA.

A máquina paralela utilizada para a aplicação do AG consistiu de um cluster homogêneo de 8 computadores: 7 escravos e 1 mestre. Todos os computadores escravos possuem a mesma configuração de *hardware*: processador AMD Athlon XP 1800+, 1.5 GB de memória RAM e placas de rede de 100 Mbps. O computador mestre se distingue dos escravos por possuir 2

processadores AMD Athlon XP 1800+, 3 GB de memória RAM e 2 placas de rede Gigabit-Ethernet. Todos os computadores estão ligados a um *switch*. O sistema operacional instalado no *cluster* é o linux Red Hat 7.0. A biblioteca de paralelização padrão MPI (*Message Passing Interface*) utilizada foi a LAM.

#### 4.4.1. Projeto 7

O primeiro projeto a ser otimizado através do AG paralelo é a grade de Bragg que deve apresentar refletividade máxima na faixa de comprimentos de onda de 1.5502 a 1.5506  $\mu\text{m}$ . Fora dessa faixa e dentro do intervalo que vai de 1.549 a 1.5512  $\mu\text{m}$ , a grade deverá permitir a máxima passagem de luz. O valor do índice de refração efetivo ( $n_{ef}$ ) utilizado foi 1.45, a visibilidade de franjas ( $\psi$ ) foi constante para todas as seções e igual a 1. O comprimento de onda de projeto utilizado ( $I_D$ ) foi 1.55  $\mu\text{m}$ . O comprimento total da grade foi fixado em 1 cm. Os comprimentos das seções foram restritas intervalo de  $10^{-5}$  a  $10^{-3}$  metros. As variações médias do índice de refração ( $\Delta n_{ef}$ ) das seções foram restritas ao intervalo de 0 a  $4 \times 10^{-4}$ . A refletividade e o perfil para  $\Delta n_{ef}$  são mostrados nas Figuras 4.33 e 4.34, respectivamente. A Figura 4.35 mostra a evolução da saúde em função do número das gerações.

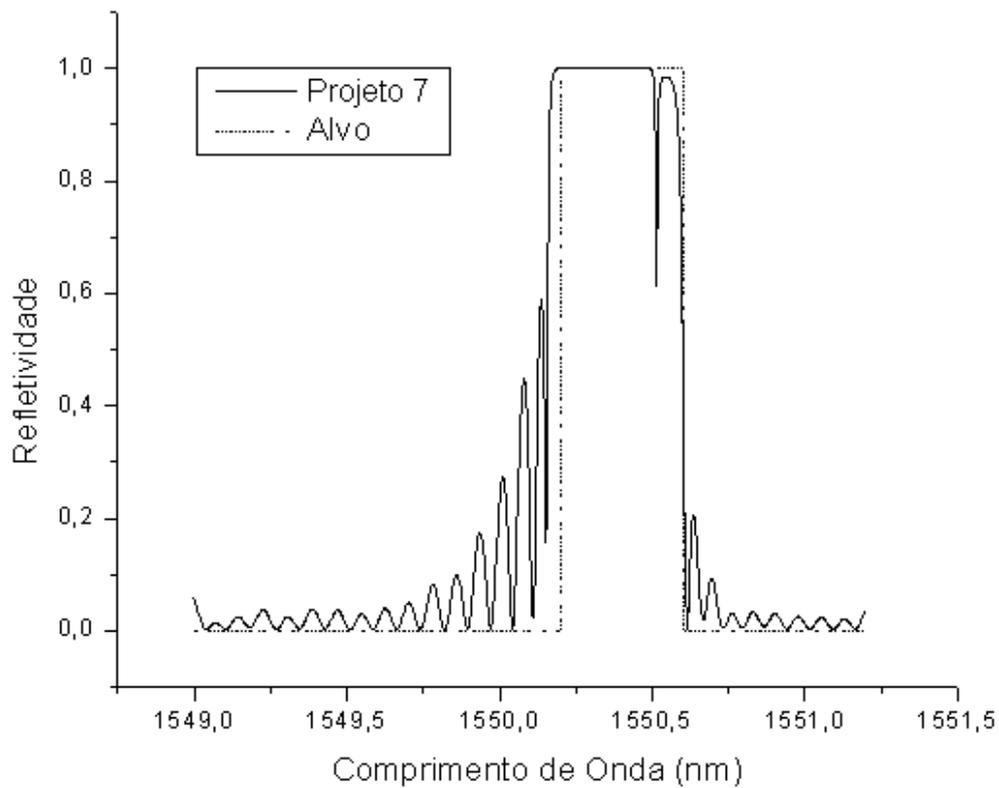


Figura 4.33: Curva de refletividade para a grade do Projeto 7 juntamente com a curva alvo.

