

# Otimização de Absorvedores Multicamadas Utilizando Algoritmo Genético com Codificação Real

V. Dmitriev, J. C. W. A. Costa, K. Q. da Costa, C. S. Sales, Junior e J. A. S. Macêdo.  
 UFPA – Universidade Federal do Pará – Departamento de Engenharia Elétrica e de Computação – DEEC,  
 Laboratório de Eletromagnetismo Aplicado – LEA  
 Av. Augusto Corrêa nº 01 – CP: 8619, CEP: 66075 – 900 Belém/Pa, Brasil.

**Resumo** — Um procedimento específico para projetar absorvedores de radiação eletromagnética multicamadas é apresentado. Este método baseia-se na utilização do algoritmo genético (AG) para otimizar a refletividade destes absorvedores em uma dada faixa de frequências. São apresentados resultados numéricos dos coeficientes de reflexão de alguns exemplos de projeto.

**Palavras-chaves** — Absorvedores multicamadas, algoritmo genético, radiação eletromagnética.

## I. INTRODUÇÃO

Absorvedores de radiação eletromagnética são largamente empregados na indústria de telecomunicações e aeronáutica [1]. Tipicamente, as coberturas anti-refletoras devem ser leves, finas e apresentarem uma banda larga em frequência [2].

Absorvedores baseados em estruturas constituídas por apenas uma camada apresentam um casamento de impedância de onda para uma estreita faixa de frequência. Absorvedores com faixa mais larga podem ser obtidos através da utilização de estruturas multicamadas, combinando-se mais de um material. As primeiras camadas são responsáveis pelo casamento de impedância de onda, e as últimas camadas são responsáveis pela absorção da onda [3].

Neste trabalho são apresentados resultados de projetos de absorvedores de radiação eletromagnética multicamadas (*multilayer radar absorbing* - MRA) através de um método de otimização baseado no algoritmo genético com codificação real. Dado um conjunto de materiais com as propriedades elétrica e magnética dependentes da frequência, o algoritmo genético (AG) encarrega-se de escolher o material de cada camada e sua respectiva espessura [4]. Esta escolha resulta numa cobertura que tem a menor reflexão para uma faixa de frequência especificada.

V. Dmitriev, [victor@ufpa.br](mailto:victor@ufpa.br), J. C. W. A. Costa, [jweyl@ufpa.br](mailto:jweyl@ufpa.br), [karlocosta@yahoo.com](mailto:karlocosta@yahoo.com), [cssj@ufpa.br](mailto:cssj@ufpa.br), [jasmgef@yahoo.com.br](mailto:jasmgef@yahoo.com.br), Tel. +55-91-2111302, Fax +55-91-2111634

Este trabalho foi parcialmente financiado pelo CNPq.

## II. COEFICIENTE DE REFLEXÃO

Será considerado um absorvedor constituído por multicamadas planares no qual as propriedades elétricas e magnéticas variam ao longo da direção  $z$ , como mostrado na Fig. 1. Considerando uma onda incidente de polarização TE, o coeficiente de reflexão para absorvedores multicamadas da Fig. 1 é dada por [5]-[6]:

$$\tilde{R}_{i,i+1} = R_{i,i+1} + \frac{R_{i,i+1} + \tilde{R}_{i+1,i+2} \exp(-2jk_{i+1,z}\Delta z_{i+1})}{1 + R_{i,i+1}\tilde{R}_{i+1,i+2} \exp(-2jk_{i+1,z}\Delta z_{i+1})} \quad (1)$$

sendo  $R_{i,i+1}$  o coeficiente de Fresnel [5] dado por:

$$R_{i,i+1} = \frac{\mu_{i+1}k_i - \mu_i k_{i+1}}{\mu_{i+1}k_i + \mu_i k_{i+1}} \quad (2)$$

e os demais parâmetros definidos na Tabela I

A equação (1) é igualmente válida para uma onda de polarização TM, mudando somente o coeficiente de Fresnel, que nesse caso é:

$$R_{i,i+1} = \frac{\varepsilon_{i+1}k_i - \varepsilon_i k_{i+1}}{\varepsilon_{i+1}k_i + \varepsilon_i k_{i+1}} \quad (3)$$

TABELA I

PARÂMETROS NECESSÁRIOS PARA O CÁLCULO DO COEFICIENTE DE REFLEXÃO.

