

# Utilização de Algoritmo Genético em Otimização e Projetos de Filtros para Microondas

Helvécio M. Almeida, Marcos A.C. Lima e Amílcar C. César

**Resumo**— Uma proposta para otimização e projetos de filtros de microondas baseado em algoritmo genético é apresentada neste artigo. A partir de uma resposta em frequência desejada de um filtro, o AG determina os valores dos componentes discretos e/ou as dimensões das microfita. Os resultados de simulações computacionais são comparados aos obtidos a partir de software comercial e demonstram a potencialidade da abordagem proposta.

**Palavras-chave**— microondas, filtros, microfita, otimização, algoritmo genético.

**Abstract**— This paper describes a filter design procedure for microwave applications aided by genetic algorithm (GA). It shows detailed GA procedure including genetic operators. Based on the required frequency response, the GA can determine the lumped-elements values and the microstrip dimensions. Three types of filters are designed and discussed: a lumped high pass, a microstrip low pass, and a hybrid lumped-microstrip bandpass. The comparison between numerical results obtained by means of GA and those obtained through commercial software show good agreement, demonstrating the usefulness of the proposed approach in filter design.

**Index Terms**— microwaves, filter, microstrip, optimization, genetic algorithm.

## I. INTRODUÇÃO

A área de projeto, modelagem e simulação de circuitos e dispositivos para microondas e ondas milimétricas é muito promissora para o uso de algoritmos de otimização, principalmente nos casos daqueles que têm sido implementados com base em experiência de projetistas ou processo de tentativas, dada a complexidade advinda do número de parâmetros a serem considerados e da atual exigência de alto desempenho. Várias abordagens têm sido propostas, incluindo métodos convencionais como quase-Newton e gradiente-conjugado e técnicas baseadas em algoritmos evolutivos. Dentre eles, o algoritmo genético (AG) tem se destacado, por ser computacionalmente simples e eficaz na busca de soluções ótimas.

Os princípios básicos dos algoritmos genéticos foram propostos por John Holland em 1975 [1], com base em

fenômenos naturais, como herança genética e seleção. O AG opera a partir de um conjunto ou população de soluções potenciais que evolui para uma solução ótima ou sub-ótima global, sendo aferida por uma função de aptidão.

O AG tem sido empregado com sucesso para resolver diversos tipos de problemas de otimização em eletromagnetismo [2]. Michielsen *et al.* [3] aplicaram os AGs para a otimização de estruturas multicamadas atuando como superfícies seletoras de frequências. John e Jansen [4] mostraram o projeto de filtros de microondas compactos usando AG junto com a técnica de análise método dos momentos (MoM). Choo *et al.* [5] otimizaram vários tipos de antenas implementadas com microfita utilizando AGs. Villegas e Picon [6] utilizaram os AGs para gerar novas formas para estruturas ressonantes de microfita. Werner *et al.* [7] compararam os parâmetros S dos circuitos gerados pelo AG com os do programa de simulação eletromagnética EESOF [8]. Koza *et al.* [9] sintetizaram circuitos lineares e não-lineares, combinando programação genética com SPICE. Trabalhos recentes demonstraram que os AGs podem gerar a topologia e ao mesmo tempo encontrar os valores numéricos dos componentes para circuitos analógicos [10]-[11].

Neste artigo é proposto um método de otimização de projetos de filtros de microondas baseado em AGs. Definida uma curva de resposta em frequência ou especificações da função de transferência, o algoritmo proposto realiza o projeto de um circuito equivalente capaz de reproduzir a resposta em frequência desejada. Para validar o método proposto são projetados três filtros: um passa-alta utilizando elementos discretos; um passa-baixa utilizando microfita; e um passa-faixa utilizando um circuito híbrido com elementos discretos e microfita. Os filtros projetados são simulados por meio do programa Serenade SV [12]. Os resultados demonstram a versatilidade e aplicabilidade do AG proposto.