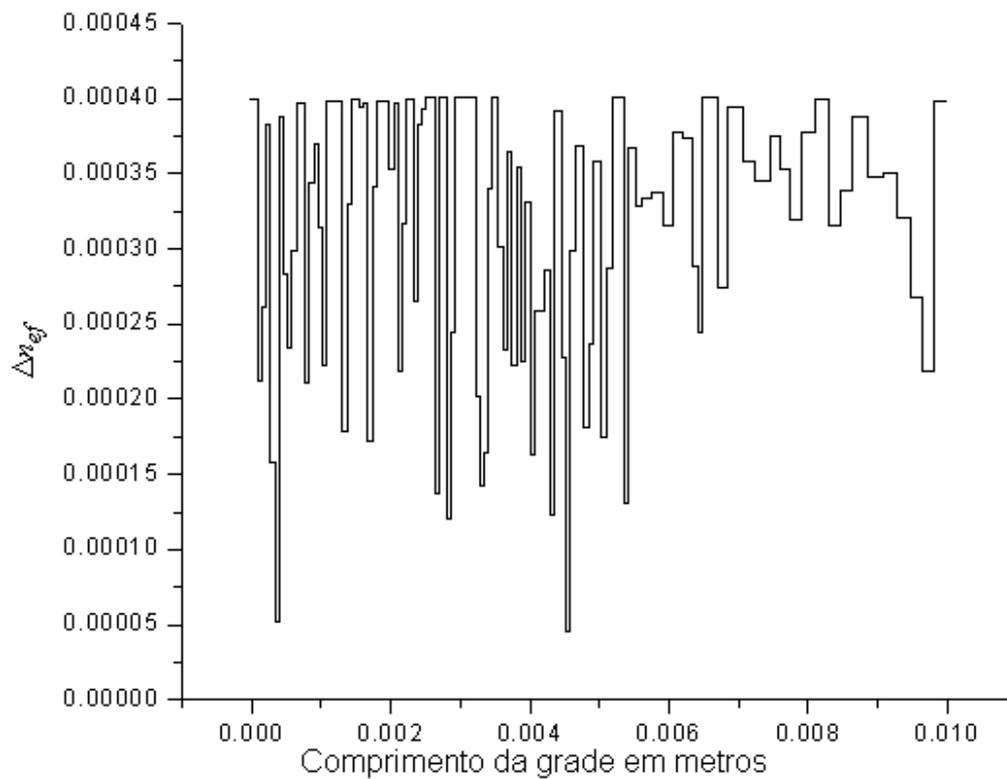


Figura 4.34: Perfil da variação média do índice de refração em função do comprimento da grade.

