

CIRCUITOS EM MICROFITA

Alfrêdo Gomes Neto, Jefferson Costa e Silva, Joabson Nogueira de Carvalho
Grupo de Telecomunicações e Eletromagnetismo Aplicado - GTEMA
Escola Técnica Federal da Paraíba - ETEFPB
Av. 1º de maio, 720, João Pessoa, PB, 58015-430
e-mail: alfredo@etfpb.br

Resumo — Neste trabalho é apresentado um procedimento para o cálculo de circuitos em microfitas, tendo como exemplo o projeto de dois filtros passa-baixas, um com resposta tipo Chebyshev e o outro Butterworth. A simulação dos filtros projetados é feita através de programas distintos, observando-se uma boa concordância dos resultados numéricos com as especificações do projeto. Tratando-se de circuitos em microfitas, cuja fabricação é relativamente simples, dispõe-se de um recurso de grande valia no ensino das disciplinas relacionadas às microondas. Resultados experimentais serão apresentados em um trabalho posterior.

1. Introdução

O ensino de disciplinas relacionadas com a faixa de frequência correspondente às microondas (ondas, microondas, antenas, etc.) tem sido objeto de várias discussões [1] - [5], sendo observada, como uma das maiores deficiências, a falta de aulas práticas. O surgimento de programas computacionais para o projeto auxiliado por computador (CAD), minimiza o efeito dessa deficiência, mas parece não ser o suficiente. Tratando-se muitas vezes de programas para aplicações industriais, esses CADs nem sempre são acessíveis, seja pelo custo, seja pelos recursos computacionais necessários à sua execução.

Entretanto, na bibliografia especializada, são encontrados programas computacionais que, mesmo sem os recursos dos CADs co-

merciais, permitem o projeto de dispositivos em microondas [6], [7], [8]. Aliando a essa disponibilidade, as facilidades inerentes ao processo de fabricação de circuitos em microfitas (“microstrip”), obtém-se um recurso de grande valia no ensino das disciplinas relacionadas às microondas, permitindo não só a sedimentação dos conceitos clássicos da teoria eletromagnética, assim como os princípios das modernas técnicas de projeto de circuitos integrados em microondas (MIC).

Neste artigo são apresentados os procedimentos básicos do projeto de circuitos em microfitas, tendo como exemplos o projeto de dois filtros passa-baixas. Comparados com resultados obtidos por outros métodos, os resultados numéricos encontrados apresentam uma boa concordância com as especificações do projeto. Em um trabalho posterior, serão apresentados os resultados experimentais para os filtros calculados.

2. Projeto

O projeto de circuitos em microfitas envolve, basicamente, as seguintes etapas:

1. Faixa de frequência;
2. Características físicas do substrato (constante dielétrica e altura do substrato);
3. Características elétricas desejadas (filtro, acoplador, divisor de potência, etc.);
4. Determinação do circuito equivalente em microfitas que atenda às especificações de 3;
5. Verificação se as dimensões obtidas em 4 não são inviáveis para a técnica de fabricação a ser utilizada;

6. Simulação do circuito projetado;
7. Aceitação ou correções;
8. Caracterização experimental.

A seguir são detalhadas essas etapas, com excessão da caracterização experimental (a ser apresentada em um próximo artigo), tendo como aplicação o projeto de dois filtros passa-baixa.

Faixa de frequência

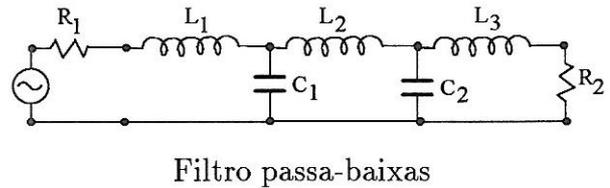
A escolha da faixa de frequência é determinada pelo objetivo da aplicação. Neste trabalho optou-se pela faixa de 100MHz até 1000MHz, pois permite a utilização de substratos de baixo custo e a caracterização experimental pode ser realizada com equipamentos de mais fácil acesso.

