

Projeto de Filtro Passa-faixa em Microfita para Microondas Assistido por Algoritmo Genético

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

Resumo— O projeto assistido por algoritmo genético (AG) de filtros passa-faixa (FPF) para aplicações em microondas é descrito neste artigo. O filtro é projetado para implementação em microfita. A partir da resposta em frequência desejada para o FPF, o AG determina as dimensões das microfitas acopladas. Os resultados de simulações computacionais são comparados com os obtidos a partir de software comercial e demonstram a potencialidade da abordagem proposta no projeto de FPF.

Palavras-chave— microondas, filtro passa-faixas, microfita, otimização, algoritmo genético.

Abstract— This paper describes a microstrip bandpass filter (BPF) design for microwave applications by means of genetic algorithm (GA). Based on the required frequency response of the BPF, the GA determines the dimensions of the coupled microstrips. 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 BPF filter design.

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

I. INTRODUÇÃO

O projeto e simulação de circuitos para uso nas faixas de microondas e ondas milimétricas assistidos por algoritmos de otimização têm despertado grande interesse nos últimos tempos em face da complexidade e exigências de desempenho [1]. Várias abordagens têm sido propostas, destacando-se as que utilizam redes neurais artificiais [2]-[3] e algoritmos evolutivos [4]-[6].

Dentre os algoritmos baseados em princípios evolutivos, o algoritmo genético (AG) tem se destacado por ser computacionalmente simples e eficaz na busca por uma solução adequada. Ele é capaz de proporcionar confiabilidade e busca orientada em espaços complexos de soluções. Os princípios básicos dos AGs foram propostos por John Holland [7] 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.

A área de projeto e modelagem de circuitos e dispositivos para microondas e ondas milimétricas é muito promissora para o uso de AGs, principalmente quando se trata de circuitos e dispositivos que têm sido implementados com base em experiência de projetistas ou processo de tentativas, dado o número de parâmetros a serem considerados.

Helvécio M. Almeida, asah@terra.com.br, Marcos A. C. Lima, mcardoso@sel.eesc.usp.br, Amílcar C. César, 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).

Recentemente, Nishino e Itoh [4] fizeram uso de AG para otimizar topologias de circuitos com base em um conjunto de parâmetros. Dispositivos passivos como filtros e divisor de potência são sintetizados a partir de especificações de função de transferência. Chen e Lihui [5] utilizaram AG para extrair parâmetros de RF de indutores *on-chip*, determinando em seguida o circuito equivalente correspondente. Aqueles autores demonstraram que o uso de AG pode superar limitações encontradas em métodos tradicionais de extração de parâmetros. Caorsi *et al.* [6] utilizaram AG para sintetizar um divisor de potência em guia metálico de seção retangular em 10 GHz. A solução do problema é otimizar a posição do diafragma, espessura e altura. Além disso, a característica de paralelismo intrínseco do AG é explorada em processo de otimização por meio de processamento paralelo. Nishino e Itoh apresentaram em [8] uma técnica para projetar filtros em estruturas 3-D. As topologias dos circuitos são otimizadas pelo AG que trabalha com um conjunto de parâmetros físicos das linhas como seu comprimento e as conexões existentes entre elas. Feng *et al.* [9] utilizaram o AG para projetar as dimensões ótimas das microfitas acopladas para facilitar o projeto de filtros passa baixa

Dentre os circuitos para aplicações em altas frequências destacam-se os filtros passa-faixa (FPF) pelas inúmeras aplicações, especialmente em receptores. Para a sua realização, a técnica de microfita é escolhida por ser de fácil implementação e exibir bom desempenho [2],[3],[10],[11].

Neste artigo, dois projetos de filtros passa-faixa em microfita assistidos por algoritmo genético são descritos. O primeiro é um FPF implementado com trecho de linhas acopladas terminado em circuito aberto e o segundo é semelhante ao primeiro, mas com um trecho de linha isolada entre os acopladores. O AG determina todas as dimensões da associação em cascata de ressoadores e de trechos de linha a partir das características da resposta em frequência desejada. O filtro projetado é simulado por meio do programa Ansoft Designer SV [12]. Os resultados demonstram a versatilidade e aplicabilidade do algoritmo proposto.

II. FORMULAÇÃO DO PROBLEMA

Nesta seção são descritos os projetos dos filtros passa-faixa ideais e com microfita, a determinação dos parâmetros de espalhamento do acoplador direcional e do elemento ressonante, assim como o algoritmo genético proposto.

A. Filtro Passa-faixa (FPF)

A implementação do filtro passa-faixa é realizada por meio de associação de circuitos ressonantes LC em série ou paralelo. Tendo em vista as dificuldades tecnológicas para implementação utilizando componentes discretos em frequências elevadas, as seções de circuitos ressonantes são implementadas por meio de linhas de transmissão acopladas. Assim, o ressoador de quarto de onda implementado com

microfita é usualmente utilizado para a implementação de FPF.

O arranjo dos ressoadores pode ser obtido de duas maneiras: conectando-se a extremidade final de um acoplador à inicial de outro (*end coupling*) ou acoplado-se as partes entre as extremidades sucessivas (*edge coupling*), conforme apresentado na Figura 1 [13]. O primeiro tipo apresenta deficiência na troca de energia entre as microfítas, mesmo para separações muito pequenas, e os problemas causados por tolerância dimensional são bastante severos. Desta forma, o segundo arranjo é mais utilizado e será objeto de investigação neste trabalho.