## II. ALGORITMOS GENÉTICOS

Os AGs são métodos estocásticos de busca baseados nos princípios e conceitos de seleção e evolução natural propostos por Charles Darwin [13]. Assim, o método incorpora várias expressões adotadas no vocabulário da genética. A terminologia e conceitos utilizados em algoritmos genéticos pode ser resumida conforme ilustra a Tabela 1.

O AG é uma poderosa ferramenta heurística para se resolver problemas complexos de otimização [2]. Entretanto, o AG na sua concepção básica (canônico) [14] pode convergir para pontos de ótimo local durante o processo de

Helvécio M. Almeida, [asah@terra.com.br](mailto:asah@terra.com.br), Marcos A. C. Lima, [mcardoso@sel.eesc.usp.br](mailto:mcardoso@sel.eesc.usp.br), Amílcar C. César, [amilcar@sel.eesc.usp.br](mailto:amilcar@sel.eesc.usp.br), Universidade de São Paulo, EESC, Depto. Eng. Elétrica, Av. Trabalhador São-carlense, 400, 13566-590 São Carlos, SP, Brasil.

Esta pesquisa foi parcialmente financiada pela FAPESP (proc. no. 00/9180-1)

otimização [9]. Para tornar a busca do AG mais eficiente e robusta, estratégias eficazes de implementação dos operadores genéticos e parâmetros foram incluídas no modelo proposto.

TABELA 1. TERMINOLOGIA E CONCEITOS DE ALGORITMO GENÉTICO.

Terminologia	Descrição
Gene	Elemento básico, parte de um cromossomo
Cromossomo	Seqüência de genes formando um componente do sistema
Indivíduo	Formado por um conjunto de cromossomos
População	Número de indivíduos em uma geração
Geração	Estágio iterativo da evolução das populações
Pais	Indivíduos selecionados para gerar descendente
Descendentes	Indivíduos gerados a partir dos pais
Aptidão	Um dado valor indicativo de quanto um indivíduo está próximo do ótimo
Seleção	Operação em que indivíduos da população atual são escolhidos para integrar a nova população
Cruzamento	Operação de troca de genes entre dois indivíduos
Mutação	Operação de alteração do valor de um ou mais genes
Política elitista	Garante ou dá prioridade à permanência dos indivíduos mais adaptados

O tamanho da população e o número de gerações foram estabelecidos para se obter uma curva similar à desejada. Nos modelos analisados foi adotada uma população composta por 250 indivíduos, os quais evoluem por 1000 gerações para alcançar precisão da ordem de  $10^{-12}$ . O modelo utiliza os mecanismos de seleção por torneio e elitismo [14]. Na seleção por torneio, 10% dos indivíduos da população são escolhidos aleatoriamente como candidatos a pais, os quais serão definidos em um sorteio futuro. No elitismo garante-se a continuidade dos cinco melhores indivíduos por todas as gerações, evitando os efeitos negativos advindos da perda do bom material genético. O uso de cruzamento em 2 pontos aumenta a diversidade do material genético, acelerando a velocidade de convergência do modelo [15], [16]. Foram incluídos dois processos de mutação. Na mutação uniforme o valor real de um gene é modificado segundo uma probabilidade  $m_1$ ; enquanto na mutação de ajuste fino apenas uma unidade decimal do gene sofre alteração segundo uma probabilidade  $m_2$ . Neste caso, um gene com valor 1,333 poderia ser alterado para 1,363. O modelo também incorpora o mecanismo de inserção de imigrantes compensando eventuais perdas na diversidade da população [17].

Os algoritmos genéticos apresentam relativamente poucas exigências para sua aplicação, as quais incluem um mapeamento entre o espaço de busca e os cromossomos (representação), um conjunto de operadores, e uma função de adaptação.

#### A. Representação do Problema em AG

A escolha da representação é um ponto-chave na operação dos AGs, pois estes algoritmos manipulam representação em código do problema, e uma representação não-adequada pode limitar a relação entre o mundo real e o ambiente do AG.

No modelo proposto, cada gene,  $g_{im}$ , representa o valor real de um elemento básico do filtro. O conjunto de genes

forma um cromossomo,  $l_i$ , que representa um circuito característico. Uma matriz de transferência  $[T_i]$  específica caracteriza cada cromossomo  $l_i$ .

