

ESTUDO E PROJETO DE FILTRO LC PASSA-BAIXA DE 1,5 GHz DE LIMITE DE PASSAGEM COM COMPONENTES PASSIVOS SMT DE MICROONDAS

Arnaldo de Carvalho Junior

Mestre em Engenharia, Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de São Paulo, Campus Cubatão (IFSP Cubatão), SP, Brasil.

João Francisco Justo Filho

Doutor, Politécnica Universidade de São Paulo, SP, Brasil.

Alexandre Maniçoba

Doutor, Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de São Paulo, Campus Cubatão (IFSP Cubatão), SP, Brasil.

Fátima Salete Correra

Doutora, Politécnica Universidade de São Paulo, SP, Brasil.

RESUMO: O projeto e desenvolvimento de um filtro passa-baixa (FPB) utilizando indutores (L) e capacitores (C) de tecnologia de montagem superficial (*surface-mount technology* – SMT) comercialmente disponíveis, em ambiente assistido por computador (*computer aided design* - CAD) para projetos de circuitos passivos planares de micro-ondas chamado Keysight (antigo Agilent) Advanced Design System - ADS 2015. O Filtro LC desejado apresenta uma frequência de passagem de 1,5 GHz, ondulação de 0,1 dB, limite de faixa de rejeição de 2,5 GHz e atenuação limite de 20 dB. O modelo de filtro escolhido foi o Elíptico em paralelo por utilizar poucos componentes (apenas 2 indutores e 3 capacitores) de valores nominais muito baixos, além da boa resposta obtida do circuito em relação ao filtro ideal. Efeitos de segunda ordem (*crosstalk*, capacitâncias, indutâncias e resistências parasitárias) são introduzidos durante a substituição dos componentes ideais por componentes comerciais reais, degradando a resposta e performance do filtro. Estes efeitos são ainda analisados e compensados de forma a garantir uma proximidade da performance do filtro real comparado ao filtro ideal.

Palavras-chave: Filtro Passa-Baixa. Filtro Elíptico. Filtro Chebyshev. SMT. ADS 2015.

STUDY AND DESIGN OF LC FILTER 1.5 GHz PASS LIMIT FLOW WITH SMD PASSIVE COMPONENTS OF MICROWAVES

ABSTRACT: The design and development of a low-pass filter (LPF) using inductors (L) and capacitors (C) of surface-mount technology (SMT) commercially available in computer aided design (CAD) for microwave planar passive circuitry called Keysight (former Agilent) Advanced Design System - ADS 2015. The desired LC filter has a 1.5 GHz cutoff frequency, 0.1 dB ripple, rejection stop band of 2.5 GHz and attenuation limit of 20 dB. The filter model

chosen was the Elliptic parallel because it used a few components (only 2 inductors and 3 capacitors) of very low nominal values, in addition to the good response obtained from the in relation to the ideal filter. Second order effects (crosstalk, parasitic capacitances, inductances and resistances) are introduced during replacement of the ideal components by actual commercial components, degrading the response and performance of the filter. These effects are also analyzed and compensated in order to guarantee a proximity of the performance of the actual filter compared to the ideal filter.

Keywords: Low Pass Filter. Elliptic Filter. Chebyshev Filter. SMT. ADS 2015.

INTRODUÇÃO

Vários arranjos de indutores e capacitores podem desempenhar função de FPB, entre eles o Butterworth, o Chebyshev e Elíptico [1]. Esses filtros diferem entre si em função da ondulação na banda de passagem, da atenuação na frequência de corte, resposta do filtro real em comparação ao ideal, etc.

O objetivo deste estudo é desenvolver um filtro passa-baixa (FPB) passivo, usando indutores e capacitores SMT comercialmente disponíveis e acessíveis na biblioteca do software ADS [2] e justificar a escolha entre os filtros tipo Chebyshev e Elíptico, ambos nas versões série ou paralelo e disponíveis no *design guide* do software ADS. As especificações de projeto do filtro são apresentadas na tabela 1.

TABELA 1 - ESPECIFICAÇÕES DE PROJETO DO FILTRO

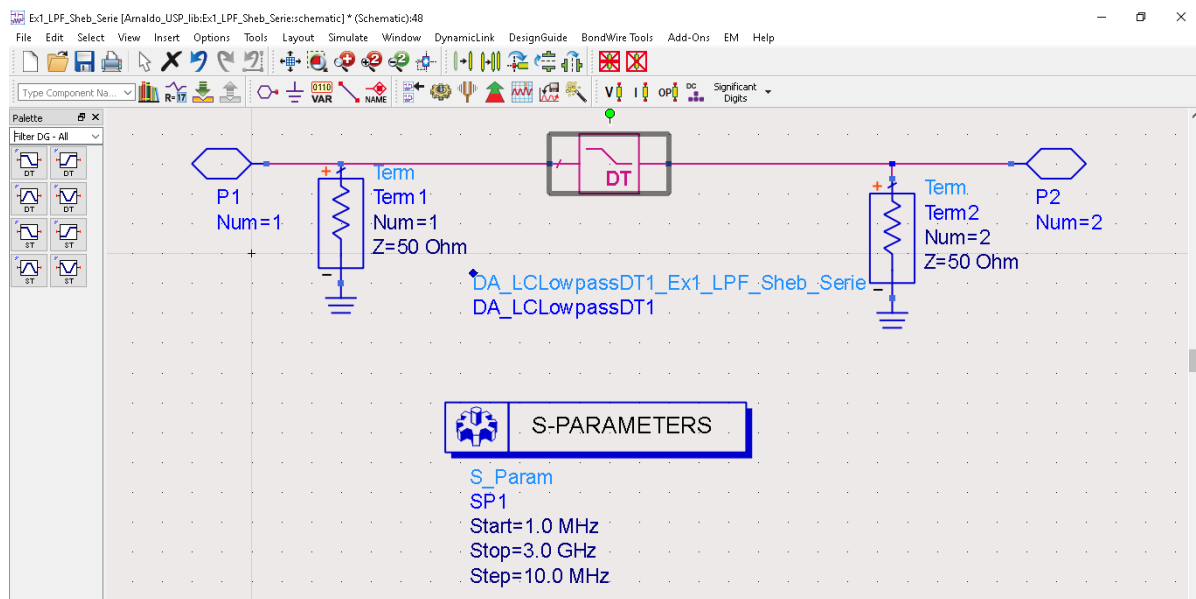
Parâmetros	Valores	Unidade
Frequência de Corte (F_p)	1,5	GHz
Atenuação na Frequência de Corte (A_p)	0,1	dB
Frequência de Rejeição (F_s)	2,5	GHz
Atenuação na Frequência de Rejeição (A_s)	20	dB

A seção II apresenta o processo de introdução dos parâmetros, desenvolvimento e simulações para os filtros sugeridos. A seção III apresenta os resultados obtidos, as razões para escolha do filtro final, bem como a topologia do filtro utilizando componentes reais. Os comentários finais e conclusões são apresentados na seção IV.

MATERIAIS & MÉTODOS

Será utilizado o *design guide* do ADS para a proposta dos filtros Chebyshev e Elípticos ideais e, após análise comparativa, será selecionado a versão final do filtro ideal e sobre esse, serão realizadas simulações considerando-se componentes comerciais de modo a obter um filtro real com performance o mais próximo do filtro idealizado. No ambiente de projeto esquemático do ADS, seleciona-se a palheta *Filter DG-All*, adicionando o ícone de FPB (*Low-Pass Lumped Element*) e ajustando-se o ambiente para simulação e obtenção dos parâmetros S, conforme indicado na figura 1. As portas 1 e 2 e as cargas de terminação de 50 Ω de impedância são também introduzidas e conectadas.