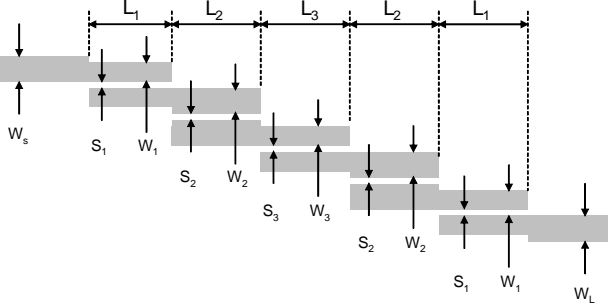


Figura 1. Filtro passa-faixa em microfita formado por associação em cascata de elementos ressonantes. Cada elemento ressonante é formado por duas linhas acopladas de comprimento $\lambda_g/4$ (L_1 a L_3). Duas portas de cada acoplador direcional são terminadas em circuito aberto ou curto-circuito.

A máxima transferência de potência é obtida quando o comprimento da região acoplada é $\lambda_g/4$ ou múltiplo desse valor, na qual λ_g é o comprimento de onda guiada referente à frequência central. Para obter a ressonância, cada elemento ressonador precisa ter um comprimento $\lambda_g/2$ ou múltiplo desse valor. Em resumo, o projeto de um acoplador em microfita engloba os quatro procedimentos:

- Determinação de um tipo de rede ressonante que irá realizar as especificações do filtro protótipo, como largura de faixa, perda de inserção e isolamento;
- Determinação das impedâncias características dos modos de excitação par e ímpar Z_{0e} e Z_{0o} , em função dos parâmetros do filtro;
- Determinação das dimensões da microfita, w (comprimento) e s separação, a partir das impedâncias Z_{0e} e Z_{0o} ;
- Cálculo do comprimento total do ressoador $2l$ ($\lambda_g/2$), e do comprimento da região de acoplamento do acoplador l ($\lambda_g/4$).

B. Determinação dos parâmetros de espalhamento (S) do Acoplador Direcional e Seção Ressonante

Considere os trechos de linhas acopladas, conforme apresentado na Figura 2. As portas 1 e 4 são terminadas com cargas casadas de valor Z_0 , enquanto que as portas 2 e 3 são terminadas em circuito aberto ou em curto-circuito. As linhas têm impedância característica Z_{0l} e são acopladas ao longo de uma seção de comprimento l .

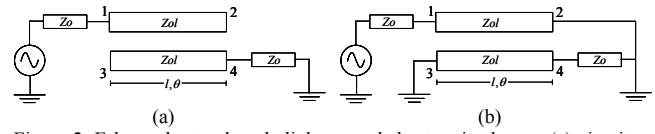


Figura 2. Esboço dos trechos de linhas acopladas terminadas em (a) circuito aberto ou (b) em curto-circuito.

A partir das relações entre tensões e correntes nas portas, os respectivos parâmetros, S_{ii} e S_{ik} , são determinados por [14]:

$$S_{ii} = \frac{j(Z_{0l}^2 - Z_0^2) \text{sen}(\theta)}{2Z_0 Z_{0l} \cos(\theta) + j(Z_{0l}^2 + Z_0^2) \text{sen}(\theta)}, \quad (1)$$

$$S_{ik} = \frac{2Z_0 Z_{0l}}{2Z_0 Z_{0l} \cos(\theta) + j(Z_{0l}^2 + Z_0^2) \text{sen}(\theta)}, \quad (2)$$

nas quais S_{ij} é o parâmetro S da porta j para a porta i , θ é o comprimento elétrico da linha e Z_{0l} , Z_0 são as impedâncias características da linha e da carga, respectivamente.

As Equações (1) e (2) são utilizadas para determinar os parâmetros S da rede de 4 portas correspondente ao acoplador direcional. No caso do FPF, duas portas de cada acoplador direcional são terminadas em circuito aberto ou curto-circuito, e a matriz S de dimensões 4×4 pode ser reduzida a outra de dimensões 2×2 , equivalente às portas de entrada e saída. Estas portas são aquelas que interconectam as seções em cascata. Antes de considerar duas portas do acoplador terminadas em circuito aberto ou curto-circuito, supõe-se, no caso geral, que as portas correspondentes estão terminadas em impedâncias cujos coeficientes de reflexão são Γ_i , na qual i ($=2,3$) indica a porta considerada. Assim, a matriz S é dada por

$$S = \begin{bmatrix} S_{11} + S_{12}\Gamma_2k_1 + S_{13}\Gamma_3k_2 & S_{14} + S_{12}\Gamma_2k_3 + S_{13}\Gamma_3k_4 \\ S_{41} + S_{42}\Gamma_2k_1 + S_{43}\Gamma_3k_2 & S_{44} + S_{42}\Gamma_2k_3 + S_{43}\Gamma_3k_4 \end{bmatrix}, \quad (3)$$

na qual

$$k_1 = \frac{S_{21}(1 - S_{33}\Gamma_3) + S_{31}S_{23}\Gamma_3}{-S_{32}\Gamma_2S_{23}\Gamma_3 + (1 - S_{22}\Gamma_2)(1 - S_{33}\Gamma_3)},$$