O conjunto de todos cromossomos compõe um indivíduo,  $(l_1, \dots, l_i, \dots, l_N)$ , representando um padrão de circuito com sua respectiva curva de resposta em frequência. A solução final é obtida por meio do produto das matrizes  $[T_i]$  dos  $N$  cromossomos,

$$[T] = \prod_{i=1}^N [T_i]. \quad (1)$$

Para o cálculo da resposta do circuito resultante, a matriz de espalhamento  $[S]$  é determinada por [18]:

$$\begin{bmatrix} S_{11} & S_{12} \\ S_{21} & S_{22} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{T_{21}}{T_{11}} & T_{22} - \frac{T_{21}T_{12}}{T_{11}} \\ 1 & -\frac{T_{21}}{T_{11}} \end{bmatrix}. \quad (2)$$

Cada indivíduo representa uma solução potencial para o problema. Se o indivíduo for composto por  $N$  cromossomos, e considerando  $M$  o número de genes, o sistema representará um circuito com  $N \times M$  componentes, conforme ilustra a Tabela 1.

TABELA 1. REPRESENTAÇÃO DA POLÍTICA DO SISTEMA.

$l_1$			$l_2$			...	$l_N$		
$g_{11}$	...	$g_{1M}$	$g_{21}$	...	$g_{2M}$	...	$g_{N1}$	...	$g_{NM}$

A função do AG proposto é determinar a resposta em frequência desejada (indivíduo) por meio de combinações dos diferentes tipos de circuitos ressonantes (cromossomos) e alterações dos valores dos componentes do circuito (genes).

#### B. Função de Aptidão

A função de aptidão designa um valor de aptidão para cada um dos indivíduos da população. Este valor reflete quão ajustado é o indivíduo em relação à solução do problema. Enquanto um processo de otimização tenta encontrar uma única solução (tão exata quanto possível), uma busca baseada em AG pode resultar em várias soluções. Desta forma, é necessário encontrar a melhor solução em um intervalo de tempo aceitável para a resolução do problema.

A função de aptidão, que determina a adequação relativa entre a solução proposta e a desejada, por meio de relações entre os parâmetros  $S$  dos dois circuitos, é dada por:

$$\hat{f}_{it} = \sum_{n=1}^{N_f} \left| S_{21}(f) - S_{21}^{GA}(f) \right|^2 + \left| S_{11}(f) - S_{11}^{GA}(f) \right|^2. \quad (3)$$

A função de aptidão é calculada por meio do erro médio quadrático dos parâmetros  $S$  da solução desejada e os obtidos pelo circuito equivalente com o AG, para todas as  $N_f$  frequências da faixa de interesse. O objetivo é determinar um circuito equivalente que apresente o menor erro entre as respostas desejada e resultante do circuito projetado.

#### C. Algoritmo Estruturado

O algoritmo genético proposto está apresentado esquematicamente na Fig. 1. Uma população inicial é gerada

aleatoriamente. Em seguida, é avaliada a aptidão de todos os indivíduos. A eles são aplicados os operadores genéticos (seleção, cruzamento e mutação) e são incluídos os imigrantes à população. O procedimento é repetido até que o critério de parada seja alcançado.

- Inicie o contador de gerações ( $t=0$ );
  - Leia a curva de resposta em frequência padrão;
  - Enquanto o critério de parada não for atingido:
    - Gere uma população inicial aleatória;
    - Calcule a função de aptidão para cada indivíduo;
    - Escolha os indivíduos mais aptos;
    - Aplique os operadores genéticos (seleção, cruzamento e mutação);
    - Execute a inserção de imigrantes;
    - Selecione os indivíduos para próxima geração;
    - Incremente o contador de gerações ( $t=t+1$ );
  - Apresente o circuito encontrado.
- Fim.

Fig. 1. Algoritmo genético proposto para o projeto de filtros.