$\tilde{R}_{i,i+1}$	Coefficiente de reflexão de uma estrutura multicamadas
$R_{i,i+1}$	Coefficiente de Fresnel
$\mu_i$	Permeabilidade magnética da camada $i$
$\varepsilon_i$	Permissividade elétrica da camada $i$
$\Delta z_i$	Espessura da camada $i$
$k_i$	Constante de propagação da onda eletromagnética na camada $i$
$j$	Unidade imaginária

### III. OTIMIZAÇÃO

A função objetivo utilizada no processo de otimização é dada por:

$$F = \sum_{k=1}^{Nf} \left[ 1 - \tilde{R}_1(f_k) \right]^2 \quad (4)$$

onde  $Nf$  é número de amostras utilizadas durante o processo de otimização,  $\tilde{R}_1$  é o coeficiente de reflexão, calculado na interface da camada 1, e na frequência  $f_k$  utilizando (1). Durante a otimização essa equação deve ser maximizada para a minimização do coeficiente de reflexão.

Neste trabalho foi utilizado como método de otimização o algoritmo genético com codificação real. No AG cada solução de um problema é denominada cromossomo, os quais são constituídos de genes, que podem ser bits, números inteiros ou números reais. Neste caso optou-se pela codificação real que não possui problemas de truncagem e possui convergência mais rápida que a codificação binária [7]-[9]. Na Fig. 1 são mostrados como foram codificados os absorvedores multicamadas. Na codificação real cada gene é representado por um número de 0 a 1,0 que é utilizado para determinar o valor do parâmetro a ser otimizado (espessura ou as características do material, por exemplo) de cada uma das camadas do absorvedor através da equação:

$$x_{mt} = x_{min} + (x_{tmax} - x_{tmin}) gene_{mt} \quad (5)$$

onde  $m$  é a camada a ser decodificada representada no cromossomo pela variação de cores e  $t$  é o número que representa o parâmetro a ser decodificado para uma dada camada (neste caso seria 0 para o material e 1 para espessura),  $x_{mt}$  o valor do parâmetro convertido para uma faixa pré-determinada,  $x_{min}$  e  $x_{tmax}$  são os valores mínimos e máximos do parâmetro  $t$  que está sendo decodificado, respectivamente; e  $gene_{mt}$  é o valor do parâmetro retirado diretamente do cromossomo. Assim, para decodificar a espessura da camada 2, o  $gene_{21}$  com valor na faixa de 0 a 1,0 é retirado do cromossomo e através de (5), é obtido o valor do parâmetro  $x_{21}$  na faixa de 0 a 2 mm, por exemplo.

Como pode ser visto na Fig. 1, em cada cromossomo o número de genes é igual ao número de camadas vezes o número de parâmetros. O número de camadas também é um dos parâmetros a ser otimizado pelo AG. Para isso, foi acrescentado mais um gene, não mostrado na fig. 1. Por exemplo, para um número máximo de camadas igual a cinco e para dois parâmetros, espessura e o material de cada camada, o tamanho do cromossomo será de 11 genes.

O método de seleção escolhido foi à seleção competitiva, que possui menores problemas de convergência e evita a utilização de métodos auxiliares como o escalonamento de aptidão (*fitness scaling*), como ocorre com a seleção por roleta [9]-[10]. A mutação é executada gene a gene e o cruzamento é feito em um único ponto. Para estes dois operadores foi implementado um controle determinístico para

as probabilidades de mutação e de cruzamento, que leva em consideração a passagem das gerações:

$$p = p_{max} - (p_{max} - p_{min}) \frac{ger}{Numger} \quad (6)$$

onde  $p$  é a probabilidade de mutação ou cruzamento em uma determinada geração,  $p_{max}$  e  $p_{min}$  são os valores máximos e mínimos dessas probabilidades, respectivamente;  $ger$  é a geração atual e  $Numger$  é o número de gerações totais. No início da evolução é importante que o AG faça uma pesquisa bem ampla no espaço de busca para tentar encontrar o máximo global e não convergir para um máximo local; dessa forma a probabilidade de mutação deve ser grande. Mas à medida que o AG evolui e a população se aproxima de um possível máximo global, o objetivo é não deixar a população divergir, é apenas sintonizar melhor a resposta; e assim a probabilidade de mutação deve ser pequena.