$$k_2 = \frac{S_{31}(1 - S_{22}\Gamma_2) + S_{21}S_{32}\Gamma_2}{-S_{32}\Gamma_2S_{23}\Gamma_3 + (1 - S_{22}\Gamma_2)(1 - S_{33}\Gamma_3)},$$

$$k_3 = \frac{S_{24}(1 - S_{33}\Gamma_3) + S_{34}S_{23}\Gamma_3}{-S_{32}\Gamma_2S_{23}\Gamma_3 + (1 - S_{22}\Gamma_2)(1 - S_{33}\Gamma_3)},$$

$$k_4 = \frac{S_{34}(1 - S_{22}\Gamma_2) + S_{24}S_{32}\Gamma_2}{-S_{32}\Gamma_2S_{23}\Gamma_3 + (1 - S_{22}\Gamma_2)(1 - S_{33}\Gamma_3)},$$

e S_{ij} são os parâmetros de espalhamento do acoplador direcional.

Portanto, as sete etapas que o algoritmo deve realizar para determinar os parâmetros S do acoplador ideal são:

- Calcular os parâmetros S de uma linha de transmissão;
- Calcular os parâmetros S de um acoplador direcional (4 portas);
- Reduzir a matriz S 4×4 do acoplador para a matriz S 2×2 correspondente do elemento ressonante de interesse;
- Aplicar a condição de curto-circuito ou circuito aberto nas portas desejadas;
- Determinar a matriz transmissão (T) correspondente à matriz S ;
- Calcular a matriz T equivalente à associação em cascata de seções por meio da multiplicação das matrizes T de cada

elemento;

g. Determinar a matriz S equivalente à matriz T.

Após a realização de todas as etapas, a resposta do FPF é determinada e pode ser comparada com os valores fornecidos pelo software Ansoft Designer.

Na implementação do filtro com microfita, as dimensões w e s e a constante dielétrica efetiva ϵ_{eff} são calculadas a partir das especificações do dielétrico, como a espessura, h , e a permissividade dielétrica, ϵ_r . As curvas de resposta devem reproduzir com a maior fidelidade possível a característica do filtro ideal. Nessa etapa, o cálculo de Z_{0e} e Z_{0o} é baseado nas formulações propostas por Kirschning e Jansen [15]. Essas formulações levam em consideração o efeito da dispersão sobre as características das microfitas.

O projeto do FPF em microfita é feito a partir das dimensões w , s e h , que determinarão os valores das impedâncias Z_{0e} e Z_{0o} e das constantes dielétricas efetivas ϵ_{effe} e ϵ_{effo} . De posse desses dados, os valores dos comprimentos elétricos θ_e e θ_o , das constantes de propagação β_e e β_o , e das velocidades de fase v_{pe} e v_{po} são calculados. Em seguida, determinam-se os parâmetros S para a configuração desejada. Por meio de associações em cascata dos elementos ressonantes é possível alterar a característica de resposta em frequência.

C. Algoritmo Genético

Os AGs trabalham com uma população de soluções, ou seja, um conjunto de soluções em que cada solução possível é um indivíduo da população e cada novo indivíduo gerado possui um valor de aptidão (*fitness*), em uma nova população (a nova geração). O AG utiliza uma analogia direta com a evolução natural, pressupondo que uma solução potencial do problema é um indivíduo. A solução ótima obtida (o padrão de circuito), descende dos melhores elementos das gerações anteriores, onde os atributos do indivíduo mais apto tendem a serem passados para as gerações seguintes até que o indivíduo com melhor aptidão seja encontrado [16].

A escolha da representação é um ponto-chave na operação dos AGs, pois estes algoritmos manipulam representação em código do problema, e o esquema de representação pode limitar severamente a janela pela qual o sistema observa seu conjunto solução. No algoritmo proposto, os parâmetros de cada elemento ressonante são representados por cromossomos. Cada gene que forma o cromossomo representa as impedâncias do modo e/ou as dimensões do elemento ressonante. O conjunto dos cromossomos que compõem o indivíduo representa uma política, isto é, os parâmetros das microfitas, conforme ilustram as Figuras 3 e 4 nas quais l é o comprimento físico da linha ideal, w é a largura da fita do material condutivo e s é a separação das microfitas.

| El 1 | | | El 2 | | | ... | | | El n | | |
|----------|----------|-------|----------|----------|-------|-----|--|--|----------|----------|-------|
| Z_{0e} | Z_{0o} | l_1 | Z_{0e} | Z_{0o} | l_2 | | | | Z_{0e} | Z_{0o} | l_n |

Figura 3. Representação de um indivíduo formado por vários cromossomos. Cada gene que forma o cromossomo representa um valor correspondente à impedância do modo de excitação (Z_{0e} , Z_{0o}) e/ou ao comprimento do elemento ressonante para o acoplador ideal (l_n).

| El 1 | | | El 2 | | | ... | | | El n | | |
|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-----|--|--|-------|-------|-------|
| w_1 | s_1 | l_1 | w_2 | s_2 | l_2 | | | | w_n | s_n | l_n |

Figura 4. Representação de um indivíduo formado por vários cromossomos. Cada gene que forma o cromossomo representa um valor correspondente às dimensões do elemento ressonante.