Figura 1 - Janela de Projeto Esquemático do ADS 2015, com palheta Filter DG-All e esquema de simulação dos parâmetros S para os diferentes tipos e arranjos de filtros



Pode-se acessar o *design guide* do ADS para auxiliar no desenvolvimento do filtro, selecionando-se a opção Filtro na aba *DesignGuide*, em seguida “*Filter Control Window...*” e “*Ok*”, conforme a figura 2.

Na nova janela de “*Filter DesignGuide*”, na aba “*Filter Assistant*”, pode-se ajustar as especificações e o modelo do filtro desejado, para simulação, conforme a figura 3 a seguir.

Após ajustar os parâmetros e selecionar o modelo de filtro, no caso primeiro o Chebyshev série e depois o paralelo, na aba “*Simulation Assistant*” pode-se especificar os

limites da simulação, conforme figura 4, e em seguida clicar em “*Simulate*” para se obter o circuito com valores ideais e o relatório da simulação.

Figura 2 - Janela de Projeto Esquemático do ADS 2015, com seleção da opção “Filter” na aba “Designguide” e a opção “Filter Control Window...” na janela aberta

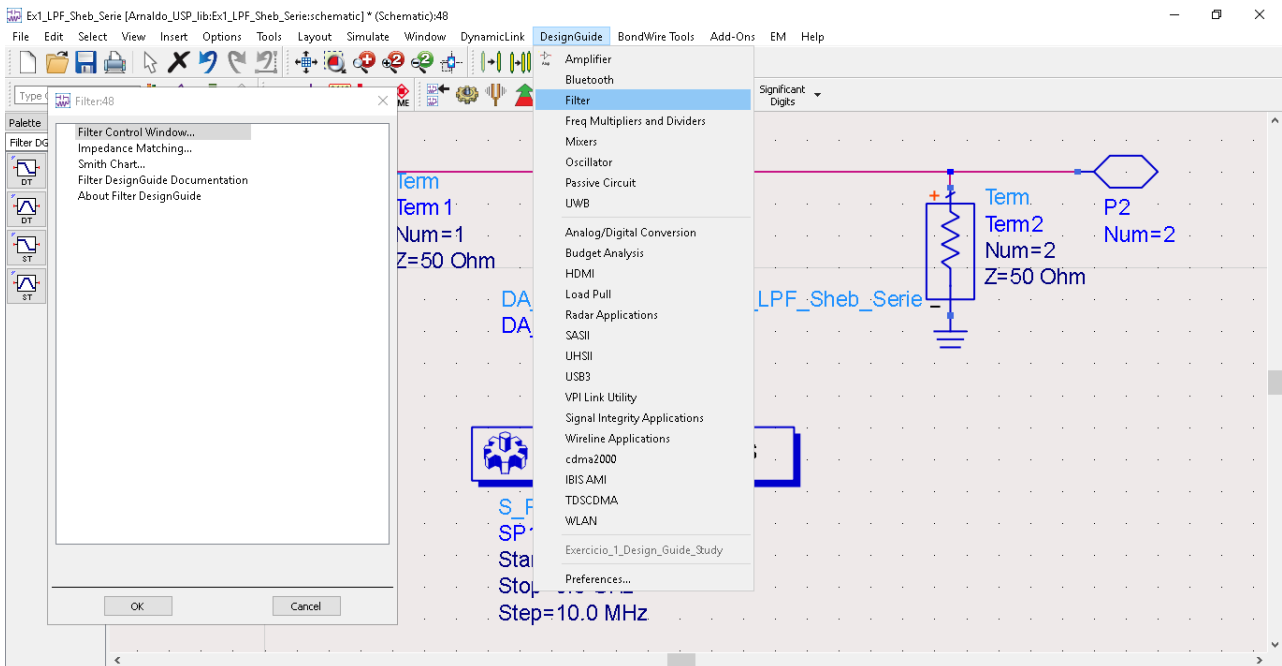


Figura 3 - Janela de “Filter DesignGuide”, com aba “Filter Assistant” selecionada