### III. RESULTADOS NUMÉRICOS

Nesta seção serão apresentados três projetos de filtros: utilizando elementos discretos, microfitas, e híbrido que combina microfitas e elementos discretos.

#### A. Projeto de Filtros com Elementos Discretos

O AG tem como objetivo determinar os valores dos componentes e o layout de um circuito equivalente ao especificado. O circuito padrão, simulado no *Serenade* [12], está apresentado na Fig. 2.(a), e os valores dos componentes estão mostrados na Tabela 1. O filtro passa-altas apresenta faixa de rejeição até 800 MHz.

As probabilidades de cruzamento e mutação adotadas foram 80% e 5%, respectivamente, de mutação de ajuste fino 10% e taxa de inserção de imigrantes de 10%.

O circuito apresentado na Fig. 2.(b) corresponde ao circuito equivalente projetado pelo GA. Observe que o GA determinou o circuito dual do obtido no *Serenade*. Os valores dos componentes são mostrados na Tabela 2.

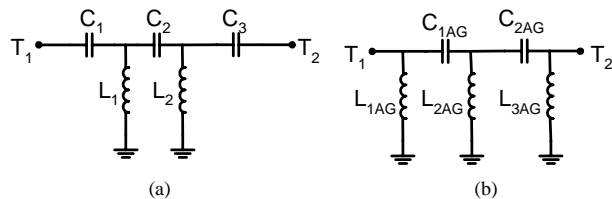


Fig. 2. Circuito simulado no *Serenade*. (b) Circuito equivalente projetado pelo algoritmo genético.

TABELA 2. VALORES DOS COMPONENTES SIMULADOS NO SERENADE E OS VALORES PROJETADOS PELO AG PARA O FILTRO PASSA-ALTAS.

Valores dos componentes simulados no <i>Serenade</i>	Valores dos componentes escolhidos pelo AG
$C_1=4,209$ pF	$L_1=10,492$ nH
$L_1=6,098$ nH	$C_1=2,437$ pF
$C_2=2,018$ pF	$L_2=5,044$ nH
$L_2=6,098$ nH	$C_2=2,440$ pF
$C_3=4,209$ pF	$L_3=10,548$ nH

Comparando-se a resposta em frequência encontrada pelo *Serenade* e pelo circuito projetado pelo AG (ver Fig. 3) verifica-se que o circuito equivalente reproduz com fidelidade a faixa de frequências exigida.

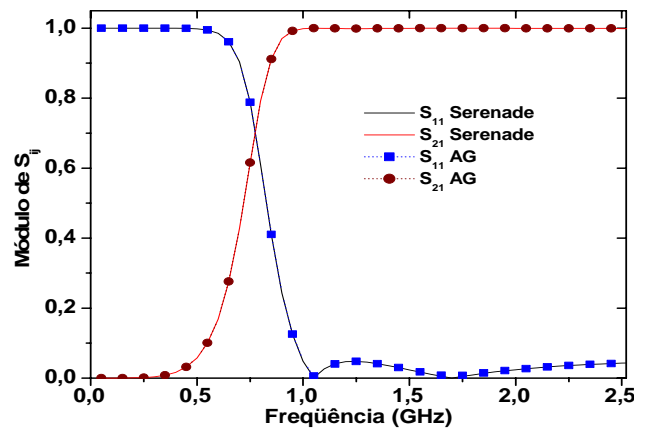


Fig. 3. Comparação entre a resposta em frequência encontrada pelo *Serenade* e pelo circuito projetado pelo AG para o filtro passa alta.

O ajuste dos operadores genéticos pode ser baseado em regras estabelecidas na literatura [9], [14]. O cruzamento é considerado o operador genético mais importante, e no AG canônico deve ser utilizado em uma taxa que varia de 0,6 a 0,9 [14]. Para ilustrar o efeito causado sobre o resultado final pelo uso incorreto da taxa de cruzamento, o modelo apresentado foi simulado com taxas de 0,1, 0,2, 0,4 e 0,8. O operador cruzamento afeta a velocidade de convergência do algoritmo, conforme apresentado na Fig. 4.