No primeiro caso abordado, o AG é utilizado para determinar os valores das impedâncias dos modos de excitação par e ímpar, Z_{0e} e Z_{0o} , e os comprimentos dos elementos ressonantes, para um acoplador ideal.

No segundo caso, o FPF é implementado por microfita e o AG determina os valores de w_i , s_i e l_i , que devem obedecer às relações $0,1 \leq w_i / h \leq 10$ e $0,1 \leq s_i / h \leq 10$ [15].

Nos AGs, a função de aptidão (ou função objetivo) é usada para designar um valor de aptidão para cada um dos indivíduos da população do AG, e este valor reflete quão ajustado é o indivíduo para a 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 total é calculada avaliando-se os parâmetros S do circuito proposto e do equivalente obtido com o AG para todas as N_f frequências de interesse, de tal forma que

$$fit_{\text{tot}} = \sum_{n=1}^{N_f} \left| S_{21}(f) - S_{21}^{GA}(f) \right|^2 + \left| S_{11}(f) - S_{11}^{GA}(f) \right|^2 \quad (8)$$

A função de aptidão, (8), determina a adequação relativa entre a solução proposta e a desejada, isto é, representa a diferença entre os valores desejados e obtidos. O objetivo é alcançar um conjunto de valores que apresente o menor erro possível.

O AG proposto neste trabalho utiliza os operadores genéticos como seleção, cruzamento e mutação, juntamente com a estratégia de cruzamento em dois pontos, política elitista e o mecanismo de inserção de imigrantes [16], compreendido como a inclusão de novos indivíduos à população.

III. RESULTADOS NUMÉRICOS

A. Projeto de FPF com trecho de linha acoplada terminada em circuito aberto

Nesta fase de validação do algoritmo, foi utilizado um circuito composto por 8 ressoadores ideais, cujas portas 2 e 3 estão terminadas em circuito aberto, conforme indica a Figura 2.(a). Os resultados da validação são exibidos na Figura 5 e na Tabela 1. Os resultados obtidos pelo AG são comparados aos fornecidos pelo software Ansoft Designer.

Para os casos analisados, o AG utiliza 100 indivíduos, com probabilidades de cruzamento e mutação iguais a 80% e 1%, respectivamente, taxa de inserção de imigrantes de 10% e um total de 1000 gerações. A precisão numérica adotada é 10^{-12} .

Os pontos de meia potência para o resultados obtidos pelo AG estão localizados na frequência inferior 908,107 MHz e na frequência superior 1191,876 MHz, enquanto que para o Ansoft Designer estão em 907,621 MHz e 1192,664 MHz, respectivamente. A aproximação obtida a partir do AG

apresenta uma boa concordância com os valores fornecidos pelo Ansoft Designer, utilizado para validação do método.

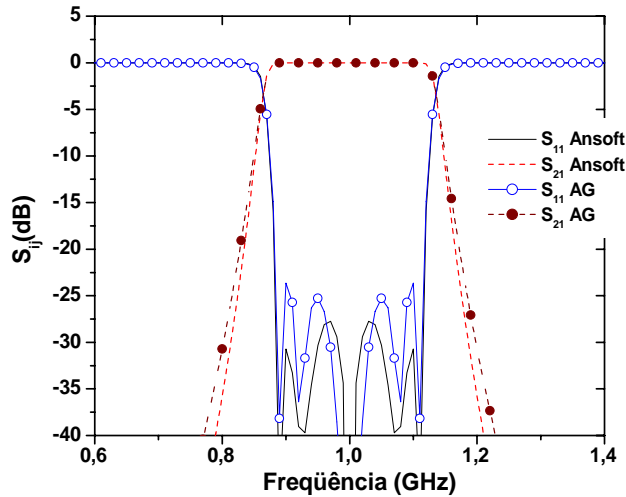


Figura 5. Comparação entre os resultados projetados pelo AG e a resposta obtida em simulação com o Ansoft Designer para o FPF com acoplador ideal.

TABELA 1. PARÂMETROS DO ACOPLADOR IDEAL.

| Sec. | Ansoft Designer | | | Algoritmo Genético | | |
|------|-----------------|---------|---------|--------------------|---------|---------|
| | Z0e (Ω) | Z0o (Ω) | l (mm) | Z0e (Ω) | Z0o (Ω) | l (mm) |
| 1 | 133,1803 | 55,5444 | 70,7558 | 107,8435 | 32,2025 | 69,3976 |
| 2 | 107,3325 | 57,4679 | 70,7558 | 115,9814 | 71,0919 | 72,2026 |
| 3 | 96,9885 | 60,1706 | 70,7558 | 64,1359 | 32,3605 | 69,7075 |
| 4 | 94,9028 | 60,9063 | 70,7558 | 101,0633 | 67,1418 | 72,4156 |
| 5 | 94,9028 | 60,9063 | 70,7558 | 120,6910 | 81,3932 | 70,4217 |
| 6 | 96,9885 | 60,1706 | 70,7558 | 83,0174 | 39,9920 | 72,4709 |
| 7 | 107,3325 | 57,4679 | 70,7558 | 138,3322 | 70,8742 | 68,7205 |
| 8 | 133,1803 | 55,5444 | 70,7558 | 130,8776 | 32,8643 | 64,0006 |

Na Figura 6 são apresentadas várias curvas mostrando a convergência do AG até a curva de resposta final desejada que é a curva indicada por símbolos.