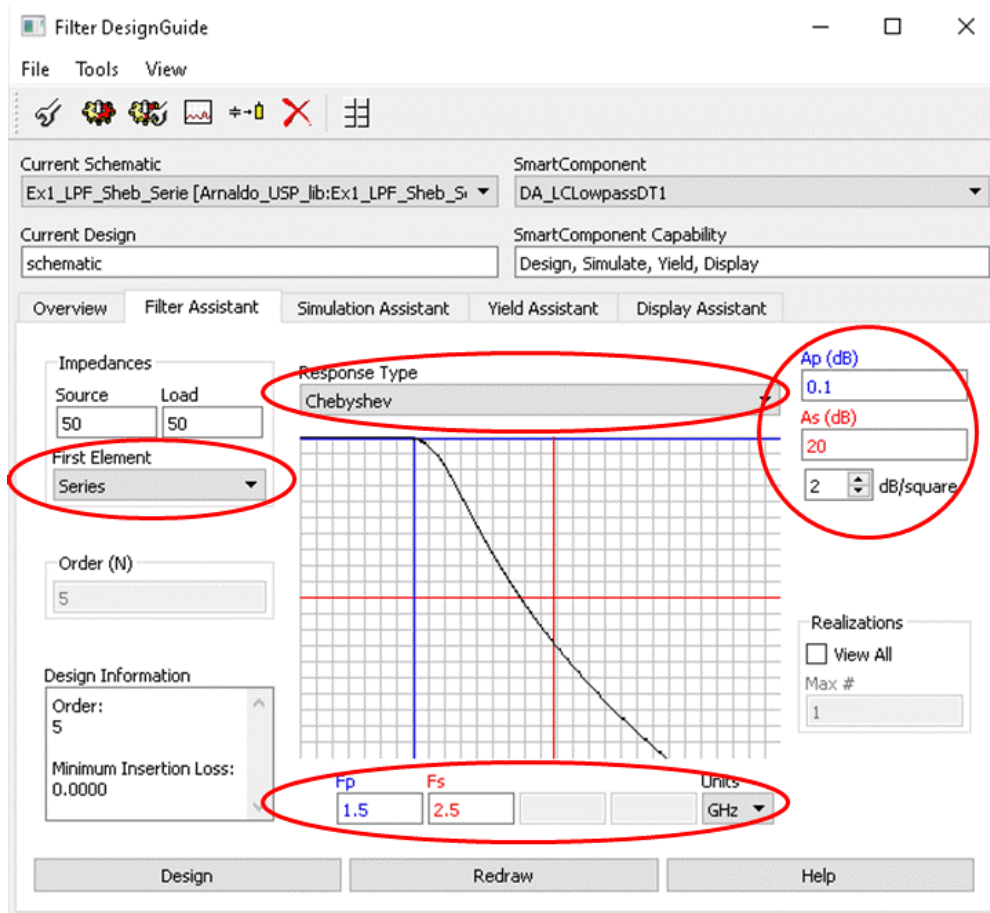
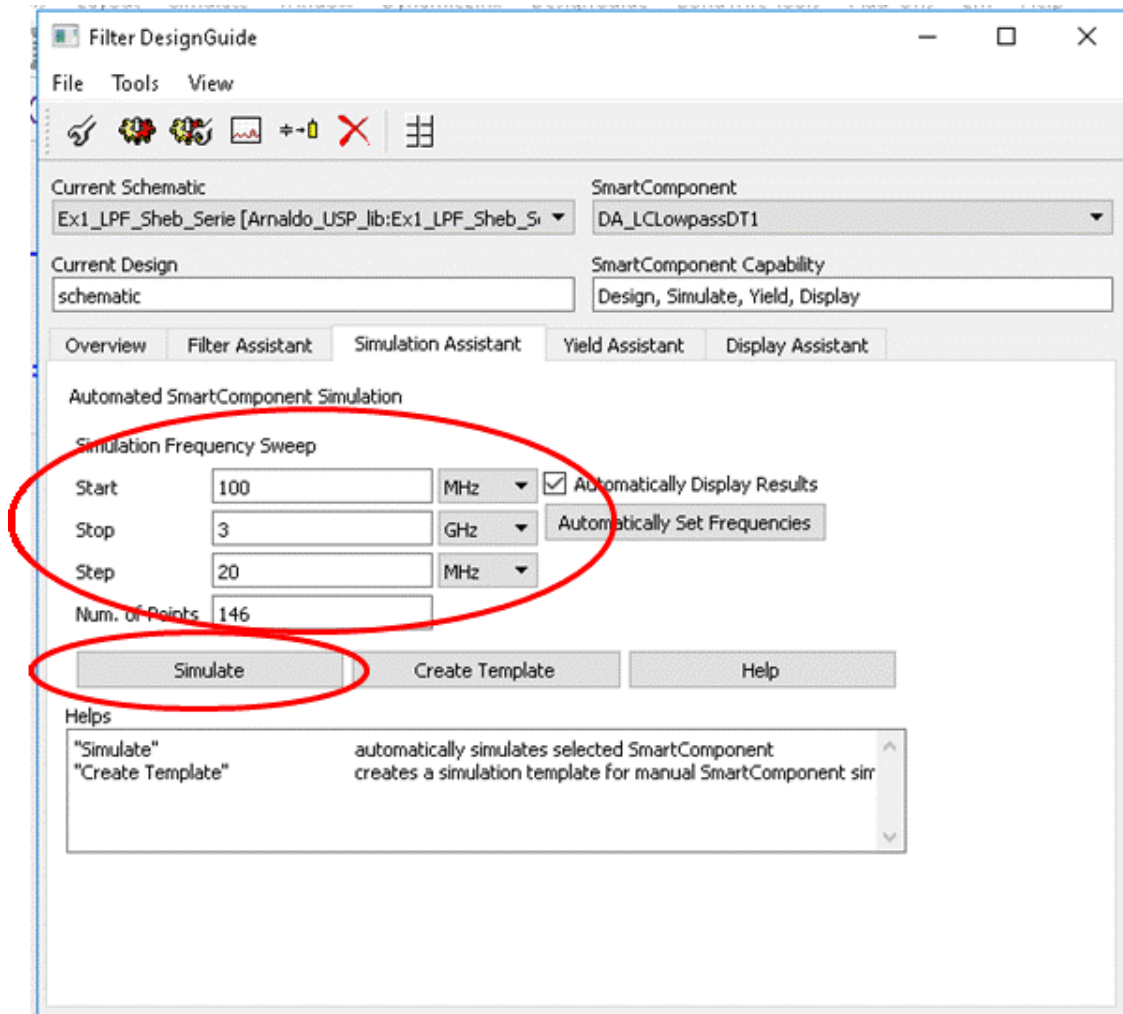
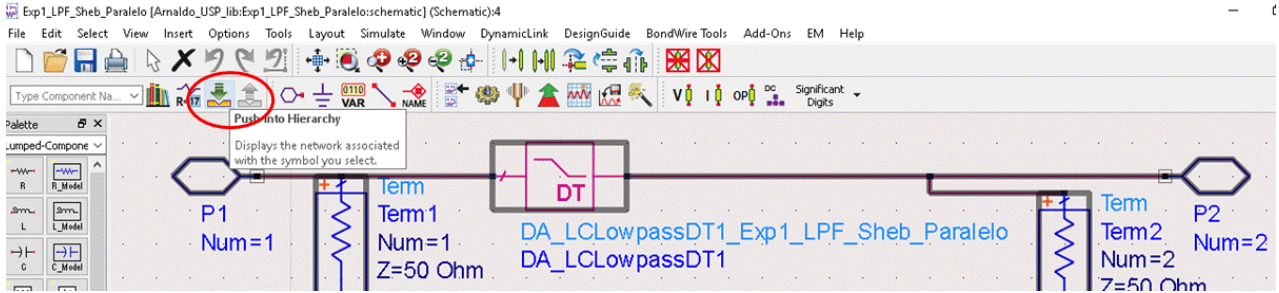


Figura 4 - Janela de “Filter DesignGuide”, com aba “Simulation Assistant” selecionada



Após a simulação, pode-se observar a topologia e valores ideais dos componentes do filtro descendo uma camada na hierarquia, selecionando-se o botão “*Push Into Hierarchy*”, conforme a figura 5.

Figura 5 - Avançando na hierarquia do Design Assistant para obter o circuito com componentes calculados

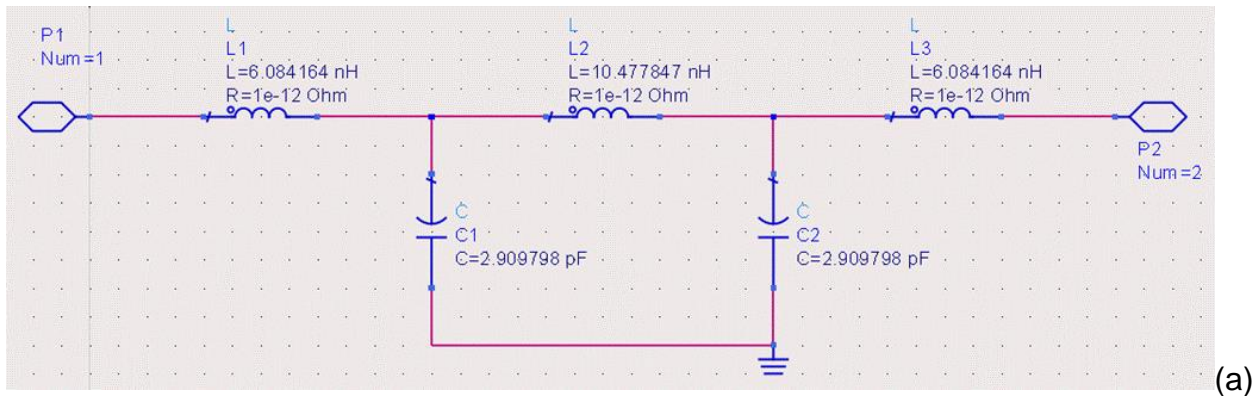


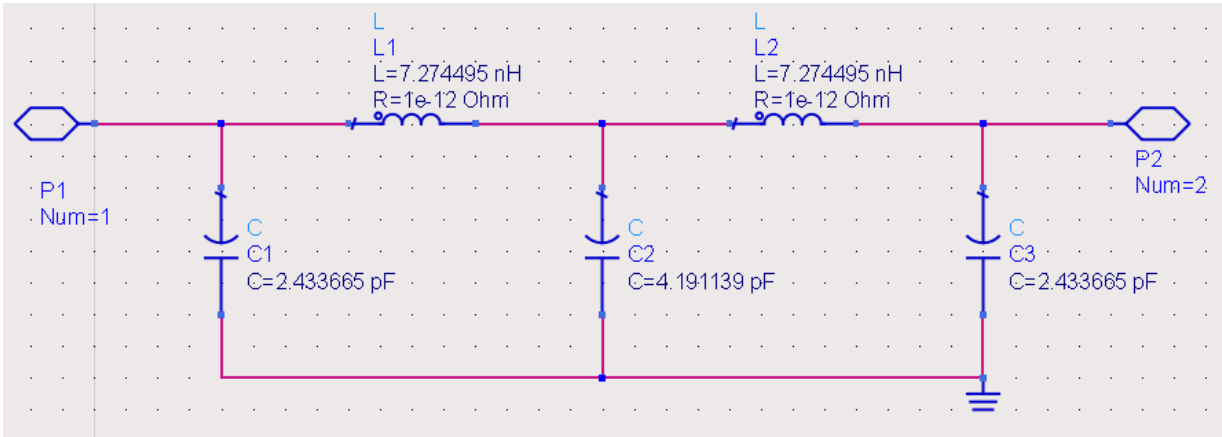
Estudo do Filtro Chebyshev

Os modelos de filtros Chebyshev série e paralelo ideais obtidos através do *Design Assistant* do ADS são apresentados na figura 6 a seguir. Ambos os filtros são de 5º ordem.