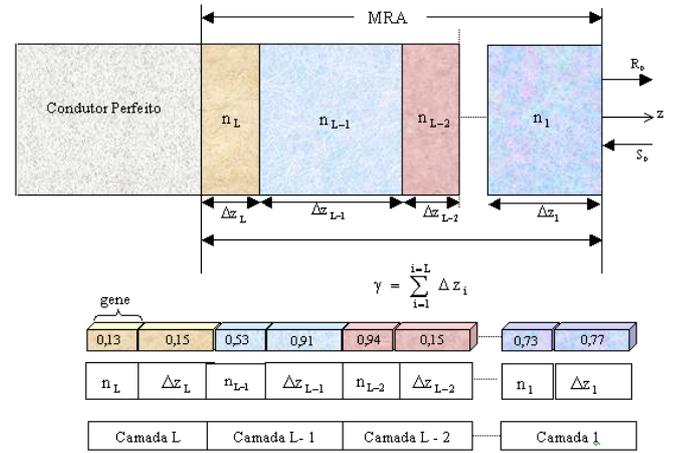


Fig. 1. Absorvedor multicamada e sua codificação em um cromossomo manipulado pelo AG

### IV. RESULTADOS

Os projetos que se seguem visam minimizar o coeficiente de reflexão apenas para incidência normal. A espessura máxima de cada camada é fixada em 2 mm, de forma a garantir que o absorvedor terá uma espessura pequena (abaixo de 5,5 mm) [10].

A Tabela I apresenta a permissividade e a permeabilidade relativa de 16 materiais representativos de uma larga classe de materiais absorvedores de radiação eletromagnética [10]. Estes materiais são divididos em três categorias distintas.

- 1) Sem perdas elétricas, com permissividade independente da frequência (materiais 1 e 2).
- 2) Com perda magnética (materiais 3 – 5) e com perda elétrica (materiais 6 – 8). Estes materiais são especificados através de sua permeabilidade/permissividade em 1 GHz e com o coeficiente de decaimento  $\alpha$  e  $\beta$  definidos na Tabela I.
- 3) Com perda magnética e com um tipo específico de relaxação (materiais 9 – 16). Estes materiais são

especificados através de sua permissividade real em dc,  $\mu_m$ , e com a frequência,  $f_m$ .

**TABELA II**  
PERMISSIVIDADE E PERMEABILIDADE RELATIVA  
DOS MATERIAIS UTILIZADOS NOS EXEMPLOS.

Materiais dielétricos sem perdas ( $\mu_r = 1 + j0$ )				
Número	$\epsilon_r$			
1	10 + j0			
2	50 + j0			
Materiais magnéticos com perdas ( $\epsilon_r = 15 + j0$ )				
$\mu = \mu_r - \mu_i \quad \mu_r(f) = \frac{\mu_r(1GHz)}{f^\alpha} \quad \mu_i(f) = \frac{\mu_i(1GHz)}{f^\beta}$				
Número	$\mu_r(1GHz)$	$\alpha$	$\mu_i(1GHz)$	$\beta$
3	5	0,974	10	0,961
4	3	1,000	15	0,957
5	10	1,000	12	1,000
Materiais dielétricos com perdas ( $\mu_r = 1 + j0$ )				
$\epsilon = \epsilon_r - \epsilon_i \quad \epsilon_r(f) = \frac{\epsilon_r(1GHz)}{f^\alpha} \quad \epsilon_i(f) = \frac{\epsilon_i(1GHz)}{f^\beta}$				
Número	$\epsilon_r(1GHz)$	$\alpha$	$\epsilon_i(1GHz)$	$\beta$
6	5	0,861	8	0,569
7	8	0,778	10	0,682
8	10	0,778	6	0,861
Materiais magnéticos tipo-relaxação ( $\epsilon_r = 15 + j0$ )				
$\mu = \mu_r - \mu_i \quad \mu_r(f) = \frac{\mu_m f_m^2}{f^2 + f_m^2} \quad \mu_i(f) = \frac{\mu_m f_m f}{f^2 + f_m^2}$				
Número	$\mu_m$	$f_m$ (GHz)		
9	35	0,8		
10	35	0,5		
11	30	1,0		
12	18	0,5		
13	20	1,5		
14	30	2,5		
15	30	2,0		
16	25	3,5		