Características físicas do substrato

Como substrato, optou-se pela utilização de placas de dupla face para confecção de circuito impresso, tendo como dielétrico fibra de vidro. Em geral, essas placas apresentam uma espessura de aproximadamente 1.5mm e constante dielétrica em torno de 4.8. Além do baixo custo, podem ser encontradas com relativa facilidade nas lojas de material eletrônico, sendo sua utilização limitada à aproximadamente 3.5GHz.

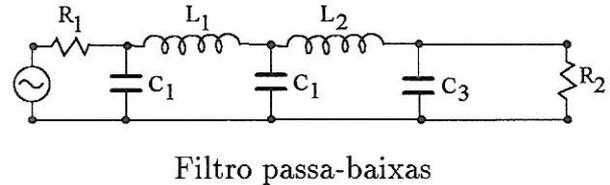
Características elétricas desejadas

Para exemplificar os procedimentos propostos neste trabalho, foram escolhidos dois filtros passa-baixas, ambos com frequência de corte em 625MHz e atenuação de 20dB em 1000MHz. Um apresenta uma resposta tipo Chebyshev, com 0.1dB de ondulação na banda passante e o outro com uma resposta tipo Butterworth. Considera-se as impedâncias de entrada e saída iguais à 50Ω. A determinação dos componentes desses filtros (capacitores e indutores) pode ser feita utilizando os procedimentos clássicos do projeto de filtros, encontrados em vários livros, o que não será aqui detalhado. Tendo como referências [8] e [9], foram obtidos os circuitos apresentados em



Filtro passa-baixas

Figura 1: Resposta Chebyshev



Filtro passa-baixas

Figura 2: Resposta Butterworth

Fig. 1 (resposta Chebyshev) e em Fig. 2 (resposta Butterworth).

	Componentes calculados	
	Chebyshev	Butterworth
R1(Ω)	50	50
R2(Ω)	50	50
L1(nH)	14.60	20.60
L2(nH)	25.15	20.60
L3(nH)	14.60	xxxxx
C1(pF)	6.98	3.15
C2(pF)	6.98	10.19
C3(pF)	xxx [‡]	3.15

Determinação do circuito equivalente em microfita

Na determinação do circuito equivalente cada seção do circuito projetado é substituída pelo seu equivalente em microfita. Para os circuitos em questão foram utilizadas as equivalências apresentadas em Fig. 3, detalhadas em [8].

Para essas equivalências são válidas as seguintes expressões:

$$l < \lambda_g/4 \quad (1)$$

$$l_L = \frac{\lambda_{gl}}{2\pi} \operatorname{sen}^{-1} \left(\frac{\omega L}{Z_{0L}} \right) \quad (2)$$

Componentes em microfita
Resposta Butterworth

	Imp.(Z_0)	Larg.(W)	Comp.(ℓ)
R1	50.00	2.7	xxxx
R2	50.00	2.7	xxxx
L1	82.25	1.0	58.1
L2	82.25	1.0	58.1
C1	5.77	41.1	2.6
C2	5.77	41.1	8.4
C3	5.77	41.1	2.6

Obs: Z_0 em Ω , W e ℓ em mm

$$h=1.5\text{mm e } \epsilon_r=4.8$$

Em Fig. 4 e em Fig. 5 são apresentados, em escala, os filtros calculados.

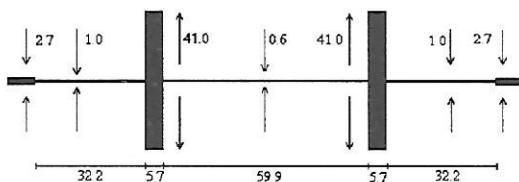


Figura 4: Resposta Chebyshev

Verificação das dimensões obtidas

O próximo passo consiste em verificar se as dimensões são viáveis para o substrato e a técnica de fabricação a ser utilizada. Neste trabalho será considerada como técnica de fabricação a serigrafia com corrosão

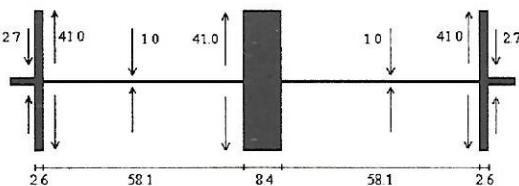


Figura 5: Resposta Butterworth

em percloreto de ferro, tendo em vista o seu baixo custo e as facilidades de sua realização. Assim sendo, deve-se evitar larguras menores que 0.5mm. Evidentemente, o comprimento total do filtro não deve ser demasiadamente grande, para evitar problemas de perdas. Finalmente, prevalece a regra do bom senso.