Pode-se observar uma simetria entre a entrada e saída dos filtros, tanto o Chebyshev série quanto o paralelo. Já a figura 7 apresenta os resultados da simulação do filtro, que são os mesmos para o filtro série e paralelo. Nota-se que com os valores ideais, o filtro atinge -25 dB na frequência de 2,5 GHz, apresentando uma curva mais acentuada do que a especificada.

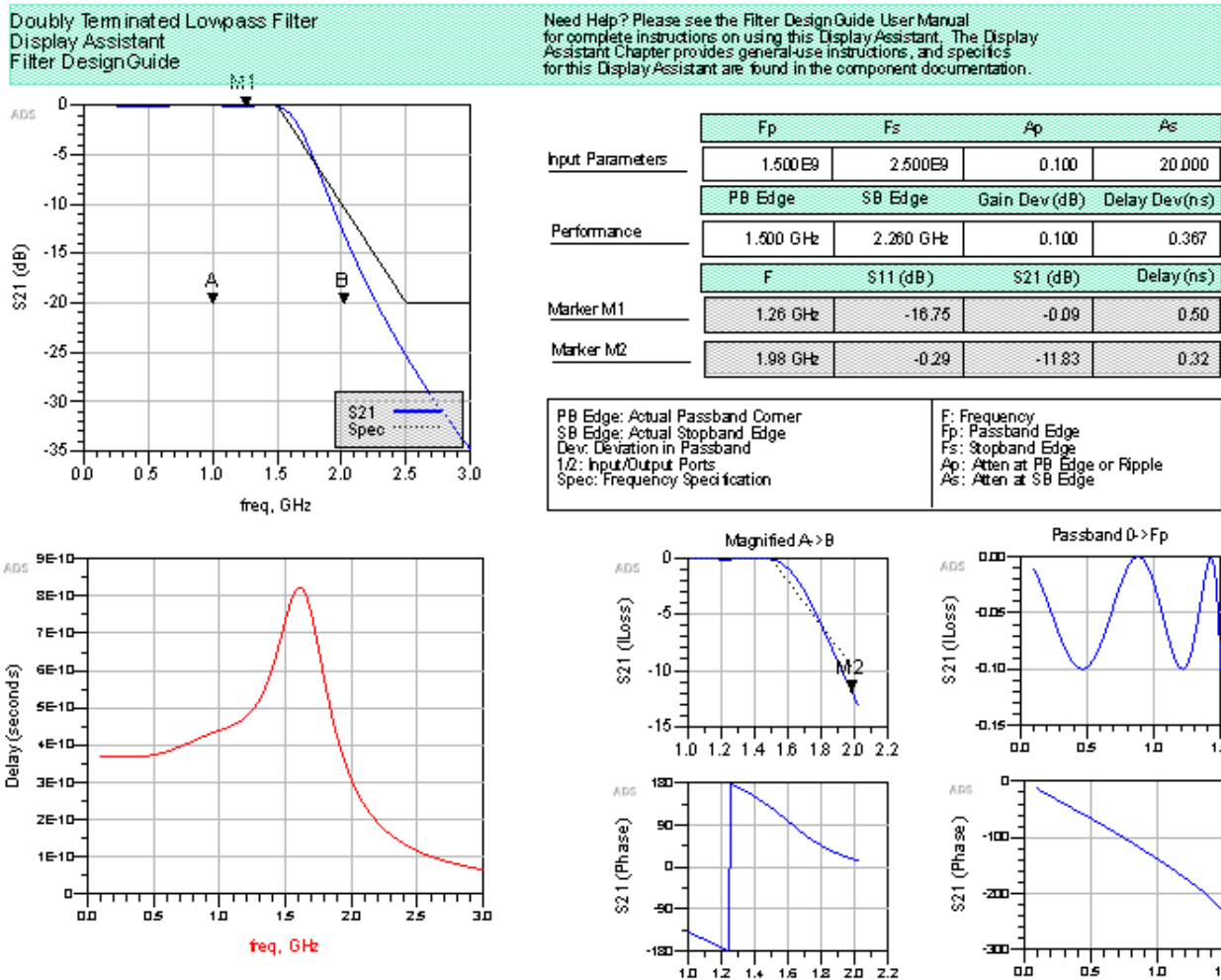
Figura 6 - FPB Chebyshev ideal Série (a) e Paralelo (b)





(b)

Figura 7 - Relatório da simulação do FPB Chebyshev Série e Paralelo. No canto superior esquerdo o parâmetro S21 e na tabela do canto superior direito, os detalhes quantitativos de parâmetros performance e marcadores na forma de tabela



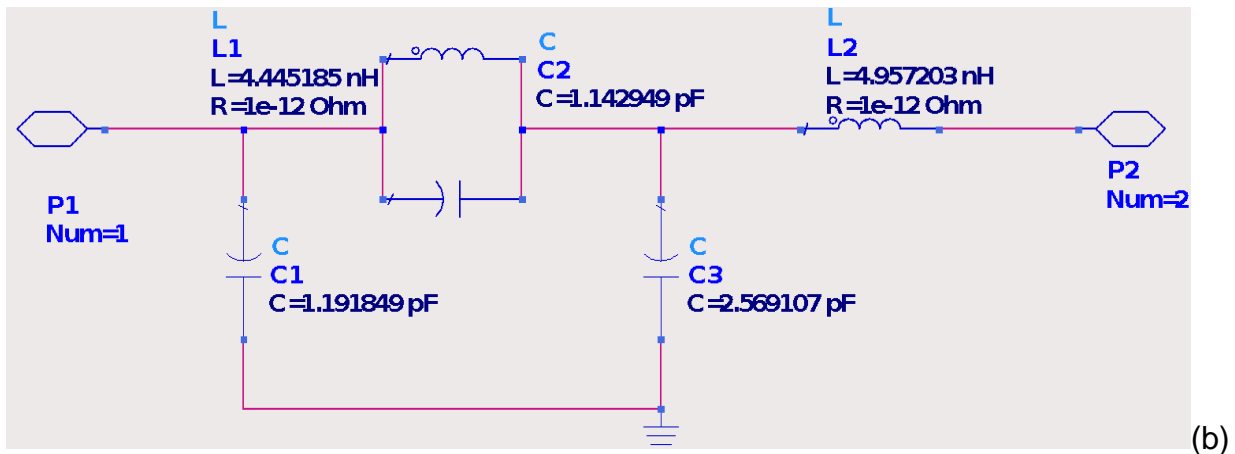
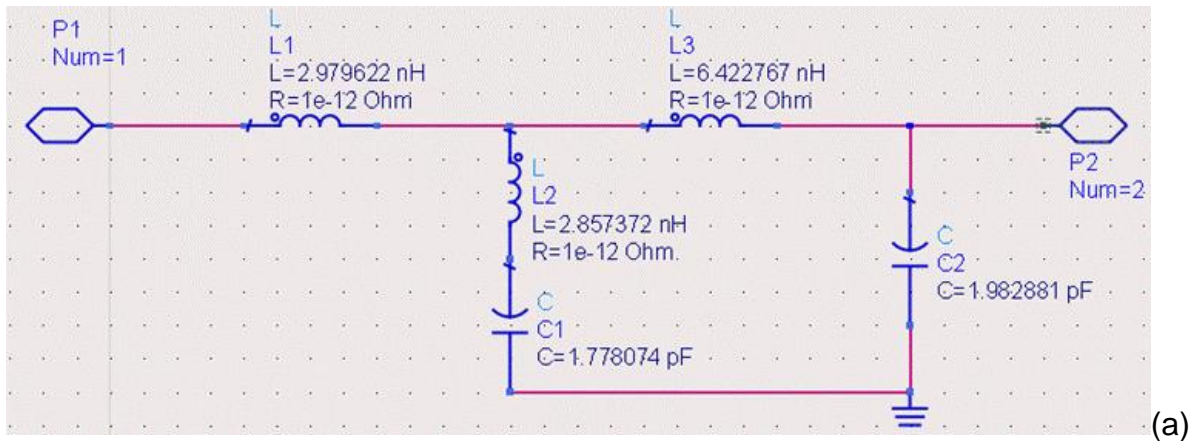
Estudo do Filtro Elíptico