Os resultados apresentados a seguir foram obtidos tendo em vista comparação com projetos apresentados na literatura [10], na qual foram apresentados absorvedores constituídos por 5 camadas, operando com coeficiente de reflexão menor do que -15 dB para uma faixa de frequência de 0,1-10 GHz. Portanto para os projetos realizados com AG neste trabalho, foi especificado apenas que o coeficiente de reflexão esteja abaixo de -15 dB dentro de uma faixa de frequência especificada de modo a garantir uma largura de banda especificada nas tabelas. Desse modo, em cada exemplo apresentado a seguir, a combinação de parâmetros (material e espessura das camadas) pode variar livremente, considerando-se os materiais previstos na Tabela II, controlando-se a espessura máxima da estrutura absorvedora. Como será mostrado, os projetos apresentam menor número de camadas e espessuras totais menores, além de apresentarem melhores respostas em frequência, com maiores larguras de banda e menores coeficientes de reflexão.

Um outro aspecto a ser considerado sobre a implementação do AG é o número de pontos  $N_f$  utilizados em (4), no processo de otimização, pois, apesar de garantir uma melhor convergência, aumenta o tempo de processamento. Os pontos de amostra sempre foram tomados uniformemente espaçados, dentro da faixa de frequência especificada. Como

critério de parada estabeleceu-se duas abordagens: A primeira considera o número de gerações ( $N_{ger}$ ) sem evolução da função objetivo mostrada em (4), igual a 1000. A segunda considera que o valor médio da aptidão da população seja igual a 1% da aptidão do melhor indivíduo. Desse modo a otimização é finalizada se algum dos dois critérios for atingido.

A Fig. 2 apresenta a resposta em frequência do coeficiente de reflexão de um absorvedor com 4 camadas, com espessura de 5,39 mm, cujos parâmetros são descritos na Tabela III. Observa-se que o coeficiente de reflexão se mantém abaixo de -15 dB para faixa de frequência que vai de 0,2 GHz até 10 GHz, especificada para o GA, e alcança -33 dB na frequência próxima de 6,5 GHz. A Tabela IV fornece os parâmetros do GA que para esse projeto foram necessárias 3776 gerações com um número de amostras de frequência igual a 100. Nesse projeto foi garantido que no mínimo duas cópias do melhor indivíduo permanecem na população (número de indivíduos de elite) e que três indivíduos fossem escolhidos durante a seleção competitiva (número de indivíduos de seleção). Observa-se que a probabilidade de mutação inicia com um valor de 0,3, relativamente alto, e diminui ao longo do número de gerações até 0,01. O mesmo acontece com a probabilidade de cruzamento, mas para uma variação de 0,8 a 0,6. O número de indivíduos da população foi fixado em 60.

A Fig. 3 mostra o coeficiente de reflexão do absorvedor do projeto 2, este que é composto de 4 camadas e tem espessura total 5,29 mm, como mostrado na Tabela V. O coeficiente de reflexão deste absorvedor encontra-se abaixo de -15 dB para a faixa de frequência que vai de 0,1 GHz até 5 GHz, atingindo -38 dB na frequência próxima de 2 GHz. Para o projeto 2 foram necessários 3539 gerações com um número de amostras de frequência igual a 500 conforme apresentado na Tabela VI. Neste projeto a probabilidade de mutação variou de 0,5 a 0,01 e a probabilidade de cruzamento ficou na faixa de 0,7 a 0,6. O tamanho da população foi de 60 indivíduos. O número de indivíduos para elite foi igual a 2 e o número de indivíduos para seleção foi igual a 3.

**TABELA III**

PROJETO 1 ESPESSURA DE CADA CAMADA E SEU RESPECTIVO MATERIAL PARA UM ABSORVEDOR NA FAIXA 0,2 GHz – 10 GHz.

Projeto	Espessura (mm)	Material
Camada 1	0,4470	16
Camada 2	1,6956	6
Camada 3	1,8205	5
Camada 4	1,4303	5
Número de camadas	4	
Espessura total (mm)	5,39	

**TABELA IV**

PARÂMETROS DO AG PARA O PROJETO 1.