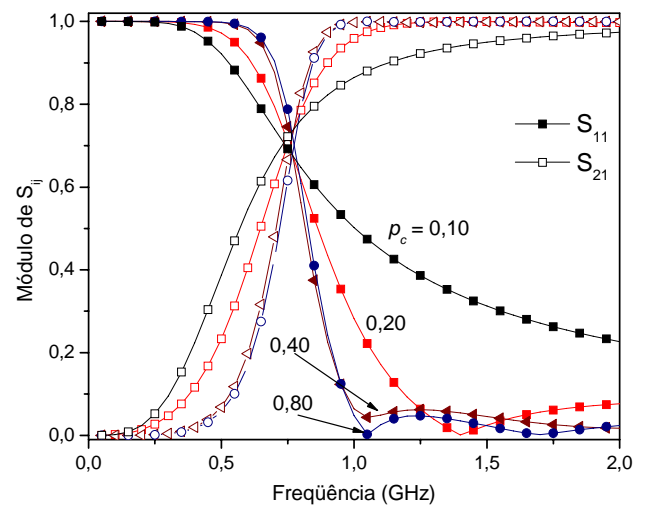


Fig. 4. Efeito do uso das taxas de cruzamento, 0,1, 0,2, 0,4 e 0,8, sobre a convergência do AG.

O efeito positivo provocado pela inserção dos imigrantes e pelo operador mutação por ajuste fino proposto neste trabalho estão apresentados na Fig. 5. Sem o uso destes parâmetros, o AG não apresenta convergência adequada no intervalo de gerações adotado.

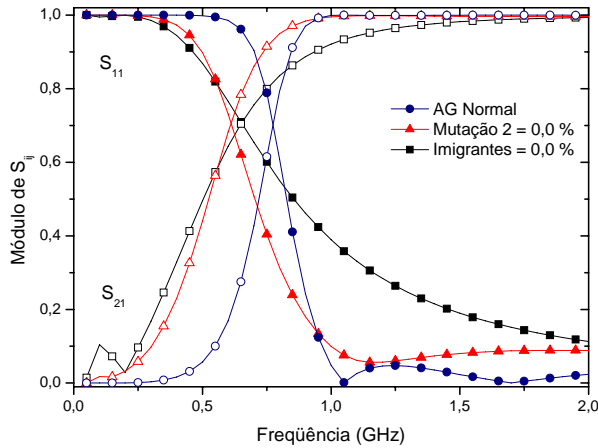


Fig. 5. Efeito da taxa de imigrantes e da mutação de ajuste fino proposta neste trabalho.

**B. Projeto de Filtros com Microfitas**

No projeto de filtros utilizando microfítas o AG relaciona a geometria das microfítas para determinar as dimensões de comprimento e largura,  $l$  e  $w$ , que reproduzem a resposta em frequência desejada. Nas simulações, foi utilizado dielétrico com espessura  $h = 0,508mm$  e permissividade dielétrica relativa  $\epsilon_r = 2,94$ .

Os operadores do AG apresentam probabilidades de cruzamento de 85%, de mutação de 5%, de mutação de ajuste fino igual a 10% e de taxa de inserção de imigrantes de 10%.

Os circuitos em microfita projetados pelo *Serenade* e pelo AG estão apresentados na Fig. 6. Os valores das dimensões das microfítas estão ilustrados na Tabela 3.

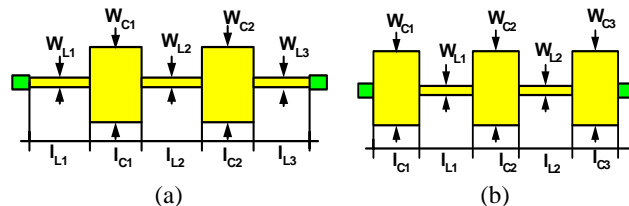


Fig. 6. Circuito simulado no *Serenade*. (b) Circuito equivalente determinado pelo algoritmo genético.