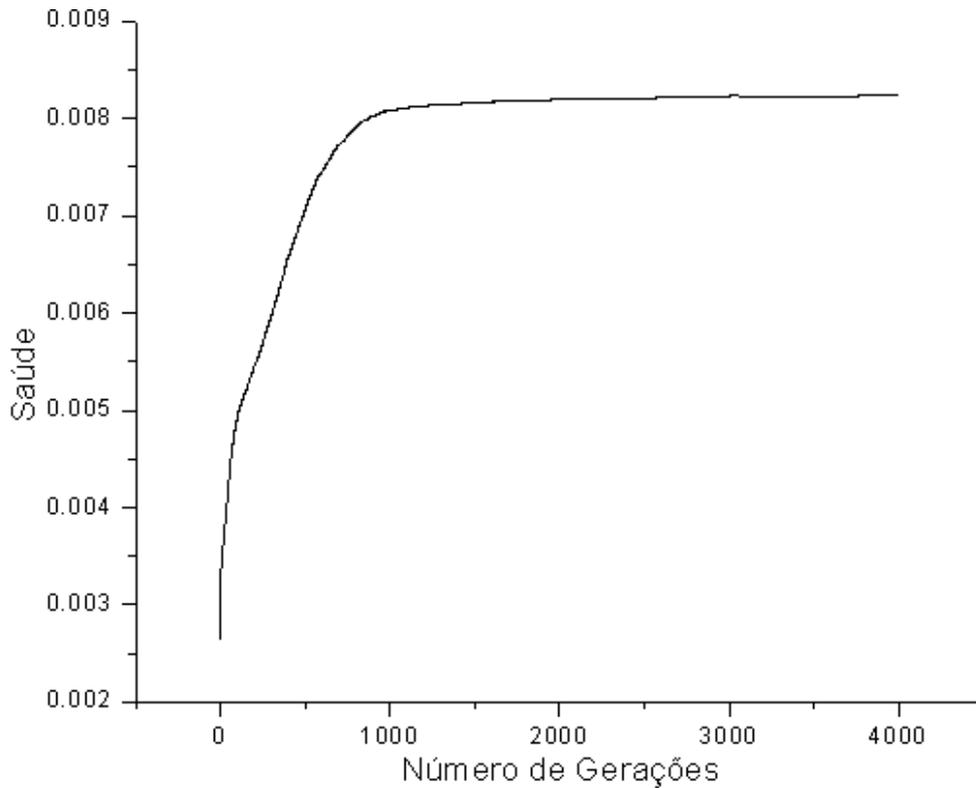


Figura 4.35: Evolução da saúde em função do número das gerações para o Projeto 7.

#### 4.4.2. Projeto 8

Este projeto consiste de uma grade de Bragg que deve apresentar refletividade máxima na faixa de 1.55 a 1.5502  $\mu\text{m}$ . Fora dessa faixa e no intervalo que vai de 1.5497 a 1.5504 a grade deve transmitir a luz incidente. Para todas as seções da grade os parâmetros  $\Delta z$  e  $\Delta n_{ef}$  deverão respeitar respectivamente os intervalos de  $5.34 \times 10^{-5}$  a  $10^{-3}$  e de 0 a  $1.5 \times 10^{-4}$ . O índice de refração efetivo e a visibilidade de franjas para este projeto são os mesmos do Projeto 7, respectivamente 1.45 e 1. A Figura 4.36 mostra a refletividade da grade obtida juntamente com a curva alvo. O perfil para a variação média do índice de refração ( $\Delta n_{ef}$ ) é mostrado na Figura 4.37. Por fim, a Figura 4.38 mostra a evolução da saúde em função do número das gerações.

