

# ALGORITMOS GENÉTICOS USADOS PARA A OTIMIZAÇÃO DE DISPOSITIVOS ÓPTICOS

J. C. C. CARVALHO E J. C. W. A. COSTA

Universidade Federal do Pará – Departamento de Engenharia Elétrica  
CP 8619, CEP 66075-900 Belém-PA

## RESUMO

GAs têm sido aplicados nos últimos anos em vários problemas relacionados ao Eletromagnetismo com destaque para projetos de antenas, dispositivos ópticos e de microondas. Esta publicação usa GAs para otimizar divisores de feixes, com diferentes razões de divisão e diferentes ângulos de incidência. Os resultados encontrados mostram a robustez dessa técnica quando aplicada a espaços de pesquisas complexos.

*Palavras-chaves* — Algoritmos Genéticos, Divisores de feixe.

## 1. INTRODUÇÃO

No processo de otimização de dispositivos ópticos, encontrar a solução ótima, consiste em extrair a configuração adequada de um meio estratificado (geralmente espessuras e índices de refração de cada camada), para que se atenda à uma determinada refletividade, em uma faixa de comprimento de onda. Como se sabe, técnicas tradicionais de otimização, são técnicas locais que necessitam de uma solução inicial, para começar o processo de otimização. O ponto ótimo encontrado por essas técnicas, é um ótimo local, ou seja, é o ótimo mais próximo da solução inicial. Em problemas como a otimização de dispositivos ópticos, a função a ser otimizada apresenta descontinuidade, não linearidade e multiextremos. Estas características são desafiadoras para métodos de otimização tradicionais, uma vez que apresentam um espaço de pesquisa bastante complexo, o que exige um bom conhecimento do mesmo, para que o ponto inicial seja fornecido na vizinhança da solução global; só assim a otimização será bem sucedida, caso contrário corre-se o risco de se ficar *preso* em um ótimo local e a solução encontrada pode não ser satisfatória. Porém, a tarefa de fornecer um ponto inicial é algo bastante complexo na maioria dos problemas, uma vez que não se tem conhecimento do espaço de pesquisa, exigindo muitas vezes, uma técnica auxiliar que realize este trabalho [1]-[2]. É neste ponto que algoritmos genéticos têm se tornado uma técnica poderosa, por se tratar de uma técnica de otimização global com características peculiares, capaz de fornecer um ponto inicial para métodos de otimização tradicionais, na região de globalidade..

## 2. ALGORITMOS GENÉTICOS

Existem duas classes de métodos utilizados na otimização de funções: os baseados em cálculo e os métodos enumerativos. Esta primeira classe de métodos pode tornar-se ineficiente quando aplicada à funções com descontinuidades, não linearidade e/ou multimodais. A segunda classe, apesar de superar parcialmente os problemas da primeira, possui desvantagem pela sua complexidade computacional, e costuma falhar em problemas de complexidade moderada.

Como alternativa entre os dois métodos, tem-se os Algoritmos Genéticos (GAs), os quais se incluem numa terceira classe conhecida como técnicas de pesquisa direcionada. GAs diferem dos métodos tradicionais nos seguintes aspectos:

- Algoritmos genéticos não trabalham diretamente com os parâmetros da função e sim com os códigos desses parâmetros.
- Algoritmos genéticos pesquisam a partir de um conjunto de pontos (população) iniciais e não a partir de um único ponto.
- GAs não necessitam de derivadas
- GAs utilizam regras probabilísticas e não regras determinísticas.

Algoritmos Genéticos são métodos de pesquisa estocásticos e robustos, os quais se baseiam na teoria sobre a evolução natural. Estes algoritmos têm se mostrado robustos em espaços de pesquisa complexos. Devido a essas características, GAs têm despertado grande interesse em pesquisas relacionadas ao Eletromagnetismo.

Durante o processo de otimização, algumas operações são realizadas antes de cada geração, tais operações são conhecidas como Seleção, Cruzamento e Mutação. Cada uma desempenha um papel importante na otimização genética.