Seguindo o mesmo procedimento do Filtro Chebyshev, porém selecionando-se o Filtro Elíptico obtém-se os modelos de filtros série e paralelo ideais através do *Design Assistant* do ADS, conforme apresentados na figura 8. Ambos os filtros são de 4º ordem.

Quanto maior a ordem do filtro, maior a complexidade e número de componentes, o que pode implicar em maiores desafios com o aparecimento de efeitos resistivos, indutivos e capacitivos parasitas introduzidos com componentes comerciais reais, além de outros desafios de *layout* e construção do filtro. Quanto menor o valor do indutor, menor os efeitos de resistência e capacitância parasitas introduzidos.

Comparando-se os resultados das simulações do *Design Assistant* do ADS, percebe-se que os filtros Elípticos resultantes são de 4º ordem enquanto que os Chebyshev são de 5º ordem, para as mesmas especificações.

Figura 8 - FPB Elíptico ideal Série (a) e Paralelo (b)

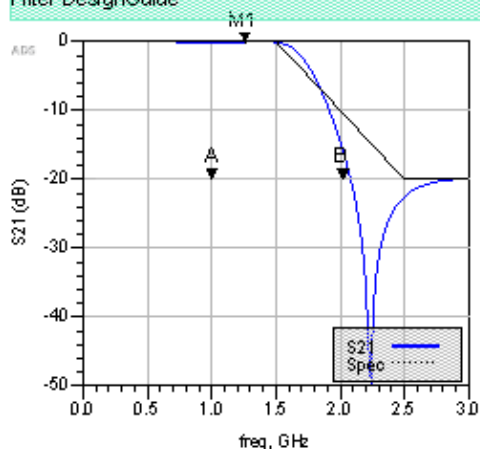


Pode-se observar que ao contrário do filtro Chebyshev, não há simetria dos componentes da entrada e saída nos filtros Elípticos. Já a Figura 9 apresenta os resultados da simulação desses filtros.

Figura 9 - Relatório da simulação do FPB Elíptico ideais Série e Paralelo. No canto superior esquerdo o parâmetro S21 e na tabela do canto superior direito, os detalhes quantitativos de parâmetros, performance e marcadores na forma de tabela

Doubly Terminated Lowpass Filter
 Display Assistant
 Filter DesignGuide

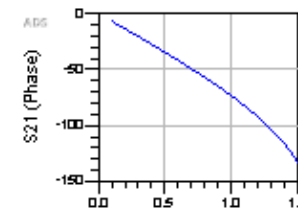
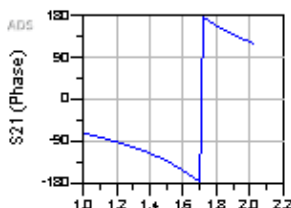
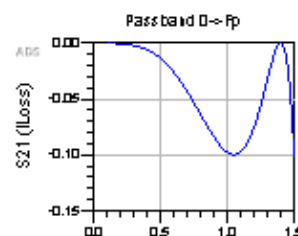
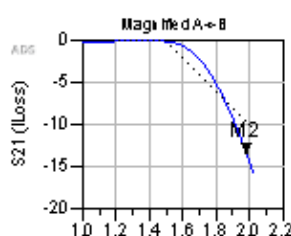
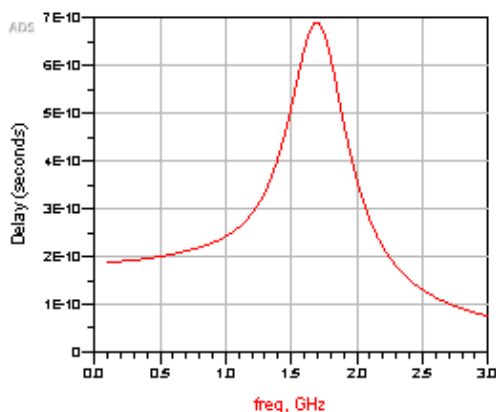
Need Help? Please see the Filter DesignGuide User Manual for complete instructions on using the Display Assistant. The Display Assistant Chapter provides general instructions, and specifics for the Display Assistant are found in the component documentation.



Input Parameters	Fp	Fs	Ap	As
	1.500E9	2.500E9	0.100	20.000
Performance	PB Edge	SB Edge	Gain Dev (dB)	Delay Dev (ns)
	1.500 GHz	2.000 GHz	0.100	0.325
Marker M1	F	S11 (dB)	S21 (dB)	Delay (ns)
	1.26 GHz	-19.36	-0.05	0.31
Marker M2	F	S11 (dB)	S21 (dB)	Delay (ns)
	1.98 GHz	-0.20	-13.36	0.38

PB Edge: Actual Passband Corner
 SB Edge: Actual Stopband Edge
 Dev: Deviation in Passband
 I/O: Input/Output Ports
 Spec: Frequency Specification

F: Frequency
 Fp: Passband Edge
 Fs: Stopband Edge
 Ap: Att at PB Edge or Ripple
 As: Att at SB Edge



Escolha do Filtro Correto

Assim sendo, foi selecionado o FPB Elíptico Paralelo por ser de uma ordem menor e utilizar valores de indutores menores do que os dos filtros Chebyshev, além de fazer uso de um indutor a menos que o Elíptico Série.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Escolhido o desenho e valores ideais do filtro, o próximo passo é a substituição gradual dos componentes ideais por componentes comerciais de modo a obter a versão final

do filtro, tomando-se o cuidado de manter as características o mais próximo possível das especificações desejadas.