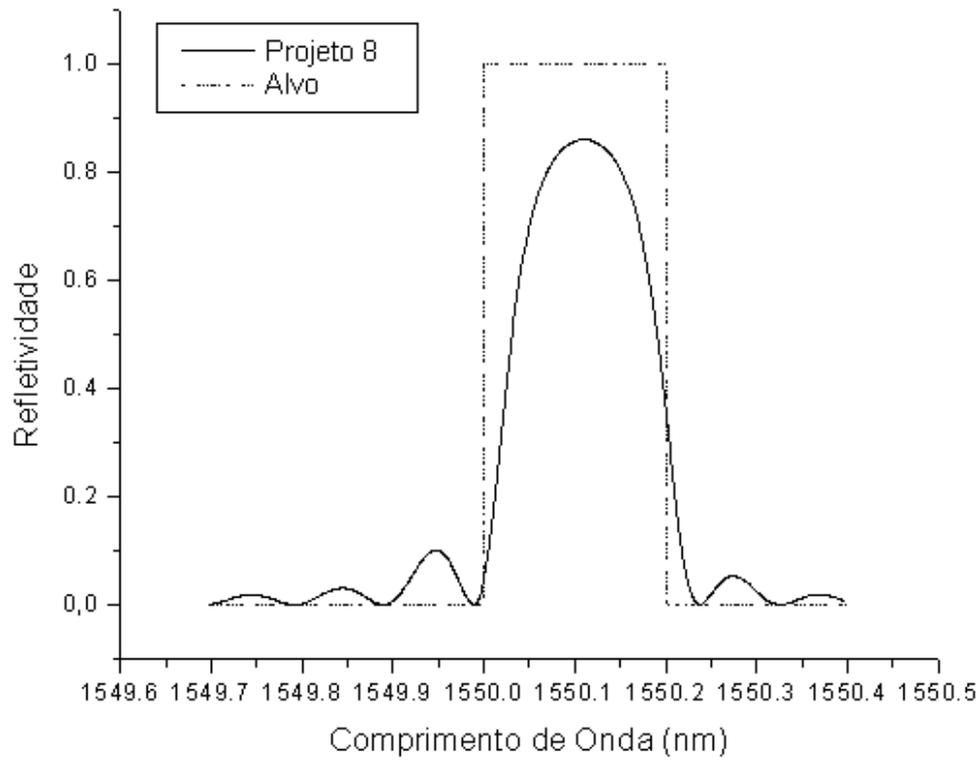


Figura 4.36: Curva de refletividade para a grade do Projeto 8, juntamente com a curva alvo.

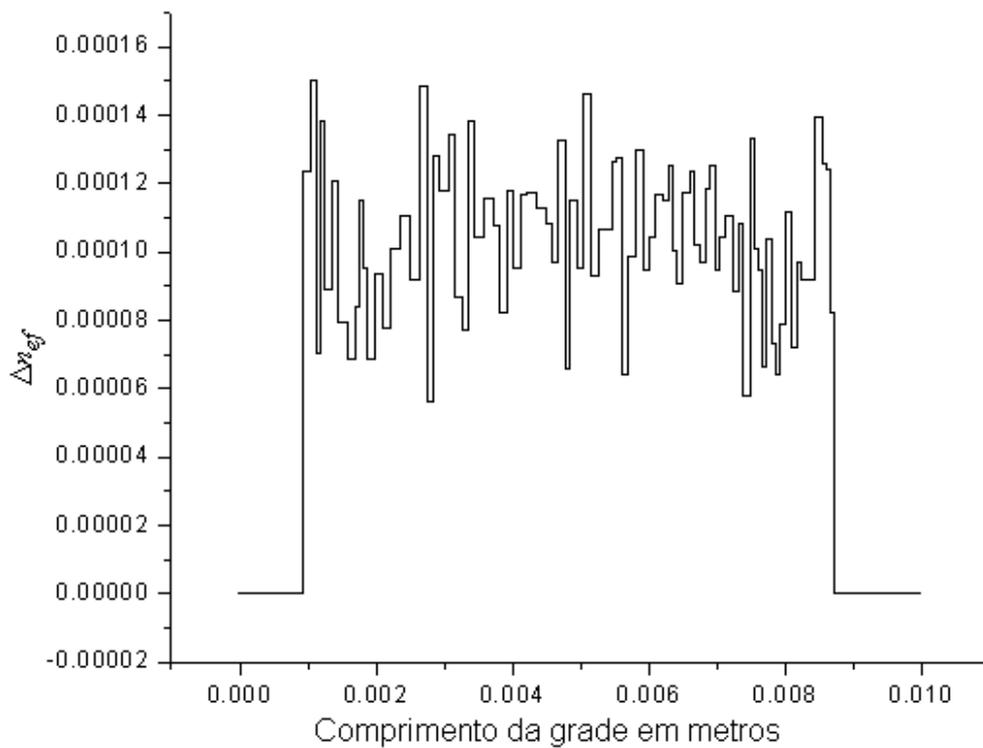


Figura 4.37: Perfil da variação média do índice de refração em função do comprimento da grade.