Como GAs não operam diretamente nos parâmetros da função, então antes de realizar as operações de seleção, cruzamento e mutação, é necessário primeiro implementar a codificação dos parâmetros. A equação (1) mostra a correspondência entre os parâmetros P e X, onde P é um arranjo de elementos definidos por  $P = \{g_j | j=1, 2, \dots, N_{gL}\}$  e  $N_{gL}$  é o comprimento genético. A equação (1) mostra também, a correspondência entre  $x_L$  e  $g_j$ , onde  $x_L$  é o parâmetro da função que será otimizada. Na equação (1)  $g_j$  é conhecido como gene e sua concatenação completa é conhecida como cromossomo. Os valores de  $g_j$  podem ser escolhidos a partir de um alfabeto finito. Normalmente usa-se o alfabeto binário, onde cada gene pode assumir o valor 0 ou 1. Uma abordagem detalhada sobre os operadores genéticos pode ser encontrada em [3] e [4].

$$\begin{array}{l}
 \mathbf{X} \leftrightarrow \quad X_1 \quad \quad \quad X_2 \quad \quad \quad X_{N_x} \\
 \mathbf{P} \leftrightarrow \quad \underbrace{g_1 g_2 \dots g_{N_1}}_{X_1} \underbrace{g_{(N_1)+1} g_{(N_1)+2} \dots g_{(N_2)}}_{X_2} \underbrace{g_{(N_2)+1} g_{(N_2)+2} \dots g_{N_x}}_{X_{N_x}} \quad (1)
 \end{array}$$

Em geral, em GAs o objetivo é encontrar o extremo de uma determinada função  $f(\mathbf{x})$  onde  $\mathbf{x}$  é um arranjo multidimensional na forma  $\mathbf{x}=\{X_L | L=1,2,\dots,N_x\}$ .

Para se fazer a decodificação do parâmetro  $X_L$  pode ser usada uma transformação linear na forma

$$X_L = X_L^{\min} + 2^{-N_{L-1}} \frac{X_L^{\max} - X_L^{\min}}{2^{(N_L - N_{L-1}) - 1}} \sum_{j=N_{L-1}+1}^{N_L} g_j 2^{j-1} \quad (2)$$

Um aspecto importante em GAs é a função conhecida como função saúde, ou função objetivo. Esta função tem a finalidade de calcular a saúde de cada indivíduo na população. A saúde de cada indivíduo é o valor que a função saúde retorna ao utilizar o cromossomo decodificado, deste indivíduo. O valor retornado pela função saúde, deve corresponder proporcionalmente, à qualidade de uma determinada solução. A seguir são explicadas as operações genéticas.

### Seleção

Este processo consiste em selecionar indivíduos, a partir de uma população inicial, com base nas qualidades das soluções que eles representam, ou seja, com base nos seus valores de saúde. Existem várias maneiras de se implementar esta operação [1], [5]. A idéia neste tipo de operação é simular o processo seleção natural, onde os indivíduos mais saudáveis (as melhores soluções) terão maiores probabilidades de permanecerem ao longo das gerações.

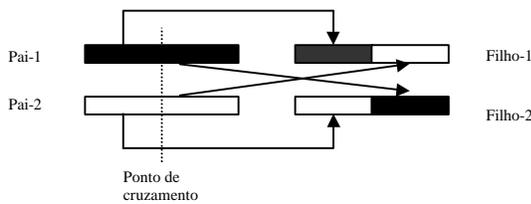


Fig. 1. Cruzamento entre dois cromossomos

### Cruzamento

A segunda operação realizada em GAs é conhecida como cruzamento. Existem várias formas de se realizar um cruzamento, porém a mais simples e mais utilizada é denominada como cruzamento de ponto único. Para este tipo de cruzamento é necessário escolher, aleatoriamente para cruzamento, dois elementos na população, os quais passam a ser denominados de *pais* dos possíveis filhos que serão gerados. Feito isto, se uma probabilidade  $p$ , for maior que uma determinada probabilidade  $p_c$  de cruzamento, então o cruzamento ocorrerá da seguinte maneira: primeiro é escolhida, ao acaso, uma posição no cromossomo que servirá como referência para cruzamento, então antes dessa posição, parte do conteúdo do *pai1* é copiada para o *filho1*, o mesmo ocorrendo com o conteúdo do *pai2* e *filho2*. Depois da referência, a parte do conteúdo do *pai1* é transferida para o *filho2* e a parte do conteúdo do *pai2* é transferida para o *filho1*. Este processo está ilustrado na Fig. 1. Se a probabilidade  $p$  for menor que  $p_c$ , então o conteúdo do *pai1* é copiado diretamente para *filho1*, o mesmo ocorrendo com o conteúdo do *pai2* e *filho2*. A probabilidade  $p_c$  é fixada pelo projetista no início da