Parâmetros	Valores
Número de gerações	3776
Probabilidade de mutação	0,3-0,01
Probabilidade de cruzamento	0,8-0,6
Número de indivíduos	60
Número de indivíduos de elite	2
Número de indivíduos para seleção	3
Número de amostras	100
Faixa de frequência para otimização (GHz)	0,2-10

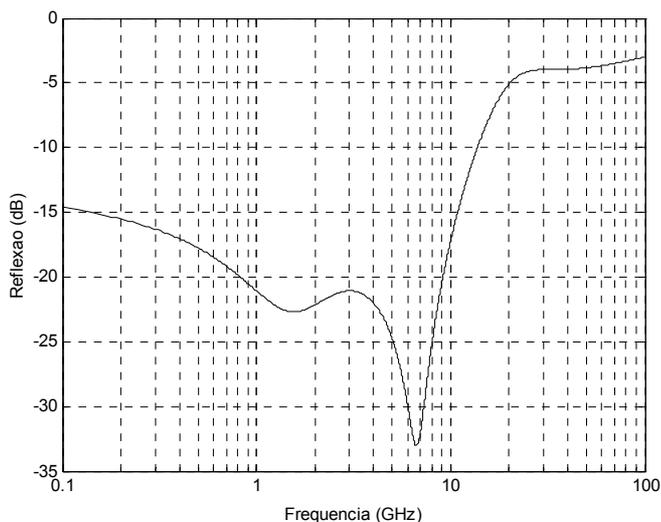


Fig. 2. Coeficiente de reflexão em função da frequência para um absorvedor de 4 camadas e com 5,39 mm de espessura.

O coeficiente de reflexão do projeto 3 é apresentado na Fig. 4. Este absorvedor é composto de 4 camadas e tem uma espessura total de 4,71 mm, conforme mostrado na Tabela VII. O coeficiente de reflexão mantém-se abaixo de -15 dB para a faixa de frequência que vai de 0,1 GHz até 6 GHz, atingindo -45 dB na frequência próxima de 4 GHz. Para esse projeto foram necessários 5611 gerações com um número de amostra de frequência igual a 1000 como mostrado na Tabela VIII. Nesse projeto, o número de indivíduos para elite foi igual a 2 e o número de indivíduos para seleção foi igual a 3. A probabilidade de mutação variou de 0,5 a 0,01, enquanto a probabilidade de cruzamento variou de 0,7 a 0,6. O tamanho da população foi de apenas 40 indivíduos.

TABELA V

PROJETO 2 ESPESSURA DE CADA CAMADA E SEU RESPECTIVO MATERIAL PARA UM ABSORVEDOR NA FAIXA 0,1 GHz – 5 GHz.

Projeto	Espessura (mm )	Material
Camada 1	0,7161	14
Camada 2	1,1815	8
Camada 3	1,6971	5
Camada 4	1,6963	4
Número de camadas	4	
Espessura total (mm)	5,29	

TABELA VI

PARÂMETROS DO AG PARA O PROJETO 2.

Parâmetros	Valores
Número de gerações	3539
Probabilidade de mutação	0,5-0,01
Probabilidade de cruzamento	0,7-0,6
Número de indivíduos	60
Número de indivíduos de elite	2
Número de indivíduos para seleção	3
Número de amostras	500
Faixa de frequência para otimização (GHz)	0,1-5

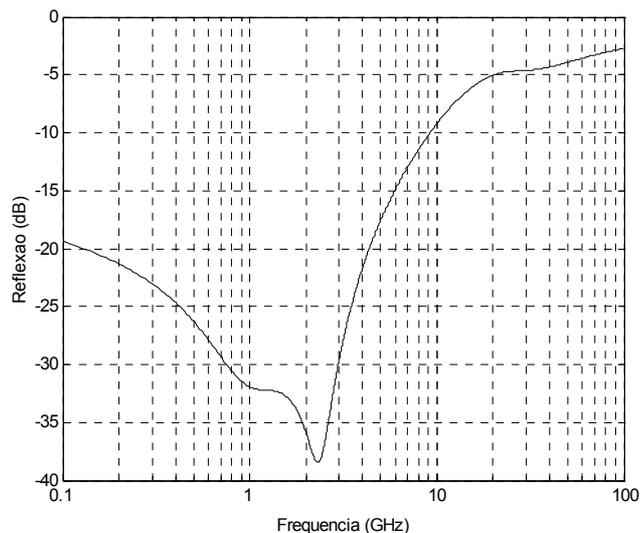


Fig. 3. Coeficiente de reflexão em função da frequência para um absorvedor de 4 camadas e com 5,29 mm de espessura.