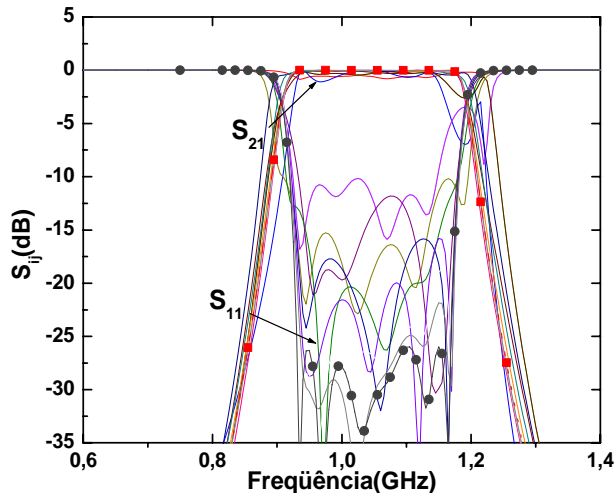


Figura 6. Evolução do AG em busca da curva de resposta desejada. As curvas com símbolos representam as curvas de resposta final.

Nas simulações referentes à implementação com microfita foi utilizado para o dielétrico: espessura $h = 1,575\text{mm}$ e constante dielétrica relativa $\epsilon_r = 2,2$. Os resultados estão apresentados na Figura 7 e na Tabela 2.

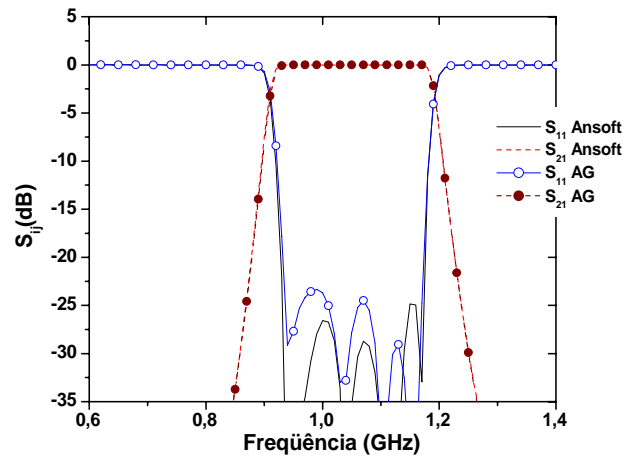


Figura 7. Comparação entre os resultados projetados pelo AG e as respostas obtidas na simulação com o Ansoft Designer para o FPF com acoplador implementado com microfita.

TABELA 2. PARÂMETROS DO ACOPLADOR IMPLEMENTADO COM MICROFITA.

| Sec | Ansoft Designer | | | Algoritmo Genético | | |
|-----|-----------------|---------|---------|--------------------|---------|---------|
| | w (mm) | s (mm) | l (mm) | w (mm) | s (mm) | l (mm) |
| 1 | 1,42841 | 0,23423 | 54,2404 | 1,44882 | 0,23443 | 54,4340 |
| 2 | 1,96661 | 0,48189 | 53,7716 | 1,95901 | 0,48180 | 53,8816 |
| 3 | 2,21215 | 0,78562 | 53,5143 | 2,19340 | 0,79620 | 53,4355 |
| 4 | 2,26096 | 0,88422 | 53,4564 | 2,35960 | 0,87420 | 53,3540 |
| 5 | 2,26096 | 0,88422 | 53,4564 | 2,25960 | 0,89422 | 53,4564 |
| 6 | 2,21215 | 0,78562 | 53,5143 | 2,2150 | 0,78630 | 53,5543 |
| 7 | 1,96661 | 0,48189 | 53,7716 | 1,9567 | 0,47900 | 53,5160 |
| 8 | 1,42841 | 0,23424 | 54,2404 | 1,4441 | 0,22464 | 54,9567 |

Os pontos de meia potência para o AG estão localizados na frequência inferior 910,90 MHz e na frequência superior 1190,00 MHz, enquanto que para o Ansoft Designer estão em 908,93MHz e 1192,044 MHz, respectivamente.

B. Projeto de FPF com trecho de linha acoplado terminado em circuito aberto e trecho de linha isolada

Na etapa de validação do algoritmo, foi utilizado um circuito composto por 11 elementos, conforme indica a Figura 8. Eles estão divididos em ressoadores ideais, cujas portas 2 e 3 estão terminadas em circuito aberto, e trechos de linha de transmissão ideais. Foram utilizados 6 acopladores direcionais intercalados por 5 trechos de linha isolada.

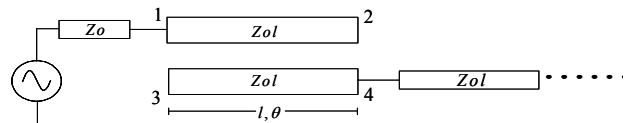


Figura 8. Esboço de trecho de linha acoplada terminada em circuito aberto e trecho de linha.

Para os casos apresentados, o AG utiliza 100 indivíduos, com probabilidades de cruzamento e mutação iguais a 80% e 1%, respectivamente, taxa de inserção de imigrantes de 10% e um total de 5000 gerações. A precisão numérica adotada é 10^{-12} .