otimização (valor típico utilizado para  $p_c$  é 0.7). A probabilidade  $p$  é gerada através de uma função utilizando gerador de números aleatórios e comparada com  $p_c$ .

### Mutação

A seleção e o cruzamento representam a maior parte do poder de processamento do GA. Tais operações trabalham com base nos melhores indivíduos. A mutação desempenha um papel secundário na tentativa de aproveitar alguma *cadeia* com material genético útil, evitando dessa maneira uma perda prematura deste mesmo material. Este processo é uma tentativa de explorar soluções que não fazem parte da população atual.

A mutação é a alteração de um valor em uma determinada posição escolhida ao acaso, na *cadeia*. Para o caso de alfabeto binário, isto significa a alteração de 0 para 1 e vice-versa. É importante observar que a taxa de mutação deve ser pequena (tipicamente na faixa de 0.01 à 0.1).

## 3. SÍNTESE DE DISPOSITIVOS ÓPTICOS UTILIZANDO ALGORITMOS GENÉTICOS

Em projetos de sistemas com múltiplas camadas, normalmente deseja-se otimizar os parâmetros do dispositivo para atender a uma refletividade ou transmissividade desejada, para uma faixa de comprimento de onda. Para realizar esta tarefa é necessário uma função objetivo, envolvendo as refletividades ideal (conhecida como alvo) e a refletividade calculada. A escolha da função objetivo é uma etapa importante na otimização de dispositivos ópticos, pois o uso de diferentes funções objetivos pode levar a resultados diferentes. A função objetivo usada neste trabalho é aquela sugerida por Dowbrolwisk [6], dada por

$$F(X) = \left( \frac{1}{P} \sum_{j=1}^P \{ [R(\lambda_j) - R_{opt}(\lambda_j)] / \delta R_j \}^2 \right)^{-1} \quad (3)$$

onde  $R(\lambda_j)$  e  $R_{opt}(\lambda_j)$  são as refletividades calculada e ideal respectivamente,  $\delta R_j$  é a tolerância em comprimento de onda  $\lambda_j$ . A refletividade é calculada através do formalismo matricial.

Ao final do processo de otimização deve-se extrair o vetor  $X$  que contém os parâmetros do projeto, ou seja, a espessura e o índice de refração de cada camada. O vetor  $X$  é dado por  $X = \{(t_1, \eta_1); (t_2, \eta_2); \dots; (t_N, \eta_N)\}$ , onde  $t_i$  e  $\eta_i$  representam a espessura e o índice de refração da  $i$ -ésima camada. É importante lembrar que os valores dos índices de refração estão sujeitos à restrição:  $\eta_{\min} \leq \eta \leq \eta_{\max}$ , onde  $\eta_{\min}$  e  $\eta_{\max}$  representam o valor mínimo e máximo dos índices de refração, respectivamente. Esta restrição é imposta para que se possa trabalhar com materiais disponíveis. A espessura deve estar na região  $t_{\min} \leq t \leq t_{\max}$ , onde  $t_{\min}$  e  $t_{\max}$  representam os valores mínimo e máximo de espessura em cada camada, respectivamente.

Para que se aplique algoritmo genético em sistemas com múltiplas camadas, é necessário primeiro levar em conta algumas associações. Para o problema em questão pode-se associar um indivíduo a um projeto candidato a um dispositivo. Um dispositivo possui um conjunto de espessuras e índices de

refração, uma determinada refletividade, etc. Um indivíduo possui um cromossomo, um valor de saúde, etc. Então um indivíduo armazena, indiretamente, as informações de um dispositivo. Esta associação pode ser vista na Fig.2.