TABELA VII

PROJETO 3 ESPESSURA DE CADA CAMADA E SEU RESPECTIVO MATERIAL PARA UM ABSORVEDOR NA FAIXA 0,1 GHz – 4 GHz.

Projeto	Espessura (mm )	Material
Camada 1	0,8074	16
Camada 2	0,6088	6
Camada 3	1,6732	4
Camada 4	1,6245	4
Número de camadas	4	
Espessura total (mm)	4,71	

TABELA VIII

PARÂMETROS DO AG PARA O PROJETO 3.

Parâmetros	Valores
Número de gerações	5611
Probabilidade de mutação	0,5-0,01
Probabilidade de cruzamento	0,7-0,6
Número de indivíduos	40
Número de indivíduos de elite	2
Número de indivíduos para seleção	3
Número de amostras	1000
Faixa de frequência para otimização (GHz)	0,1-4

A Fig. 5 mostra o coeficiente de reflexão do absorvedor do projeto 4, este que é composto de 3 camadas e tem espessura total 3,77 mm, como mostrado na Tabela IX. O coeficiente de reflexão deste absorvedor encontra-se abaixo de -15 dB para a faixa de frequência que vai de 1 GHz até 10 GHz, atingindo -25 dB na frequência próxima de 6 GHz. Para o esse projeto foram necessários 4159 gerações com um número de amostras de frequência igual a 200 conforme apresentado na Tabela X. Neste projeto a probabilidade de mutação variou de 0,2 a 0,01 e a probabilidade de cruzamento ficou na faixa de 0,7 a 0,6. O tamanho da população foi de 70 indivíduos e os outros parâmetros foram mantidos os mesmos dos projetos anteriores.

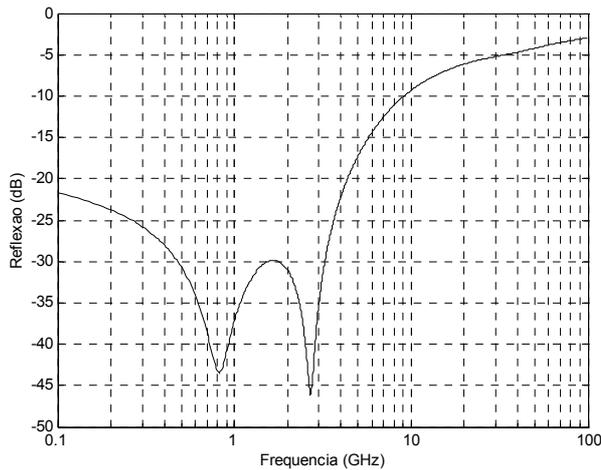


Fig. 4. Coeficiente de reflexão em função da frequência para um absorvedor de 4 camadas e com 4,71 mm de espessura.

TABELA IX

PROJETO 4 ESPESSURA DE CADA CAMADA E SEU RESPECTIVO MATERIAL PARA UM ABSORVEDOR NA FAIXA 1 GHz – 10 GHz.

Projeto	Espessura (mm)	Material
Camada 1	0,4236	16
Camada 2	2	6
Camada 3	2	9
Número de camadas	3	
Espessura total (mm)	3,77	

TABELA X

PARÂMETROS DO AG PARA O PROJETO 4.