O procedimento para determinar os parâmetros S do circuito proposto nesta seção é similar ao da seção anterior. Entretanto, devem ser calculados os parâmetro S de um acoplador direcional e de um trecho de linha.

Os resultados da validação são exibidos na Figura 9 e na Tabela 3. Apresenta-se na Figura 9 a comparação entre as

curvas dos parâmetros S do circuito simulado no Ansoft Designer e do circuito projetado pelo AG. Foi obtida uma boa concordância entre as duas curvas para a faixa de passagem analisada. Os pontos de meia potência para o resultados obtidos pelo AG estão localizados aproximadamente, para a, na frequência inferior 985,540 MHz e na frequência superior 1220 MHz, enquanto para o Ansoft Designer estão em 1000 MHz e 1230,55 MHz, respectivamente. O gráfico mostrado na Figura 9 exibe faixa estendida de valores de frequência até 2,5 GHz para que se possa verificar o comportamento do filtro em frequências além da faixa de interesse.

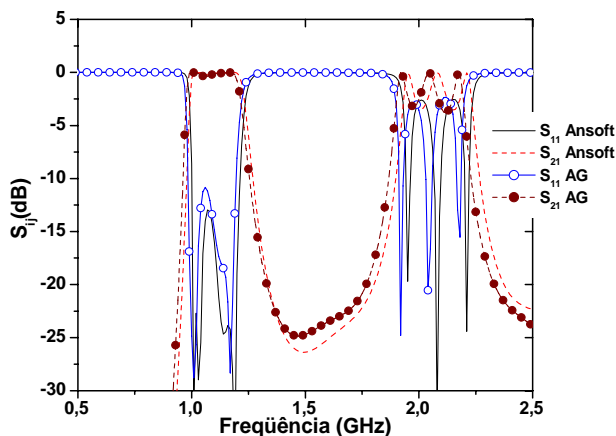


Figura 9. Comparação dos resultados projetados pelo AG com as respostas obtidas na simulação com o Ansoft Designer para o acoplador ideal com trecho de linha ideal.

TABELA 3. PARÂMETROS DO ACOPLADOR E DO TRECHO DE LINHA IDEAIS.

| | | Ansoft Designer | | Algoritmo Genético | | |
|----------------------|---------|-----------------|--------|--------------------|--------|--------|
| Acoplador Direcional | | | | | | |
| Seq | Z0e (Ω) | Z0o (Ω) | l (mm) | Z0e (Ω) | Z0o(Ω) | l (mm) |
| 1 | 166,854 | 40,740 | 36,710 | 166,900 | 41,500 | 36,855 |
| Trecho de linha | | | | | | |
| | Z0 (Ω) | | l (mm) | Z0 (Ω) | | l (mm) |
| 2 | 40 | | 73,420 | 38 | | 72,202 |
| Acoplador Direcional | | | | | | |
| 3 | 81,575 | 36,883 | 36,710 | 81,580 | 36,950 | 36,756 |
| Trecho de linha | | | | | | |
| 4 | 40 | | 73,420 | 40 | | 72,415 |
| Acoplador Direcional | | | | | | |
| 5 | 69,084 | 39,404 | 36,710 | 69,150 | 39,450 | 36,756 |
| Trecho de linha | | | | | | |
| 6 | 40 | | 73,420 | 40 | | 72,470 |
| Acoplador Direcional | | | | | | |
| 7 | 69,084 | 39,404 | 36,710 | 69,150 | 39,466 | 36,800 |
| Trecho de linha | | | | | | |
| 8 | 40 | | 73,420 | 40 | | 73,022 |
| Acoplador Direcional | | | | | | |
| 9 | 81,575 | 36,883 | 36,710 | 81,900 | 36,550 | 36,750 |
| Trecho de linha | | | | | | |
| 10 | 40 | | 73,420 | 38 | | 74,562 |
| Acoplador Direcional | | | | | | |
| 11 | 166,854 | 40,740 | 36,710 | 166,900 | 40,700 | 36,569 |

Nas simulações referentes à implementação com microfita foi utilizado para o dielétrico: espessura $h = 0,635\text{mm}$ e constante dielétrica relativa $\epsilon_r = 9,8$. Os resultados estão apresentados na Figura 10 e na Tabela 4.

Os pontos de meia potência para o resultados obtidos pelo AG estão localizados, aproximadamente, na frequência inferior 990 MHz e na frequência superior 1180 MHz, enquanto que para o Ansoft Designer estão em 990 MHz e 1200 MHz, respectivamente.

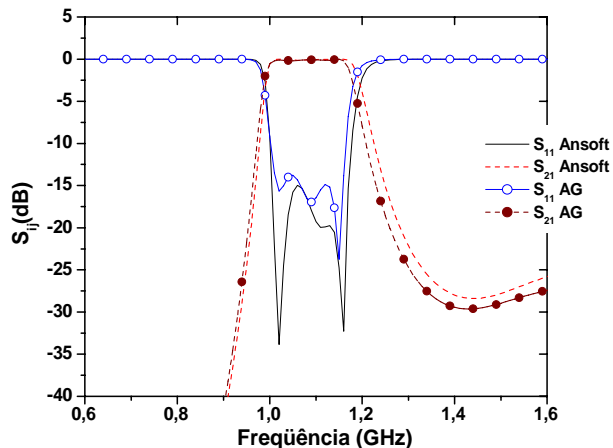


Figura 10. Comparação entre os resultados projetados pelo AG e a resposta obtida na simulação com o Ansoft Designer para o acoplador implementado com microfita e trecho de linha implementado com microfita.