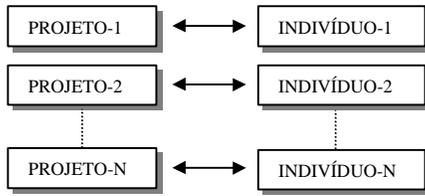


Fig. 2. Associação entre indivíduo e projeto. Cada indivíduo representa um projeto candidato para um dispositivo. Esses projetos são processados em paralelo pelo GA.

Uma associação pode ser feita também entre parâmetros de um projeto e um cromossomo. Cada parâmetro de um projeto possui um código correspondente associado a ele. Esse código é parte de uma cadeia maior, denominada de cromossomo. Então percebe-se que um cromossomo, armazena informação sobre o conjunto de espessuras e índices de refração de um projeto candidato. A equação (1) e a Fig. 3 representam essa associação.

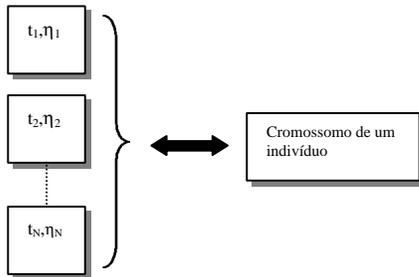


Fig. 3. Os parâmetros de um projeto podem ser codificados. A concatenação completa desses códigos representa um cromossomo de um indivíduo. A equação (1) representa matematicamente esta associação, onde  $X_L$  pode ser uma espessura ou um índice de refração de uma camada do dispositivo.

Um fluxograma descrevendo o processo de otimização completo está na Fig. 4, ao final do processo é obtido X ótimo, o qual contém os parâmetros otimizados que devem ser usados na implementação de um dispositivo. Com esta idéia, tem-se uma visão geral de como um dispositivo é otimizado até se encontrar a configuração mais adequada, que servirá com projeto inicial em algum método tradicional de otimização.

Uma vez encontrada a configuração ótima para o dispositivo, a curva de refletividade pode ser traçada para uma determinada faixa de  $\lambda$ , para visualizar a resposta do dispositivo.

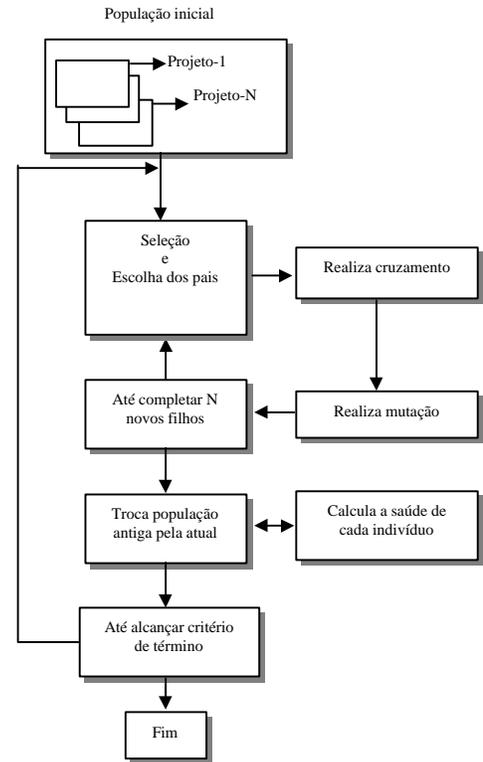


Fig. 4. Digrma de bloco, representando o processo de otimização genética

#### 4. RESULTADOS

Neste trabalho serão usados três divisores de feixes, com razão de divisão de 50 % e 70 %, analisados para o moto TE. Além disso, esses dispositivos diferem quanto ao ângulo de incidência, limites da espessuras, valores dos índices de refração do substrato e região espectral de interesse.