Concluindo, observa-se que as dimensões determinadas estão dentro de padrões aceitáveis.

Simulação do circuito projetado

A simulação do circuito projetado foi realizada utilizando dois programas computacionais distintos.

O primeiro programa, MIFITA, é baseado na técnica da conservação da potência complexa e no modelo do guia de ondas equivalente [11], [12]. Esse programa foi desenvolvido especificamente para os circuitos em microondas, levando em consideração, inclusive, os modos de ordem superior e os efeitos das descontinuidades.

O segundo programa, "Electronics Workbench - Analog Module, v. 2.0, IIT, 1991" considera os componentes concentrados calculados (indutores, capacitores e resistores). Embora mais limitado, pois não considera os efeitos das descontinuidades, o seu resultado pode servir como referência, desde que a faixa de frequência adotada não excite modos de ordem superior no circuito em microfita.

Observando os resultados apresentados pela simulação, Fig. 6 e Fig. 7, verifica-se que:

a) Os valores encontrados para a frequência de corte estão próximos ao desejado para ambos os filtros, seja através da simulação com o programa MIFITA, seja com o programa "Electronics ...";

b) Com a simulação através do programa MIFITA a atenuação na frequência de 1000MHz ficou menor que os 20dB especificados, principalmente para a resposta Chebyshev. Contudo, esse resultado é facilmente justificado, visto que, conforme ci-

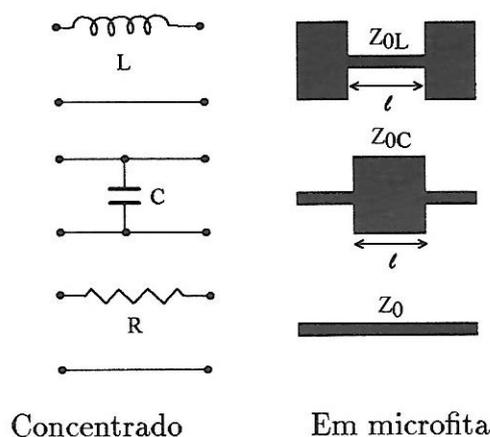


Figura 3: Equivalência entre componentes

$$l_C = \frac{\lambda_{gc}}{2\pi} \text{sen}^{-1}(\omega C Z_{0c}) \quad (3)$$

$$\lambda_g = \frac{3.10^8}{f_c \sqrt{\epsilon_{r0}}} \quad (4)$$

Onde:

- λ_g é o comprimento de onda guiado;
- Z_0 é a impedância característica da seção considerada;
- f_c é a frequência de corte do filtro;
- ϵ_{r0} é a constante dielétrica efetiva para o caso estático

O valor de Z_0 é calculado a partir de um valor atribuído à largura da fita (W), em uma determinada seção, utilizando as expressões (5) e (6), apresentadas em [6].

$$\frac{W}{h} \leq 1$$

$$Z_0 = \frac{\eta}{2\pi \sqrt{\epsilon_{re}}} \ln \left(\frac{8h}{W} + 0.25 \frac{W}{h} \right) \quad (5)$$

$$\frac{W}{h} \geq 1$$

$$Z_0 = \frac{\eta}{\sqrt{\epsilon_{re}}} \kappa^{-1} \quad (6)$$

Obs: O valor da espessura de metalização foi desprezado ($t = 0$).