TABELA 4. PARÂMETROS DO ACOPLADOR IMPLEMENTADO COM MICROFITA E DO TRECHO DE LINHA IMPLEMENTADO EM MICROFITA.

| | | Ansoft Designer | | | Algoritmo Genético | | |
|----------------------|---------|-----------------|--------|---------|--------------------|--------|--|
| Seq | w (mm) | s (mm) | l (mm) | w (mm) | s (mm) | l (mm) | |
| Acoplador Direcional | | | | | | | |
| 1 | 0,06137 | 0,02877 | 15,34 | 0,06144 | 0,02995 | 14,954 | |
| Trecho de linha | | | | | | | |
| 2 | 0,94 | - | 28,16 | 0,98 | - | 29,94 | |
| Acoplador Direcional | | | | | | | |
| 3 | 0,3861 | 0,1394 | 14,78 | 0,3845 | 0,144 | 14,85 | |
| Trecho de linha | | | | | | | |
| 4 | 0,94 | - | 28,16 | 0,955 | - | 29,16 | |
| Acoplador Direcional | | | | | | | |
| 5 | 0,4908 | 0,2611 | 14,6 | 0,5015 | 0,2575 | 14,33 | |
| Trecho de linha | | | | | | | |
| 6 | 0,94 | - | 28,16 | 0,949 | - | 28,27 | |
| Acoplador Direcional | | | | | | | |
| 7 | 0,4908 | 0,2611 | 14,6 | 0,5515 | 0,2775 | 14,65 | |
| Trecho de linha | | | | | | | |
| 8 | 0,94 | - | 28,16 | 0,945 | - | 28,09 | |
| Acoplador Direcional | | | | | | | |
| 9 | 0,3861 | 0,1394 | 14,78 | 0,4078 | 0,1375 | 14,70 | |
| Trecho de linha | | | | | | | |
| 10 | 0,94 | - | 28,16 | 0,974 | - | 28,18 | |
| Acoplador Direcional | | | | | | | |
| 11 | 0,06137 | 0,02877 | 15,34 | 0,06248 | 0,02975 | 15,78 | |

O tempo aproximado para a simulação dos filtros ideais foi aproximadamente 2 horas e 30 minutos e dos filtros implementados com microfita foi aproximadamente 6 horas. Apesar dos tempos despendidos para processamento parecerem excessivos, deve-se atentar para o fato de que os algoritmos de otimização podem ser usados em combinação com processos analíticos de projeto e/ou análise para otimizar determinados valores de componente ou conjunto de componentes ou ajustar partes específicas da curva de resposta. Nestes casos, o tempo despendido pode ser bem reduzido. Pode-se, ainda, lançar mão de processamento paralelo em casos de projetos mais complicados.

Projetar um circuito que exiba resposta em frequência arbitrária é a aplicação que mais se compatibiliza com a versatilidade de algoritmo de otimização, particularmente AG. Para verificar o potencial de aplicação da abordagem proposta, um circuito foi projetado pelo AG a partir de uma resposta em frequência arbitrária. Este circuito é baseado em associação de acopladores direcionais ideais, conforme mostrada na Figura 1. A Figura 10 mostra a resposta em frequência arbitrária proposta e a curva obtida pelo AG e a Tabela 5 mostra os valores dos componentes do circuito projetado. Pode-se observar que a concordância entre a

resposta desejada e a do circuito obtido pelo AG apresenta boas semelhanças dentro da faixa de frequência especificada. O tempo de processamento foi de aproximadamente 3 horas.

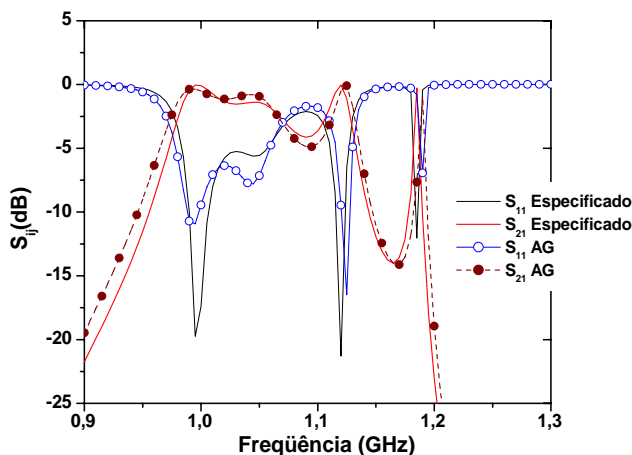


Figura 10. Comparação entre os resultados projetados pelo AG e a resposta obtida nas simulações com parâmetros S especificados.