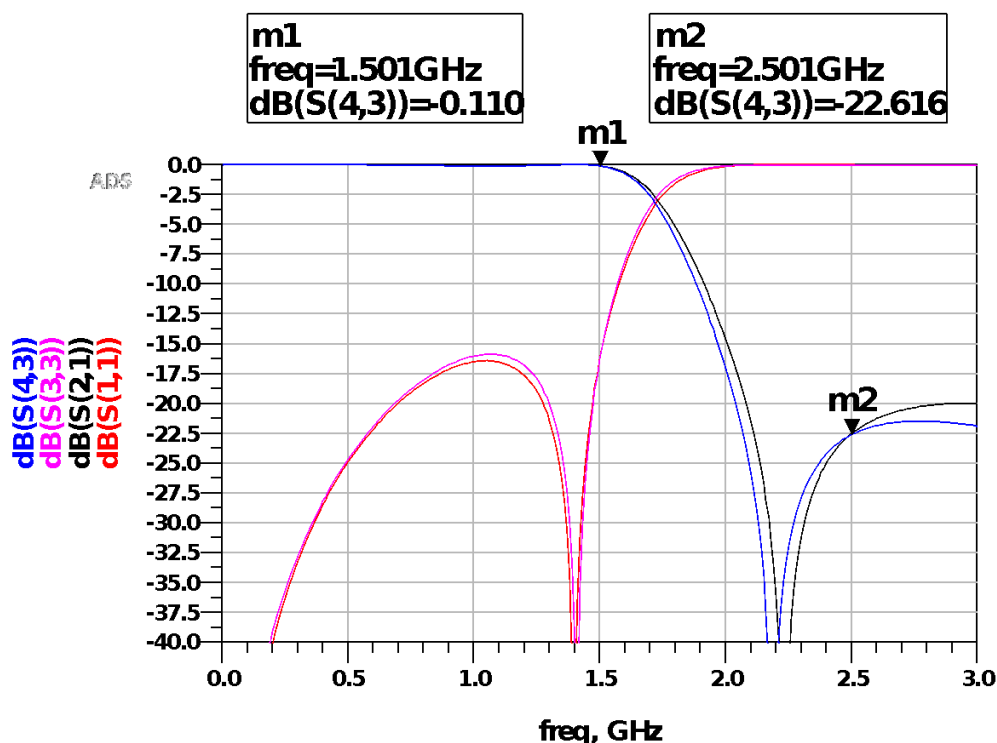
É recomendável a escolha de componentes cujas características parasitas indesejáveis sejam as menores possíveis. Além disso, as especificações dos componentes apresentam códigos de letras de tolerância. Quanto maior a letra, maior a variação da tolerância em relação ao valor nominal do componente.

Para este filtro, os componentes capacitivos são de baixo valor e relativa facilidade de obter valores comerciais próximos dos ideais, de modo que pôde-se obter componentes com tolerância A e B que apresentaram pouca variação em relação ao desenho do filtro Elíptico ideal, conforme indicado na tabela 2 e gráfico comparativo de parâmetro S_{21} , na figura 10. Nota-se que, de acordo com as marcas, o filtro com capacitores ideais continua atendendo as especificações do projeto.

TABELA 2 - CAPACITORES IDEAIS E COMERCIAIS DO FILTRO

Componente	Valor Ideal	Valor Comercial
C1	1.191849 pF	AVX ACCU-F 04031K1R2AAW 1.2 pF
C2	1.142949 pF	ATC180R1R1BP500 1.1 pF
C3	2.569107 pF	ATC180R2R4BP500 2.4 pF

Figura 10 - Parâmetros S_{11} e S_{21} para o Filtro Elíptico Ideal e com capacitores comerciais (S_{33} e S_{43})



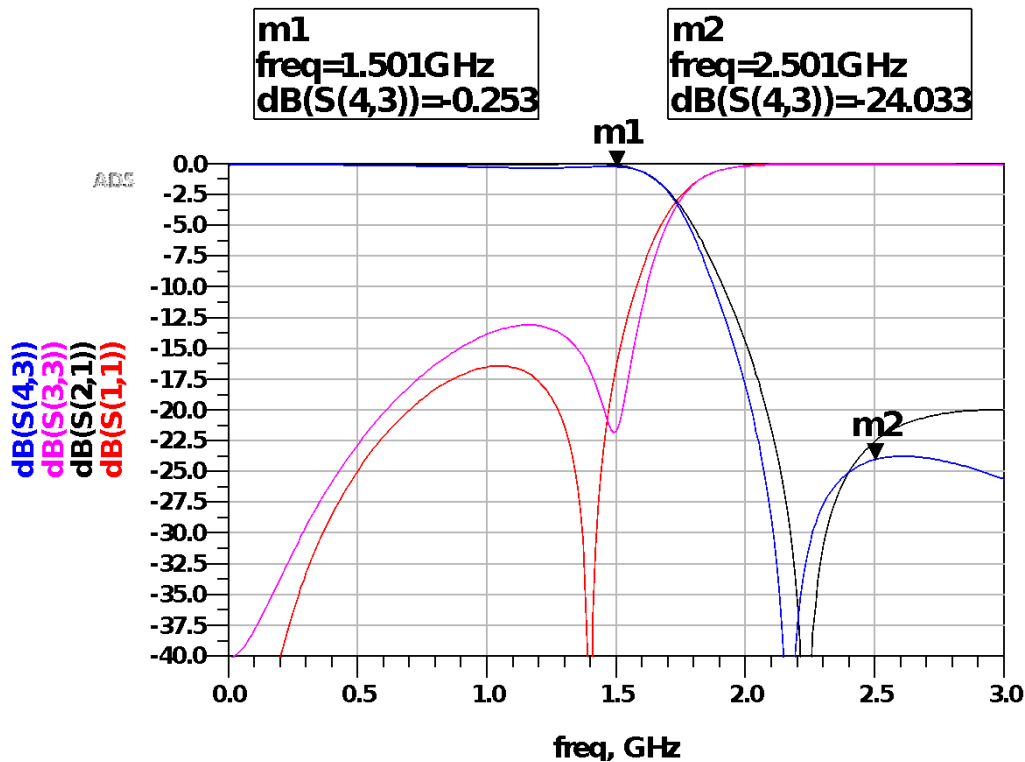
É importante ainda escolher componentes com pequenos passos de valores comerciais incrementais, principalmente no caso dos capacitores, de modo a permitir uma sintonia dos valores comerciais ótimos para performance próxima do ideal.

A seguir são introduzidos os indutores comerciais no circuito, conforme a tabela 3. A figura 11 apresenta o novo gráfico de parâmetro S. Comparando-se com a figura 10 percebe-se uma degradação da performance do filtro. Optou-se por arredondar para menos o indutor sempre que possível para diminuir os efeitos parasitas indesejados.