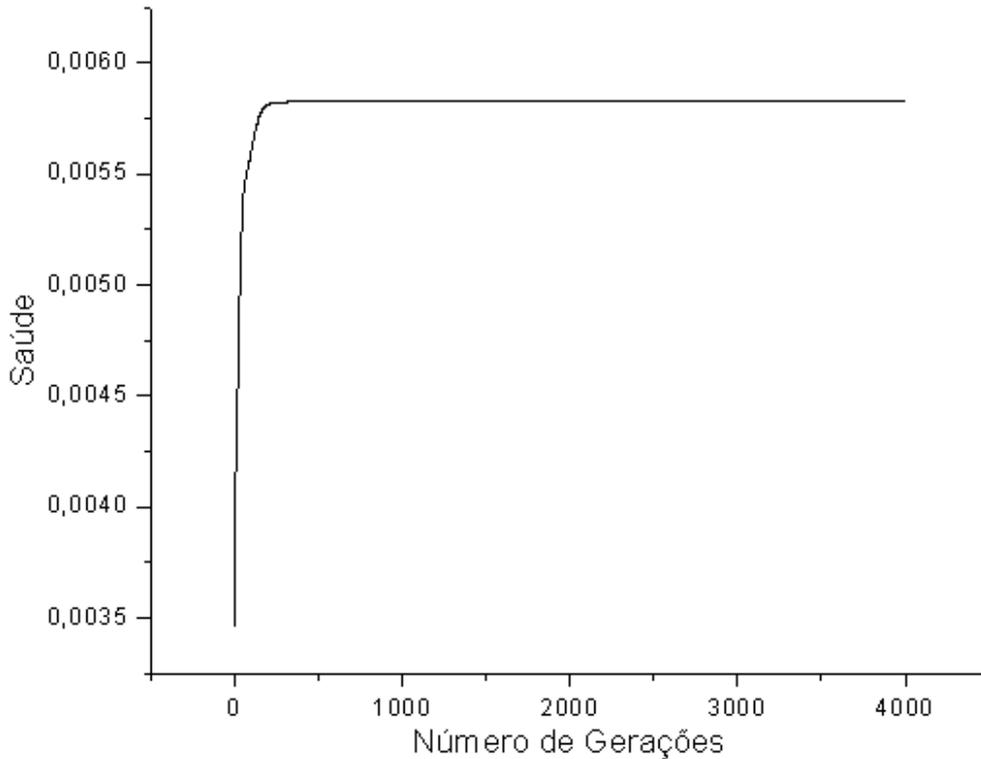


Figura 4.38: Evolução da saúde em função do número das gerações para o Projeto 8.

#### 4.4.3. Tempos de processamento e o cálculo do *speedup*

Não há muito o que dizer a favor dos espectros de refletividade das grades obtidas para o Projeto 7 e 8. Comparado com as curvas obtidas para o Projeto 1 e 2, as curvas de refletividade mostradas nas Figuras 4.33 e 4.36 apresentam lóbulos laterais enormes, bandas pouco ajustadas à curva alvo e até sulcos de refletividade mínima cravados em plena banda na qual a refletividade deveria ser máxima e constante. A culpa por tudo isso não é dos parâmetros escolhidos para a configuração do AG, mas principalmente pelo fato do parâmetro  $\Delta n_{ef}$  ter sido otimizado ao invés da visibilidade de franjas  $\nu$ , como nos projetos 1 e 2. Entretanto, embora a qualidade das grades pareça pequena, são compatíveis com os projetos similares obtidos por técnicas analíticas em [4].

Mais importante do que a qualidade espectral das grades obtidas é a avaliação do tempo de processamento necessário para as 4000 gerações de ambos os projetos no *cluster*. Para analisar os efeitos da paralelização, os

tempos de processamento para os dois projetos, utilizando 1, 3, 4 e 8 processadores, foram reunidos na Tabela 4.5. Através dessa tabela percebe-se a significativa redução nos tempos de processamento seriais a medida que mais processadores são utilizados pelo cluster [13]. Entretanto, o aumento do desempenho computacional pode ser melhor observado através da medida do *speedup* e da eficiência de paralelização (definidos no Capítulo 3). A Tabela 4.6 mostra os valores de *speedup* e eficiência médios para 1, 3, 4 e 8 processadores. A Figura 4.39 mostra a curva de *speedup* em função do número de processadores utilizados. A proximidade entre a curva obtida e a curva ideal evidencia a “grossa granularidade” apresentada pelo problema (subseção 3.5.1). Embora as operações de comunicação sejam mais freqüentes proporcionalmente ao número de processadores, a quantidade de dados que trafegam na rede é constante, devido o número de indivíduos da população ter sido fixada em 72 (Tabela 4.4). Portanto o aumento do número de processadores não significou proporcionalmente um aumento do tempo gasto para a comunicação. Isso explica o fato do número de processadores não ter afetado significativamente o valor da eficiência de paralelização, o que pode ser constatado através da Tabela 4.6 [14].