Parâmetros	Valores
Número de Gerações	4159
Probabilidade de mutação	0,2-0,01
Probabilidade de Cruzamento	0,7-0,6
Número de indivíduos	70
Número de indivíduos de elite	2
Número de indivíduos para seleção	3
Número de amostras	200
Faixa de frequência para otimização (GHz)	1-10

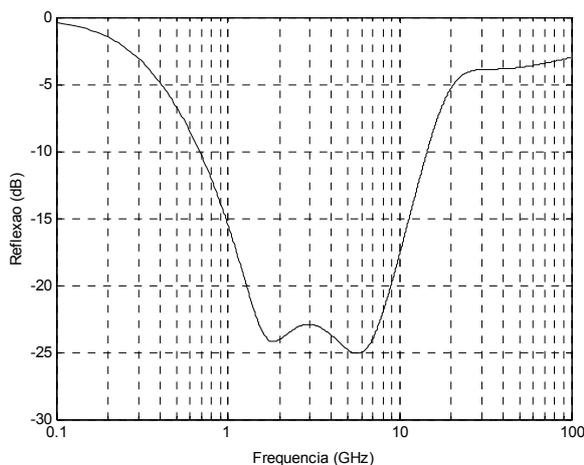


Fig. 5. Coeficiente de reflexão em função da frequência para um absorvedor de 3 camadas e com 3,77 mm de espessura.

Este trabalho mostrou a utilização do algoritmo genético com codificação real para otimizar a refletividade de absorvedores multicamadas de faixa larga. Os resultados apresentados mostraram que é possível obter estruturas de banda larga, com uma a duas décadas de frequência, considerando um nível de  $-15$  dB, e espessuras totais pequenas (de no máximo 5,4 mm) para os materiais utilizados. As camadas com menores espessuras dos absorvedores apresentaram valores acima de 0,4 mm, com as outras camadas sempre acima de 1 mm (conforme as tabelas de projetos). Dessa forma, facilitando a fabricação destas estruturas.

Observou-se que a resposta do projeto pode ainda ser melhorada aumentando-se o número de amostras de frequência; entretanto, o tempo de processamento também aumenta proporcionalmente. Um projeto com mil amostras é executado em 18 horas depois de cinco mil gerações, utilizando um computador pessoal com processador AMD Athlon XP 1800+, com 1,5 GB de memória RAM executando o sistema operacional Windows 2000, e programa escrito em C++ e compilado no Visual C++ 6.0.

## REFERÊNCIAS

- [1] A. C. C. Migliano, C. A. R. Freitas, e F. C. L. Melo, "Característica de Absorção da Radiação Eletromagnética em Revestimentos Planos à Base de Ferritas de Mg-Mn", *Revista do Instituto Nacional de Telecomunicações*, vol. 05, pp 33-36, Dezembro 2002.
- [2] J. J. Pesque, D. P. Bouche, and R. Mitra, "Optimization of multiplayer antireflection coatings using an optimal control method," *IEEE Trans. Microwave Theory Tech.*, vol. 40, pp. 1789-1796, September 1992.
- [3] Kai M. Hock, "Impedance matching for the multiplayer medium-toward a design methodology," *IEEE Trans. Microwave Theory Tech.*, vol. 51, pp. 908-914, March 2003.
- [4] J. M. Johnson, and Y. Ramat-Samii, "Genetic Algorithms in Engineering Electromagnetic," *IEEE Antennas and Prop.*, vol 39, n 4, August 1997.
- [5] W. C. Chew, *Waves and Fields in Inhomogeneous Media*, New York: Van Nostrand Reinhold, 1990.
- [6] C. A., Balanis, *Advanced Engineering Electromagnetic*, Jonh Wiley & Sons: New York, 1989.
- [7] E. D. Goldberg, *Genetic Algorithms in Search, Optimization and Machine Learning*, Reading, MA: Addison-Wesley, 1989.
- [8] D. E. Goldberg, "Real-coded genetic algorithms, virtual alphabets, any blocking", *Complex Syst.*, vol 5, pp. 129-167, 1991.
- [9] P. Y. Huang, S. C. Lin and Y. Y. Chen, "Real-Coded Genetic Algorithm Based Fuzzy Sliding-Mode Control Design For Precision Positioning," *The 1998 IEEE International Conference on*, vol 2, pp. 4-9 May 1998.
- [10] E. Michelssen, J. M. Sajer, S. Ranjithan and R. Mitra, "Design of Lightweight, Broad Band Microwave Absorbers Using Genetic Algorithms," *IEEE Trans. Microwave Theory Tech.*, vol. 41, pp. 1024-1031, June/July 1993.