TABELA 3 - INDUTORES IDEAIS E COMERCIAIS DO FILTRO

Componente	Valor Ideal	Valor Comercial
L1	4.45185 nH	AVX ACCU-L 08053R9DEW 3.9 nH
L2	4.95720 nH	TDK NLS201208T-5N0D 5 nH

Figura 11 - Parâmetros S_{11} e S_{21} para o Filtro Elíptico Ideal e com capacitores e indutores comerciais (S_{33} e S_{43})

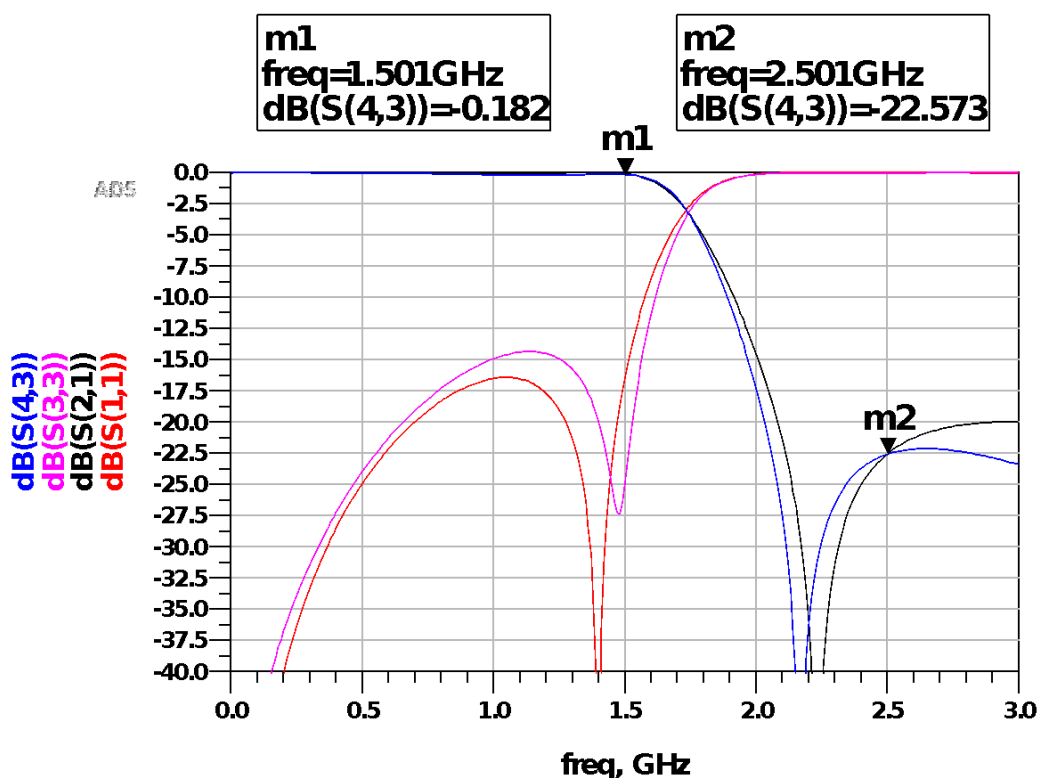


Optando-se por utilizar componentes da mesma família o máximo possível, foi adotado L2 do mesmo modelo de L1, com indutância menor que a ideal, ainda que com maior diferença que a anterior, conforme a tabela IV. O resultado comparativo é apresentado na figura 12. Observa-se que ela apresenta uma pequena melhora na marca m_1 (menor atenuação) e também na perda de retorno em comparação à figura 11.

TABELA 4 - INDUTORES IDEAIS E COMERCIAIS ATUALIZADO DO FILTRO

Componente	Valor Ideal	Valor Comercial
L1	4.45185 nH	AVX ACCU-L 08053R9DEW 3.9 nH
L2	4.95720 nH	AVX ACCU-L 08053R9DEW 4.7 nH

Figura 11 Parâmetros S_{11} e S_{21} para o Filtro Elíptico Ideal e com L e C comerciais (S_{33} e S_{43}) atualizado



O próximo passo é alterar (ajuste fino) os valores dos capacitores de modo a aproximar a curva do circuito real ao ideal. Nota-se que o capacitor C2 está em paralelo com o Indutor L1 cujo componente real introduz capacitâncias parasitas em paralelo. Assim sendo, pode-se começar a variar os valores deste capacitor em primeiro lugar e depois dos demais capacitores do circuito, uma a uma e analisar o efeito na performance do circuito.

Dadas as capacitâncias parasitas introduzidas pelos indutores, em especial L1, associada às capacitâncias previstas no circuito, estas fazem com que os valores dos capacitores sejam alterados significativamente após a sintonia, em relação aos valores ideais. Se o próximo valor do capacitor para a sintonia não está disponível no código de componentes escolhido, eventualmente deve-se substituir por outro com maior gama de valores.

Após um exercício de várias rodadas de simulações, obteve-se o circuito comercial real com os componentes definitivos na tabela 5.

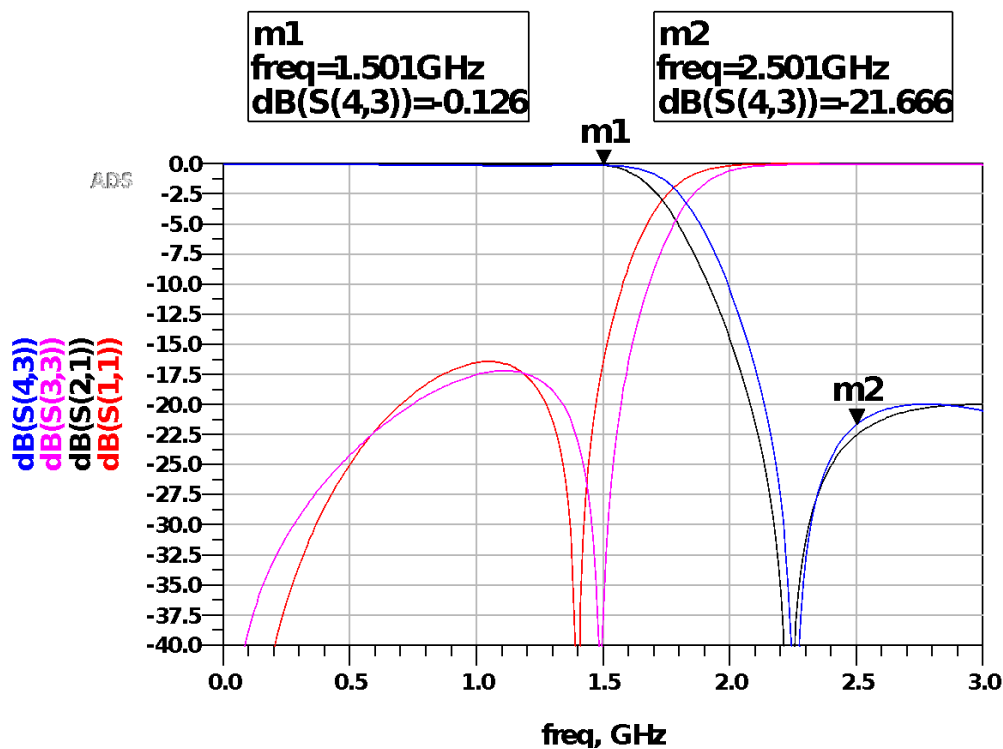
TABELA 5 - INDUTORES E CAPACITORES COMERCIAIS DEFINITIVOS

Componente	Valor Ideal	Valor Comercial
L1	4.45185 nH	AVX ACCU-L 08053R9DEW 3.9 nH

L2	4.95720 nH	AVX ACCU-L 08053R9DEW 4.7 nH
C1	1.191849 pF	ATC180R-R5BP500 0.7 pF
C2	1.142949 pF	ATC180R0R5BP500 1.0 pF
C3	2.569107 pF	ATC180R2R0BP500 2.1 pF

Os dois indutores possuem tolerância D ($\pm 0,5$ nH). Os três capacitores também são da mesma família e de tolerância B ($\pm 0,1$ pF). A figura 13 apresenta a comparação entre o circuito real final e o ideal.