Tabela 4.5: Tempos de processamento

Número de processadores	Tempo em segundos	
	Projeto 7	Projeto 8
1	121811	121710
3	41365	41365
4	31126	31082
8	15585	15614

Tabela 4.6: *Speedup* e eficiência de paralelização

Número de processadores	Speedup médio	Eficiência média %
3	2.950172	98.33906586
4	3.914626	97.86564847
8	7.80542	97.56775229

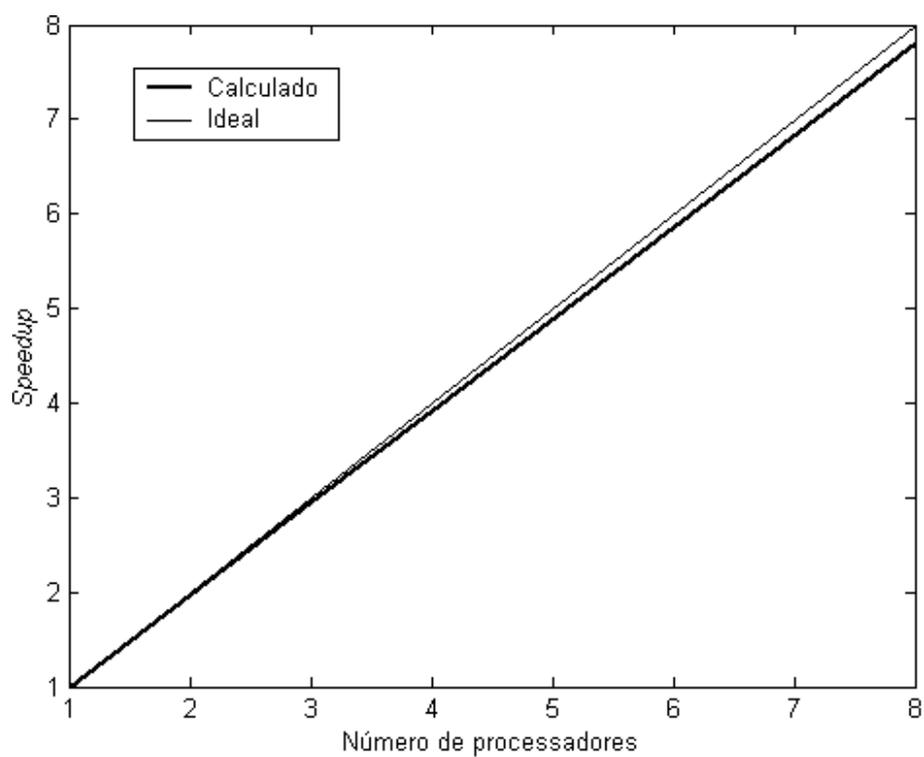


Figura 4.39: Comparação entre as curvas de *speedup* média obtida para os projetos 7 e 8 e ideal.

## **CAPÍTULO 5: CONCLUSÃO**

Este trabalho estudou os efeitos de 2 tipos de esquemas de codificação reais para algoritmos genéticos: a codificação natural, amplamente divulgada na literatura, e um outro esquema proposto pelo autor, baseado na sobreposição de grades.

A codificação real natural consiste simplesmente na disposição de todos os parâmetros que definem a grade na forma de um simples vetor de pontos flutuantes normalizados (ou não). Assim, dependendo do tipo de grade, os elementos desse vetor podem representar seções uniformes ou camadas dielétricas. Portanto, a codificação convencional depende muito do modelo utilizado para representação das grades.