sendo,

$$\eta = 120\pi \quad (7)$$

$$\kappa = \left\{ \frac{W}{h} + 1.393 + \frac{2}{3} \ln \left(\frac{W}{h} + 1.444 \right) \right\} \quad (8)$$

$$\epsilon_{re} = \frac{(\epsilon_r + 1)}{2} + \frac{(\epsilon_r - 1)}{2} F(W/h) \quad (9)$$

com,

$$\frac{W}{h} \leq 1$$

$$F(W/h) = \left(1 + 12 \frac{h}{W} \right)^{-\frac{1}{2}} + 0.041 \left(1 - \frac{W}{h} \right)^2 \quad (10)$$

$$\frac{W}{h} \geq 1$$

$$F(W/h) = \left(1 + 12 \frac{h}{W} \right)^{-\frac{1}{2}} \quad (11)$$

No cálculo de ϵ_{r0} , foram utilizadas as expressões apresentadas em [10], que não serão aqui detalhadas. Entretanto, para uma primeira aproximação, pode ser considerado que $\epsilon_{r0} \approx \epsilon_r$.

A partir das equações (5)-(11), arbitrando o valor da largura de cada seção, foram determinadas as seguintes dimensões para as seções equivalentes em microfita:

Componentes em microfita
Resposta Chebyshev

	Imp. (Z_0)	Larg. (W)	Comp. (ℓ)
R1	50.00	2.7	xxxx
R2	50.00	2.7	xxxx
L1	82.25	1.0	32.2
L2	99.93	0.6	59.9
L3	82.25	1.0	32.2
C1	5.77	41.1	5.7
C2	5.77	41.1	5.7

Obs: Z_0 em Ω , W e ℓ em mm

tado anteriormente, o programa MIFITA leva em consideração os efeitos das descontinuidades, reduzindo, quando comparado aos resultados do programa "Electronics ...", a atenuação esperada. Esse efeito será mais acentuado quanto maior for as descontinuidades apresentadas pelo circuito, daí a maior influência no filtro com resposta tipo Chebyshev.

Apesar das diferenças encontradas, os resultados obtidos indicam a aplicabilidade das etapas de projeto propostas. Caso fosse necessário, novas dimensões poderiam ser especificadas, assim como, novas simulações realizadas, levando a um refinamento do projeto.

Aceitação ou correções

A aceitação ou rejeição do circuito projetado depende, principalmente, do fim ao qual o mesmo se destina, cabendo essa decisão ao projetista. Prevalece, novamente, a regra do bom senso. Neste trabalho, os resultados apresentados foram considerados aceitáveis.

Caracterização experimental

Essa talvez seja uma das mais interessantes etapas do projeto, onde a teoria une-se à prática. Contudo, os procedimentos e os resultados inerentes a essa etapa serão apresentados em um próximo trabalho.

3. Conclusão

Neste trabalho foi apresentado um procedimento para o projeto de circuitos em microfita, tendo como exemplo o projeto de dois filtros passa-baixas, um com resposta tipo Chebyshev e o outro Butterworth. Os resultados numéricos apresentados pela simulação dos filtros projetados são coerentes, indicando a aplicabilidade das etapas de projeto apresentadas.

Agradecimentos

Este trabalho é parcialmente financiado pelo CNPq.