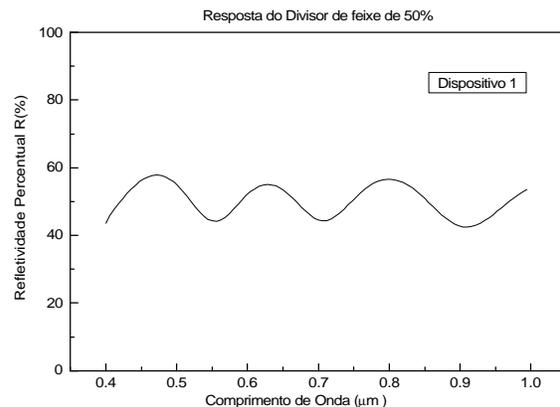
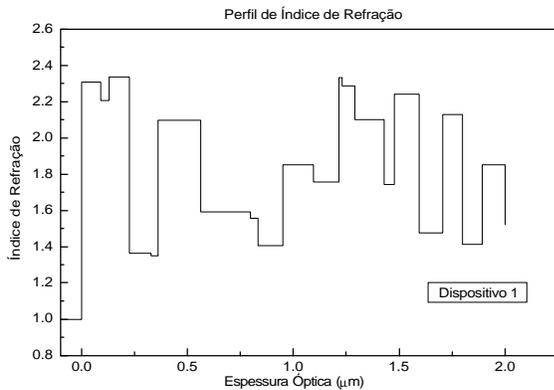


Fig. 5. Curva de resposta do divisor de feixe de 50% composto de 20 camadas O índice de refração do substrato é 1.52 e o ângulo de incidência é  $0^\circ$ .

O primeiro dispositivo (dispositivo 1) a ser sintetizado é um divisor de feixe de 50% composto de 20 camadas alternadas. O objetivo aqui é comparar os resultados encontrados com aqueles em [7]. Os índices de refração estão entre 1.35 e 2.35, o índice de refração do substrato é 1.52. As espessuras foram limitadas entre 0.05 $\mu\text{m}$  e 0.5 $\mu\text{m}$  e a espessura óptica do dispositivo é limitada em 2 $\mu\text{m}$ . A região espectral de interesse está entre 0.4 $\mu\text{m}$  e 1 $\mu\text{m}$  e o ângulo de incidência é de 0 $^\circ$ . A Fig. 5 mostra a resposta do dispositivo que apresenta uma refletividade média de 49.69%. O resultado encontrado está dentro de uma faixa aceitável, pois em [7] a refletividade média é de 50,06%.

Os parâmetros sintetizados(espessuras e índices de refração) e a refletividade média, são mostrados na Tabela 1. O perfil de índice de refração do dispositivo pode ser visto na Figura 6.



**Fig.6.** Perfil de índice de refração do divisor de feixe de 50%, com ângulo de incidência de 0 $^\circ$ . A espessura óptica do dispositivo é 2 $\mu\text{m}$ .

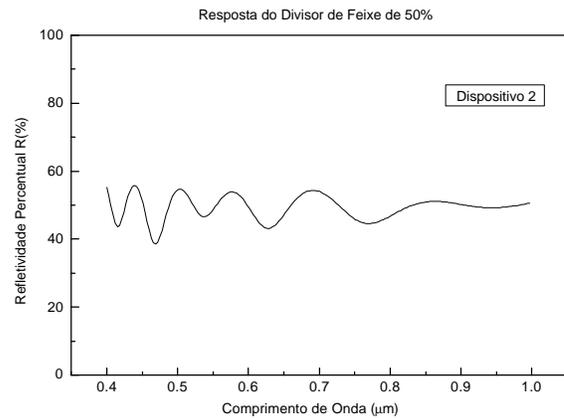
O segundo dispositivo(dispositivo 2), é semelhante ao primeiro, sendo que agora o dispositivo foi otimizado para um ângulo de incidência de 45 $^\circ$ . A refletividade do dispositivo pode ser vista na Fig. 7. Neste projeto a refletividade média foi 49.33%. O perfil de índice de refração e os parâmetros sintetizados podem ser vistos na Fig. 8 e Tabela 1, respectivamente.