Entretanto, a codificação alternativa proposta neste trabalho, baseada na sobreposição de grades, comprovou-se independente do modelo utilizado. Ficou demonstrado também que o AG utilizando esse tipo de codificação apresenta uma eficiência muito maior, que se traduz em grades melhores obtidas após um número reduzido de gerações. Embora se exija um procedimento especializado para a decodificação (que demanda mais tempo de processamento), o número menor de gerações pode de fato reduzir o tempo de processamento total.

Porém, uma nova técnica de codificação não é a única contribuição fornecida por este trabalho. Com o mecanismo de redução do número de amostras, o AG utilizando qualquer tipo de estratégia de codificação pode aumentar consideravelmente seu desempenho computacional. Combinando essa técnica à paralelização, é possível remover uma das maiores limitações associadas à utilização algoritmos genéticos: o tempo de processamento.

### **5.1. CONTRIBUIÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS**

A otimização explorada pelos algoritmos genéticos neste trabalho não é completa. Apenas a otimização do módulo do coeficiente de reflexão foi de fato explorada, resta ainda explorar a otimização sobre sua fase. A otimização da

fase permitiria obter dispositivos capazes de imprimir atrasos distintos a diferentes grupos dentro do espectro de operação da grade, possibilitando, por exemplo, a síntese de dispositivos para a compensação de dispersão. A otimização do atraso poderia utilizar os mesmos mecanismos empregados para a otimização da refletividade. Seria necessário apenas que existissem duas curvas de alvo ao invés de apenas uma: uma curva para a refletividade e outra para o atraso de grupo. Quase nada precisaria ser alterado nos programas, exceto no procedimento de avaliação das grades, que precisaria apenas considerar também a curva de atraso.

Como cada componente da grade sobreposta opera em uma faixa específica do espectro, a diferença entre seus comprimentos poderia se manifestar como um mecanismo similar ao das grades com *chirp* [17]. A Figura 5.1 mostra como comprimentos e amplitudes de perturbação diferentes corresponderiam a atrasos também diferentes. As influências na refletividade, associadas aos comprimentos e às amplitudes das componentes poderiam ser equalizadas. Dessa forma, teoricamente seria possível otimizar o formato da curva de atraso independentemente da curva de refletividade.

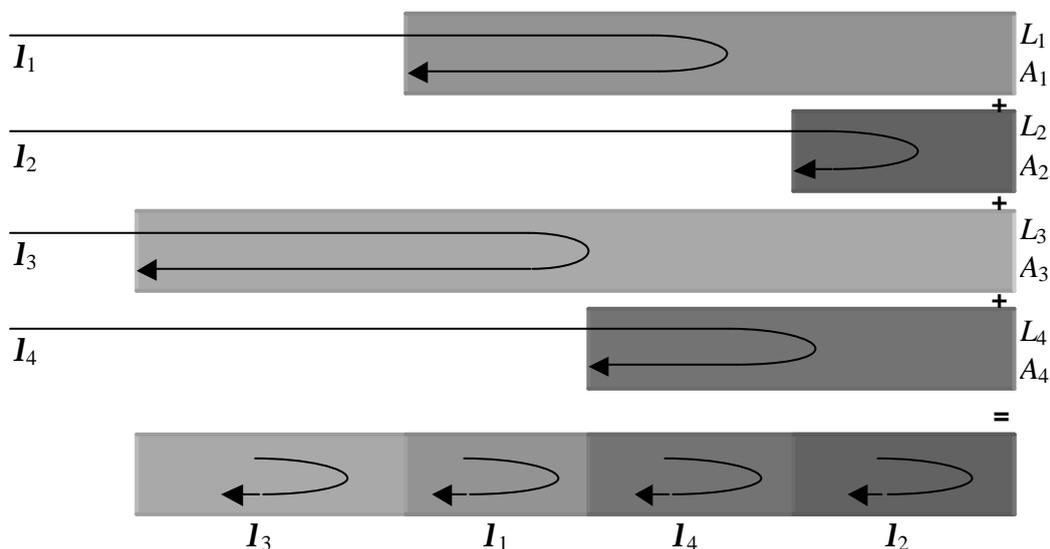


Figura 5.1: Componentes diferentes somadas para gerar uma grade sobreposta com diferentes atrasos em 4 comprimentos de onda.