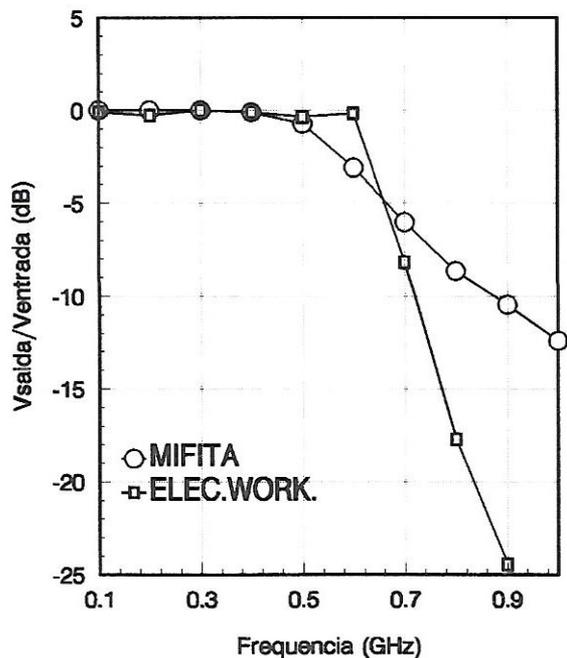


Figura 6: Resposta Chebyshev

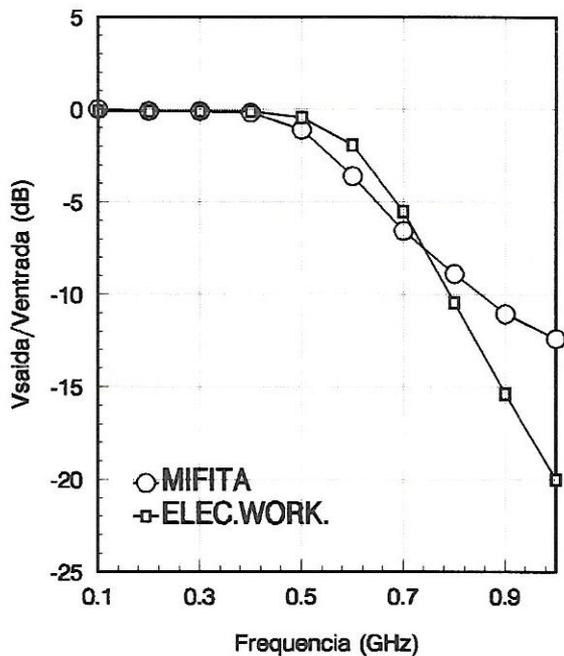


Figura 7: Resposta Butterworth

Referências

- [1] Atílio José Giarola. "The teaching of microwave theory and techniques and of antennas and propagation in brazilian universities". In *SBMO 91 International Microwave Conference/Brazil Proceedings*, pp. 146–150, Rio de Janeiro, BRAZIL, July 1991.
- [2] P. R. Herczfeld and C. M. Mablekos. "Microwave engineering education in the USA: One example". In *SBMO 91 International Microwave Conference/Brazil Proceedings*, pp. 140–145, Rio de Janeiro, BRAZIL, July 1991.
- [3] Marbey Manhães Mosso. "An example of microwave education in Brazil". In *SBMO 91 International Microwave Conference/Brazil Proceedings*, pp. 157–163, Rio de Janeiro, BRAZIL, July 1991.
- [4] C. S. Aitchson. "Modern microwave education in the United Kingdom". In *SBMO 91 International Microwave Conference/Brazil Proceedings*, pp. 151–156, Rio de Janeiro, BRAZIL, July 1991.
- [5] "Sessão Especial de Posters". "Software Educacional ou Para auxílio a Projeto de Microondas ou Telecomunicações. In *TELEMO'92*, Julho 1992.
- [6] K. C. Gupta, Ramesh Garg, and I. J. Bahl. *Microstrip Lines and Slotlines*. Artech House, Norwood, MA, 1979.
- [7] Tatsuo Itoh, editor. *Numerical Techniques for Microwave and Millimeter-Wave Passive Structures*. John Wiley and Sons, Inc., New York, New York, 1989.
- [8] Vincent F. Fusco. *Microwave Circuits - Analysis and Computer-Aided Design*. Prentice-Hall International, Ltd., Great Britain, 1987.
- [9] Gobind Daryanani. *Principles of Active Network Synthesis and Design*. John Wiley and Sons, Inc., Singapore, 1976.
- [10] Masanory Kobayashi. "A dispersion formula satisfying recent requirements in microstrip cad". *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, 36:1246–1250, August 1988.
- [11] Alfrêdo Gomes Neto. *Análise Teórica de Descontinuidades em Microfita pelo Método da Conservação da Potência Complexa*. Dissertação de Mestrado, UFPB, Campina Grande, Paraíba, Brasil, novembro 1989.
- [12] Alfrêdo Gomes Neto and Mário de S. Araújo Filho and Creso S. da Rocha. "Análise de filtros em microfita a partir da aplicação da técnica da conservação da potência complexa". In *TELEMO'92*, pp. 611–617, Brasília, DF, Brasil, julho 1992.