O terceiro dispositivo(dispositivo 3) consiste em um divisor de feixe de 70%. O ângulo de incidência é 45 $^\circ$  e o índice de refração do substrato é 2.43. O dispositivo é composto de 20 camadas, onde as espessuras estão limitadas entre 0.05 $\mu\text{m}$  a 0.5 $\mu\text{m}$  e os índices de refração estão entre 1.35 e 2.35. A espessura óptica é 2 $\mu\text{m}$ .

A refletividade do dispositivo, após a otimização, pode ser vista na Fig. 9, onde o valor médio da refletividade é 69.8921%. A Fig. 10 mostra o perfil de índice de refração do dispositivo e a Tabela 1 mostra os parâmetros otimizados, encontrados pelo GA.

**Tabela – 1**Valores dos Parâmetros Encontrados pelo GA

Cama da	Dispositivo 1		Dispositivo 2		Dispositivo 3	
	t	n	t	n	t	n
Ar	1,0		1,0		1,0	
1	0,0399	2,3070	0,0983	1,4630	0,0657	1,8735
2	0,0164	2,2072	0,0130	2,3298	0,0448	2,1789
3	0,0412	2,3343	0,0529	2,0532	0,0474	2,0199
4	0,0746	1,3657	0,0290	1,7636	0,0619	2,2872
5	0,0265	1,3502	0,0480	1,3907	0,0353	2,0493
6	0,0961	2,0961	0,0125	1,8647	0,1088	1,3746
7	0,1467	1,5912	0,0087	1,4795	0,0489	2,3369
8	0,0233	1,5575	0,0811	1,4098	0,1074	1,3819
9	0,0837	1,4073	0,0742	2,1894	0,0624	2,2530
10	0,0779	1,8500	0,0406	2,1430	0,0307	2,2965
11	0,0690	1,7563	0,1025	1,7271	0,0385	2,3011
12	0,0065	2,3304	0,0877	2,1595	0,0107	1,9676
13	0,0261	2,2872	0,0642	2,0229	0,1062	1,4236
14	0,0663	2,1000	0,0831	2,2938	0,0507	1,3647
15	0,0275	1,7406	0,0595	1,6313	0,0416	1,7568
16	0,0525	2,2401	0,0169	1,3500	0,0196	2,2836
17	0,0752	1,4745	0,0412	1,7564	0,0561	1,8108
18	0,0436	2,1275	0,0373	2,2400	0,0641	1,9028
19	0,0664	1,4125	0,1104	1,4123	0,0641	1,7249
20	0,0579	1,8500	0,0396	2,0375	0,0398	2,0768
Subst	1.52		1.52		2.43	
R <sub>m</sub>	49,69%		49,33%		69,89%	



**Fig. 7.** Curva de resposta do divisor de feixe de 50% composto de 20 camadas e índice de refração limitado entre 1.35 e 2.35 alternados em cada camada. O índice de refração do substrato é 1.52 e o ângulo de incidência é 45 $^\circ$ .

## 5. CONCLUSÃO

Neste trabalho foram otimizados três divisores de feixes, com diferentes razões de divisão e diferentes ângulos de incidência. Diante da qualidade das soluções encontradas e da complexidade do espaço de pesquisa envolvido nesses problemas de dispositivos com múltiplas camadas, o algoritmo genético mostrou-se extremamente robusto para lidar com problemas dessa natureza, tornando-se uma ferramenta auxiliar de grande importância em projetos de dispositivo ópticos com múltiplas camadas. Com a finalidade de diminuir a complexidade de fabricação dos projetos utilizados nessa publicação, é interessante que se utilize dispositivos com apenas dois materiais. Isto pode ser feito com auxílio de uma técnica que transforma dispositivos com índices variáveis em seu equivalente com apenas dois materiais [8]-[10]. Uma vez feito isso, pode se usar uma técnica de otimização tradicional, como o método do gradiente, usando-se estes projetos como uma solução inicial. Este processo é conhecido como refinamento.