Outra possibilidade para trabalhos futuros seria a investigação de estratégias alternativas para a paralelização do AG. Das três possibilidades discutidas no Capítulo 3, apenas a paralelização mestre-escravo foi investigada. Entretanto, a paralelização em rede parece ter implementação viável utilizando bibliotecas padrão MPI. Além disso, essa estratégia pode melhorar a qualidade das soluções finais devido a persistência da diversidade provocada pela migração eventual entre as várias populações separadas [18].

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] J. C. C. Carvalho, "Algoritmos genéticos aplicados à síntese de dispositivos ópticos", Dissertação de Mestrado PPGEE/UFPA, 1999.
- [2] D. E. Goldberg, "Genetic algorithms in search, optimization and machine learning", Addison – Wesley, MA, 1989.
- [3] Daniela O. P., "Desenvolvimento de um ambiente computacional para estudo de guias ópticos utilizando o mathematica," Trabalho de Conclusão de Curso DEEC/UFPA, 1998.
- [4] Erdogan, T., "Fiber grating spectra", IEEE Journal of Lightwave Technology, Vol 15, 1997, pp. 1277-1294.
- [5] Pai-Yi Huang, Sinn-Cheng Lin, Yung-Yaw Chen, "Real-coded genetic algorithm based fuzzy sliding-mode control design for precision positioning", Fuzzy Systems Proceedings, 1998. IEEE World Congress on Computational Intelligence, Vol. 2, 1998, 1247-1252.
- [6] J.A Dobrowolski, F. C. Ho, A. Belkind e V. Koss, "Merit functions for more effective thin film calculations," Appl. Opt. 28, 2824 – 2831(1989).
- [7] Herbert Li, E., "Genetic algorithm for design of reflective filters: application to  $Al_xGa_{1-x}N$  based Bragg reflectors," Optical and Infrared Thin Films, Michael L. Fulton, Editor, Proceedings of SPIE Vol. 4094, 2000, pp 129-136.
- [8] Ágoston E. Eiben, R. Hinterding, and Z. Michalewicz, "Parameter control in evolutionary algorithms", IEEE Transactions On Evolutionary Computation, Vol. 3, No. 2, 1999, pp 124-141.

- [9] Andreas Othonos, Kyriacos Kalli, "Fiber Bragg gratings", Artech House, 1999.
- [10] Born, M. & Wolf, E., "Principles of Optics", 6nd Ed., Pergamon Press, 1980.
- [11] Hill and Meltz, "FBG Technology Fundamentals", Journal of Lightwave Technology, Vol 15, No. 8, August 1997, pp 1263-1276.
- [12] M. J. Sousa, J. C. W. A. Costa e J. C. C. Carvalho, "Metodologia para Síntese de Grades de Bragg Utilizando Algoritmo Genético", Anais do X Simpósio Brasileiro de Microondas e Optoeletrônica-SBMO, agosto de 2002, pp 554-558.
- [13] M. J. de Sousa, L. V. de Souza, C. S. Junior, 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", artigo aceito para o XX Simpósio Brasileiro de Telecomunicações-SBT, outubro de 2003.
- [14] Othonos, A., X. Lee, and R. M. Measures, "Superimposed multiple Bragg gratings", Eletronic Letters, Vol 30, 1994, pp 1972-1973.
- [15] W. Gropp, E. Lusk, A. Skjellum, R. Thakur, "Using MPI : portable parallel programming with the message passing interface", Scientific and Engineering Computation, 2nd Edition, MIT Press, 1999.
- [16] Murtaza, S. S., Anselm, K. A., Srinivasan, A., Streetman, B. G., Campbell, J. C., Bean, J. C. & Peticolas, L., "High-reflectivity Bragg mirrors for optoelectronic applications", IEEE Journal of Quantum Electronics, vol. 31, no. 10, 1995, pp. 1819-1825.

[17] Govind P. Agrawal, "Fiber-optic communication systems", John Wiley & Sons, NY, 1997.

[18] E. Cantú-Paz, "Topologies, migration rates, and multipopulation parallel genetic algorithms", Illinois Genetic Algorithms Laboratory – IlliGAL Report No. 99007. University of Illinois. Urbana – Champaign, United States. January, 1999.