TABELA 3. VALORES DOS COMPONENTES SIMULADOS NO SERENADE E DOS VALORES PROJETADOS PELO AG PARA OS TRECHOS DE MICROFITAS.

Seção	Serenade		Algoritmo Genético	
	w(mm)	l(mm)	w(mm)	l(mm)
1	0,1062	2,80	7,43	2,00
2	10	1,150	0,20	2,60
3	0,1062	4,687	4,20	5,60
4	10	1,150	0,30	2,61
5	0,1062	2,60	5	3

A Fig. 7 mostra a comparação entre os módulos dos parâmetros  $S$  encontrados pelo circuito equivalente projetado pelo AG e pelo circuito simulado no *Serenade*. Observa-se nos gráficos apresentados para os parâmetros  $S$  que a concordância é adequada. A frequência de corte é, aproximadamente, 6,5 GHz.

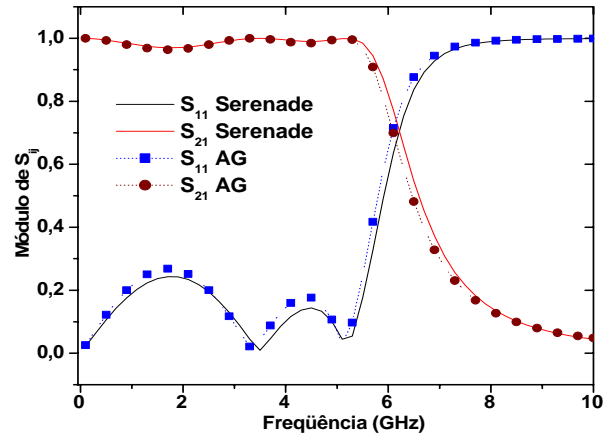


Fig. 7. Comparação da resposta em frequência encontrada pelo AG e pelo *Serenade* para projeto de filtros com microfítas.

Na Fig. 8 observa-se o processo de convergência do AG em função do número de gerações em direção à resposta final desejada. As curvas foram obtidas em intervalos de 100 gerações, até o limite de 1000, esta indicada por símbolos.

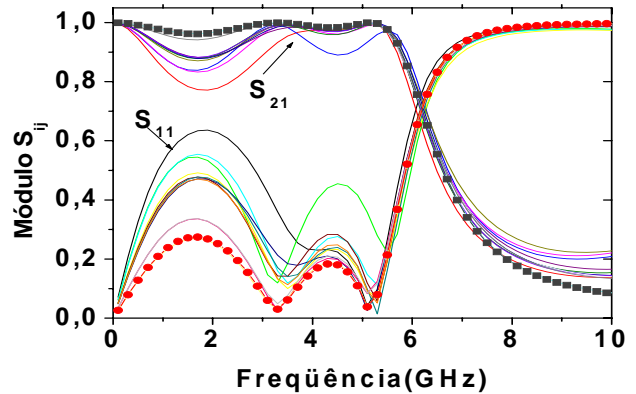


Fig. 8. Evolução do AG em busca da curva de resposta desejada. As curvas com símbolos representam as curvas de resposta final.

**C. Projeto de Filtros Híbridos**

O filtro apresentado na Fig. 9 é inicialmente simulado no *Serenade* para se obter a curva de resposta dos parâmetros  $S$ . Em seguida, o algoritmo genético opera para reproduzir a mesma resposta em frequência ajustando os valores dos elementos discretos e as dimensões das microfítas. Nesse exemplo o layout do circuito é fixo.

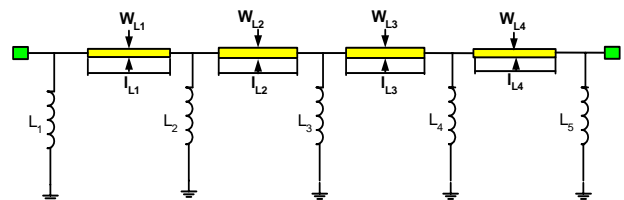


Fig. 9. Circuito usando indutores e trechos de microfita.