## REFERÊNCIAS

- [1] J. A. Dobrowolski e R. A. Kemp, "Refinement of optical systems with different optimization procedures," *APPLIED OPTICS*, vol 29, No. 19, July 1990, 2876-2893.
- [2] Philip Baumeister, "Starting designs for the Computer Optimization of Optical Coatings," *APPLIED OPTICS*, vol 34, No. 22, August 1995, 4835-4843.
- [3] David E. Goldberg, *Genetic Algorithms in Search, Optimization & Machine Learning*, New York, Addison-wesley, 1989.
- [4] K.S. Tang, K. F. Man, S. Kwong and Q. HE, "Genetic Algorithms and their Applications," *IEEE Signal Processing Magazine*, vol. 13 No 6, November 1996, pg 22-37.
- [5] Johnson, J. M e Yahya, "Genetic Algorithms in Engineering Electromagnetics," *IEEE Antenas and Propagation Magazine*, vol. 39, No.4, August 1997,pg 7.
- [6] J.A Dobrowolski, F. C. Ho, A. Belkind e V. Koss, "Merit Functions for More Effective Thin Film Calculations," *APPLIED OPTICS*, vol 28, 2824 – 2831(1989).
- [7] S. Martin, J. Rivory e M. Schoenauer, "Synthesis of optical multilayer systems using genetic algorithms," *APPLIED OPTICS*, vol 34, No 13, May 1995,pg 2247-2254.
- [8] L. L. Epstein, "The design of optical filters, " *J. Opt. Soc. Am.* 42, 806 – 810 (1952).
- [9] M. C. Ohmer, "Design of three-layer equivalent films," *J. Opt. Soc. Am.* 68, 137 – 139 (1978)
- [10] W. H. Southwell, "Coating design using very thin high and low index layers," *Appl. Opt.* 24m 457 – 460 (1985).

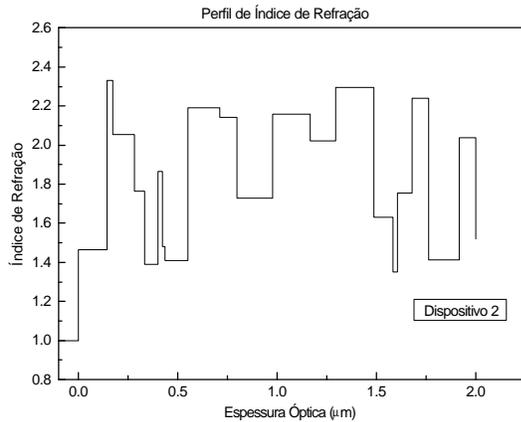


Fig. 8. Perfil de índice de refração do divisor de 50%.

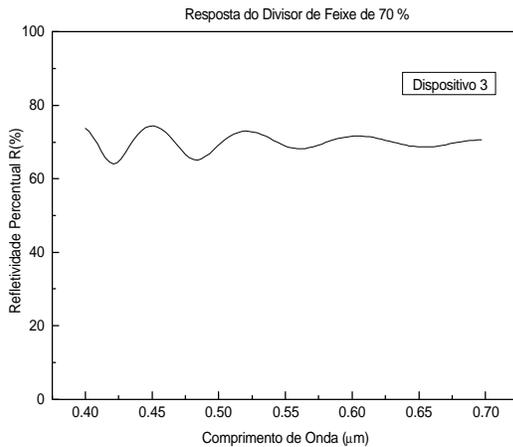


Fig. 9. Curva de resposta do divisor de feixe de 70%

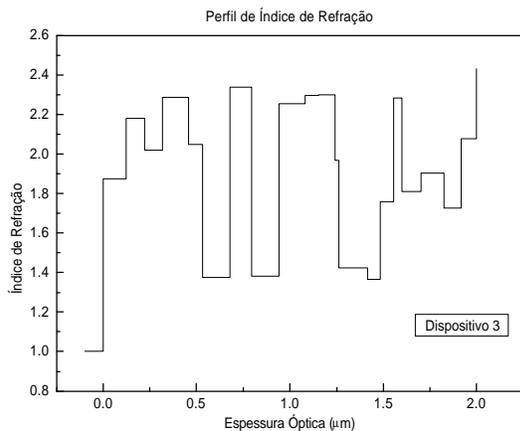


Fig. 10. Perfil de índice de refração do divisor de feixe de 70%.