TABELA 5. PARÂMETROS DO ACOPLADOR IDEAL.

| Algoritmo Genético | | | |
|--------------------|------------------|------------------|--------|
| Sec. | Z0e (Ω) | Z0o (Ω) | l (mm) |
| 1 | 126,600 | 55,528 | 74,940 |
| 2 | 100,490 | 68,090 | 74,940 |
| 3 | 95,651 | 65,785 | 68,129 |
| 4 | 92,651 | 61,785 | 68,129 |
| 5 | 100,491 | 60,090 | 72,678 |
| 6 | 156,600 | 80,528 | 76,646 |
| 7 | 100,651 | 40,785 | 90,854 |
| 8 | 78,651 | 10,785 | 84,037 |

IV. CONCLUSÕES

O projeto assistido por algoritmo genético (AG) de filtros passa-faixa (FPF) para aplicações em microondas foi descrito neste artigo. A partir de resposta em frequência dos FPF, o AG determina as dimensões das microfítas acopladas. Os resultados de simulações computacionais são comparados aos obtidos por um software comercial e demonstram a potencialidade da abordagem. O algoritmo proposto é capaz de determinar um circuito em microfítas para atender à resposta em frequência desejada. Um circuito que exibe resposta em frequência arbitrária foi projetado pelo AG.

O erro relativo apresentado nas curvas dos parâmetros S ocorre porque o AG projeta um circuito equivalente ao original utilizado na simulação no Ansoft Designer SV.

Para a realização das simulações apresentadas nesse artigo foi utilizado um PC de 3 GHz e 1 GB de memória RAM. O tempo aproximado para a simulação dos filtros ideais foi aproximadamente 2 horas e 30 minutos e dos filtros implementados com microfítas foi aproximadamente 6 horas.

REFERÊNCIAS

[1] D. de Zutter, J. Sercu, T. Dhaene, J. de Geest, F.J. Demuynek, S. Hammadi e C.-W. P. Huang, "Recent Trends in the Integration of Circuit Optimization and Full-Wave Electromagnetic Analysis", *Trans. on Microwave Theory Tech.*, vol. 52, no. 1, pp. 245-256, Janeiro 2004.

[2] M.H. Bakr, J.W. Bandler, M.A. Ismail, J.E. Rayas-Sánchez e Qi-Jun Zhang, "Neural Space-Mapping Optimization for EM-Based Design", *IEEE Trans. on Microwave Theory Tech.*, vol. 48, no. 12, pp. 2307-2315, dezembro 2000.

[3] J.W. Bandler, M.A. Ismail, J.E. Rayas-Sanchez e Qi-Jun Zhang, "Neuromodeling of Microwave Circuits Exploiting Space-Mapping Technology", vol. 47, no. 12, pp. 2417-2426, dezembro 1999.

[4] T. Nishino e T. Itoh, "Evolutionary generation of microwave line-segment circuits by genetic algorithms", *IEEE Trans. on Microwave Theory Tech.*, vol. 50, no. 9, pp. 2048-2055, setembro de 2002.

[5] C. Zhen e G. Lihui, "Application of genetic algorithm in modeling RF on-chip inductors", *IEEE Trans. On Microwave Theory Tech.*, vol. 51, no. 2, pp. 342-346, fevereiro de 2003.

[6] S. Caorsi, M. Donelli, A. Massa e M. Raffetto, "A parallel implementation of an evolutionary-based automatic tool for microwave circuit synthesis: preliminary results", *Microwave and Opt. Tech. Lett.*, vol. 35, no. 3, pp. 169-172, novembro de 2002.

[7] J.H. Holland, "Adaptation in Natural and Artificial Systems", Ann Arbor, MI: Univ. Michigan Press, 1975.

[8] T. Nishino e T. Itoh, "Evolutionary generation of 3-D line-segment circuits with a broadside-coupled multiconductor transmission-line model", *IEEE Trans. on Microwave Theory Tech.*, vol. 50, no. 10, pp. 2045-2055, outubro de 2003.

[9] Liu. Feng, Lu Wanzheng, Zheng Qirong, "An improved genetic algorithm optimizing microstrip filter with equal width", *Antennas, Propagation and EM theory, 2003 6th International Symposium*, pp 851-855, novembro de 2003

[10] W.-N. Chen, M.-H. Weng, T.-H. Huang, T.-C. Cheng e B.-T. Dai, "Microstrip coupled-line bandpass filter with a multilayer structure", *Microwave and Optical Technology Letters*, vol. 39, no. 6, pp. 493-495, 20 de dezembro 2003.

[11] J.-S. Park, J.-S. Yun e D. Ahn, "A Design of the Novel Coupled-Line Bandpass Filter Using Defected Ground Structure With Wide Stopband Performance", *IEEE Trans. on Microwave Theory Tech.*, vol. 50, no. 9, pp. 2037-2043, setembro 2002.

[12] Ansoft Inc., www.ansoft.com. Último acesso em 20 de abril de 2005.

[13] T.C.Edwards, "Foundations for Microstrip Circuit Design", Wiley Press., 1981B

[14] K.C. Gupta, R. Garg and R. Chadha, "Computer Aided Design of Microwave Circuits", Artech House Inc., Norwood, MA, 1981.

[15] M. Kirschning and R.H. Jansen, "Accurate wide-range design equations for the frequency-dependent characteristics of parallel coupled microstrip lines", *IEEE Trans. on Microwave Theory Tech.*, vol. 32, no. 1, pp. 83-90, janeiro 1984.

[16] K.-F. Man, K.-S. Tang e S. Kwong, "Genetic Algorithms: Concepts and Designs", *IEEE Trans. on Industrial Electronics*, vol. 43, no. 5, pp. 519-534, outubro de 1996.