Nas simulações referentes à implementação com microfita foi utilizado para o dielétrico: espessura  $h = 0,508mm$  e

permissividade dielétrica relativa  $\epsilon_r = 9,8$ .

O AG utiliza probabilidades de cruzamento e mutação iguais a 80% e 5% respectivamente, mutação de ajuste fino igual a 10% e taxa de inserção de imigrantes de 10%.

Os valores dos indutores e as dimensões das microfitas (dadas em milímetros) obtidos para as duas simulações estão apresentados na Tabela 4. Nota-se uma boa concordância entre os valores simulados no *Serenade* e os valores encontrados pelo algoritmo genético permitindo a reprodução da curva desejada.

As curvas de resposta em frequência dos parâmetros S do circuito padrão e do circuito projetado pelo AG estão apresentadas na Fig. 10. Nota-se uma boa concordância entre as duas curvas para a faixa de frequência analisada. A faixa de frequências estendida é apresentada para evidenciar a resposta encontrada pelo AG.

TABELA 4. COMPARAÇÃO DOS VALORES DOS COMPONENTES SIMULADOS NO *SERENADE* E PELO AG PROPOSTO PARA OS TRECHOS DE MICROFITAS.

Seção	<i>Serenade</i>	Algoritmo Genético
1	$L_1=10,52$ nH	$L_{1GA}= 10,544$ nH
2	$W=0,735$   $l=28,700$	$W=0,735$   $l=28,704$
3	$L_2=4,019$ nH	$L_{2GA}=4,199$ nH
4	$W=1,065$   $l=28,156$	$W=1,049$   $l=28,180$
5	$L_3=3,251$ nH	$L_{3GA}= 3,500$ nH
6	$W=1,065$   $l=28,156$	$W=1,062$   $l=28,161$
7	$L_4=4,019$ nH	$L_{4GA}= 4,200$ nH
8	$W=0,735$   $l=28,704$	$W=0,722$   $l=28,730$
9	$L_5=10,52$ nH	$L_{5GA}= 11,645$ nH

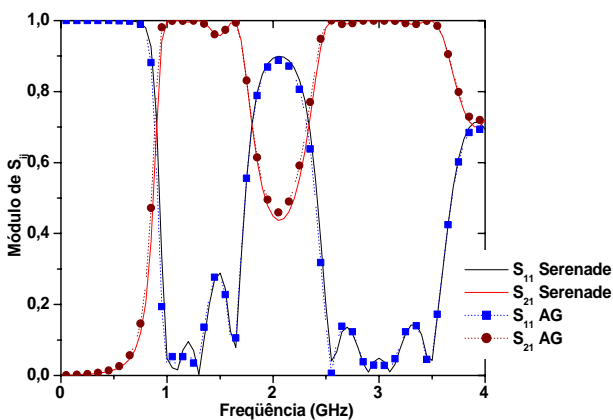


Fig. 10. Comparação entre a resposta em frequência encontrada pelo circuito projetado pelo AG e pelo circuito simulado no *Serenade* para o filtro passa-faixa. Faixa de frequências estendida é apresentada para evidenciar e melhor avaliar a concordância dos valores obtidos pelo AG.

O tempo médio de processamento para o AG proposto realizar o projeto dos filtros está ilustrado na Tabela 5.

TABELA 5. TEMPO DE PROCESSAMENTO DO AG NO PROJETO DOS FILTROS.

Modelo de Filtro	Tempo (segundos)
Elementos Discretos	50
Microfitas	120
Híbridos	180

Para a realização das simulações apresentadas nesse artigo foi utilizado um microcomputador com processador Pentium IV, 3,0 GHz de frequência de clock, 1 GB de memória RAM e plataforma Microsoft Windows XP.

#### IV. CONCLUSÕES

Um algoritmo para otimizar projetos de circuitos de microondas utilizando algoritmos genéticos foi implementado nesse trabalho. A idéia fundamental é que, a partir da especificação da curva de resposta em frequência de um determinado circuito passivo, o algoritmo genético determine um circuito equivalente com as mesmas características.

Foram projetados três filtros de microondas utilizando elementos discretos e microfítas. A partir das simulações realizadas com os dados fornecidos pelo algoritmo genético foi possível verificar a boa concordância entre a resposta em frequência desejada e a obtida pelo modelo. Foi mostrada também a influência dos parâmetros genéticos na velocidade de convergência do algoritmo genético em direção a curva de resposta desejada.

O algoritmo proposto se mostrou uma ferramenta eficiente no cálculo das respostas em frequência dos circuitos. Os resultados atestam a versatilidade e o potencial de futuras aplicações por meio da abordagem proposta.

#### REFERÊNCIAS

- [1] J.H. Holland, *Adaptation in Natural and Artificial Systems*. Ann Arbor, MI: Univ. Michigan Press, 1975.
- [2] Y. Rahmat-Samii e E. Michielssen, *Electromagnetic Optimization by Genetic Algorithms*. NY, EUA: John Wiley & Sons, Inc., 1999.
- [3] E.Michielssen, S. Ranjithan, e R.Mitra, "Optimal multilayer filter design using real coded genetic algorithms", *IEE Proc.Part J* 139,413-420 (1992).
- [4] A. John e R.H. Jansen, "Evolutionary Generation of (M)MIC Component Shapes using 2.5D EM Simulation and Discrete Genetic Optimization", 1996 MTT-S Digest, pp. 745-748, 1996.
- [5] H. Choo, A.Hutani, L.C.Trintinalia, e H.Ling, "Shape optimization of broadband microstrip antennas using the genetic algorithm", *Electron.Lett.*, vol.36, pp. 2057-2058, dezembro 2000
- [6] M. Villegas e O. Picon, "Creation of new shapes for resonant microstrip structures by means of genetic algorithms", *Electron. Lett.*, vol.33, pp.1509-1510, agosto 1997.
- [7] Pingjuan L. Werner, Raj Mitra e Douglas H. Werner, "Extraction of SPICE-Type equivalent circuits of microwave components and discontinuities using the genetic algorithm optimization technique", *IEEE Trans. on Advanced Packaging.*, vol. 23, no.1, fevereiro 2000.
- [8] <http://eesof.tm.agilent.com/>. Último acesso em 20 de abril de 2005.
- [9] J.R. Koza, *Genetic Programming: On the programming of computers by means of natural selection*. Cambridge, MA: MIT Press, 1992.
- [10] T. Nishino e T. Itoh, "Evolutionary generation of microwave line-segment circuits by genetic algorithms". *IEEE Trans. on Microwave Theory and Techniques*, vol. 50, no.9, pp. 2048-2054, setembro 2002.
- [11] J. R. Koza, K. Chellapilla, K. Deb, M. Dorigo, D.B. Fogel, Garzon, D.E. Goldberg, H. Iba, e R. Riolo, "Genetic Programming", *Proc. of the Third Annual Conference San Francisco, CA: M. Kaufmann*, 1998.
- [12] Ansoft Inc., [www.ansoft.com](http://www.ansoft.com). Último acesso em 20 de abril de 2005.
- [13] C. Darwin, *On the Origin of Species by Means of Natural Selection*. John Murray, 1859.
- [14] D. E. Goldberg, *Genetic Algorithms in Search, Optimization, and Machine Learning*. Reading, Mass.: Addison-Wesley, 1989.
- [15] K. A. De Jong e W. M. Spears, "A formal analysis of the role of multipoint crossover in genetic algorithms", *Annals of Mathematics and Artificial Intelligence*, vol. 5, issue 1, 1992.
- [16] W. M. Spears e K. A. De Jong "An analysis of multipoint crossover", *Proceedings Workshop of the Foundations of Genetic Algorithms*, pp. 301-315, 1991.
- [17] K. F. Man, K. S. Tang and S. Kwong, "Genetic algorithms: concepts and designs", *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 43, no. 5, pp. 519-534, October 1996.
- [18] K. C. Gupta, *Computer Aided Design of Microwave Circuits*. Norwood, MA: Artech House, 1981.