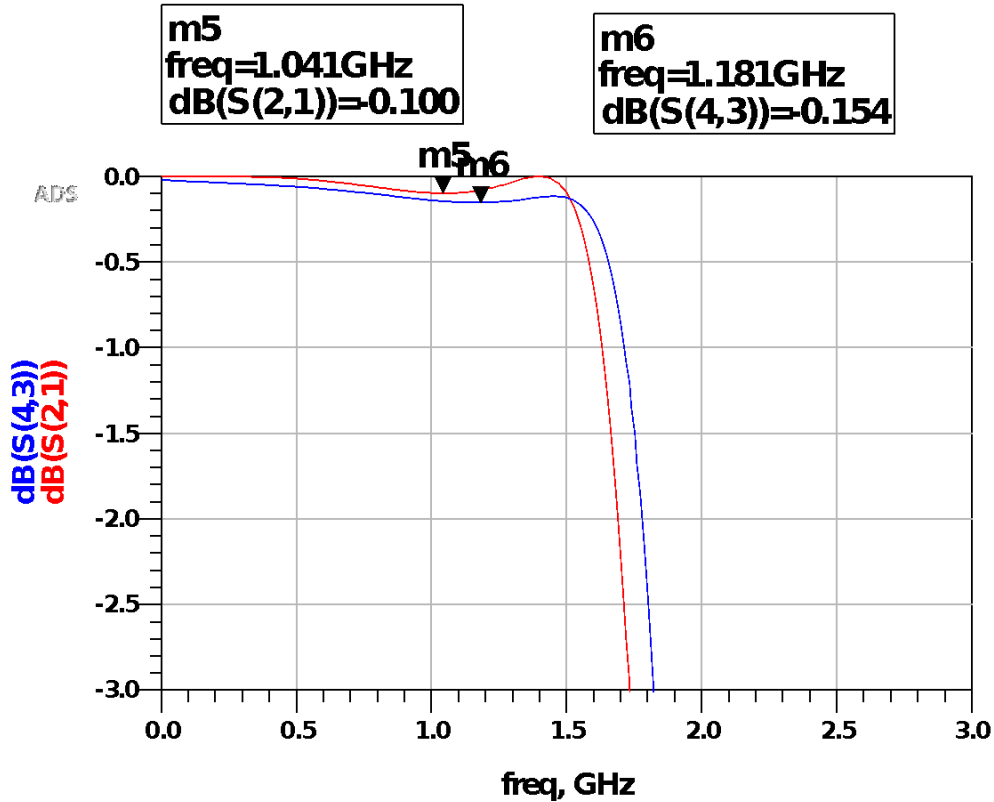
Figura 13 - Parâmetros S_{11} e S_{21} para o Filtro Elíptico Ideal e com capacitores e indutores comerciais após sintonia (S_{33} e S_{43})



Nota-se pela figura 13 que a atenuação na frequência de corte ficou em 0,126 dB, o que é muito próximo do valor desejado de 0,1 dB (diferença de apenas 0,026 dB).

Eventualmente pode-se ainda experimentar outras opções de sintonia, como substituir um indutor de maior valor por 2 de menor valor em série. Para este exercício em particular esta opção não se mostrou efetiva nas diversas simulações realizadas. A figura 14 apresenta de forma mais ampliada as marcas do filtro ideal e real no ponto de menor atenuação dentro da Banda de Passagem do filtro.

Figura 14 - Parâmetro S_{21} para o Filtro Elíptico Ideal e Real (S_{43}), ampliado na banda de passagem



Ao se procurar melhorar a performance do filtro com componentes reais o mais próximo do ideal, verificou-se que o capacitor C1 foi o que apresentou maior desvio de valor em relação ao ideal, para compensar os efeitos parasitas. Os desvios são apresentados na tabela VI a seguir.

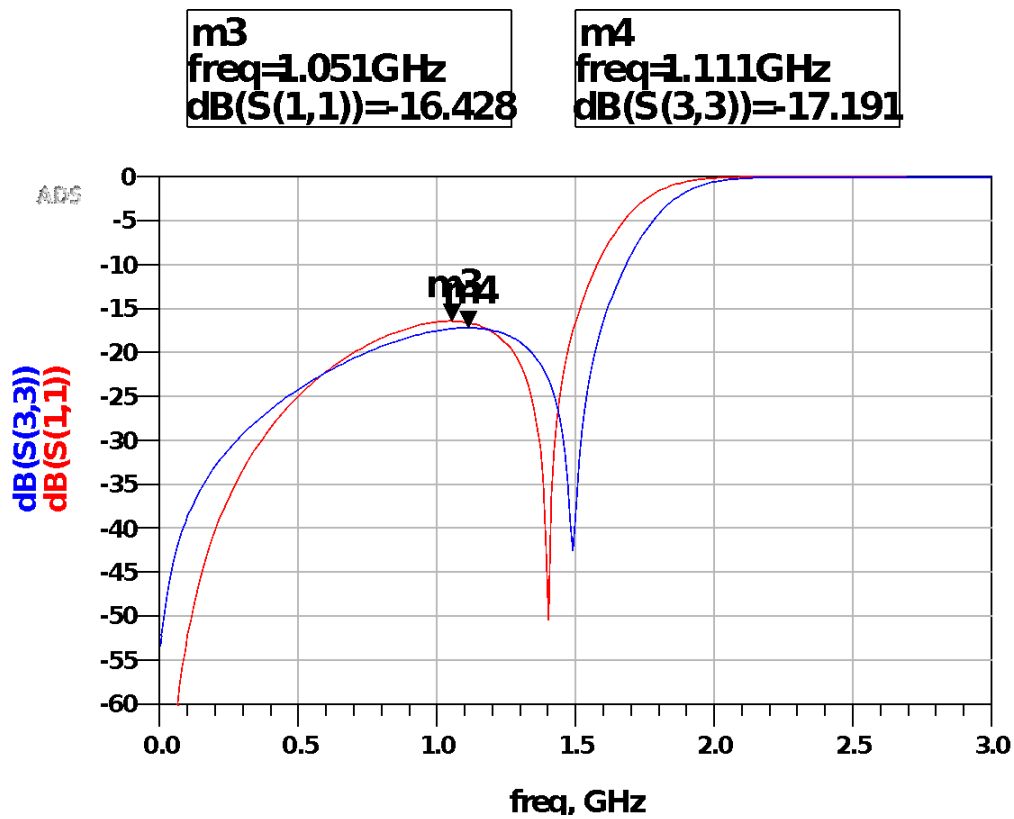
O filtro ideal apresentou uma perda de retorno na pior frequência dentro da banda de passagem de -16,43 dB em 1,051 GHz, ao passo que o filtro ajustado apresentou -17,191 dB em 1,111 GHz, como indicado no detalhe da figura 15. Diagrama semelhante ocorre para o Parâmetro S_{22} (e S_{44} para o filtro real).

TABELA 6 - Variação de L e C comerciais adotados em relação ao ideal

Componente	Valor Ideal	Valor Comercial	Desvio
L1	4.45185 nH	3.9 nH ± 0.5 nH	-12,4%
L2	4.95720 nH	4.7 nH ± 0.5 nH	-5,17%

C1	1.191849 pF	0.7 pF ± 0.1 pF	-41,27%
C2	1.142949 pF	1.0 pF ± 0.1 pF	-12,51%
C3	2.569107 pF	2.1 pF ± 0.1 pF	-18,26%

Figura 15 - Parâmetro S_{11} para o Filtro Elíptico ideal e real com componentes comerciais após sintonia (S_{33}) e marca da perda de retorno no pior ponto dentro da banda de passagem do filtro



A figura 16 apresenta o Parâmetro S_{12} para o Filtro Elíptico ideal e comercial (S_{34}) após sintonia. A figura 17 apresenta a carta de Smith para o Parâmetro S_{11} para o Filtro Elíptico ideal e comercial (S_{33}) após sintonia.

Figura 16 - Parâmetro S_{12} para o Filtro Elíptico Ideal e comercial após sintonia (S_{34})

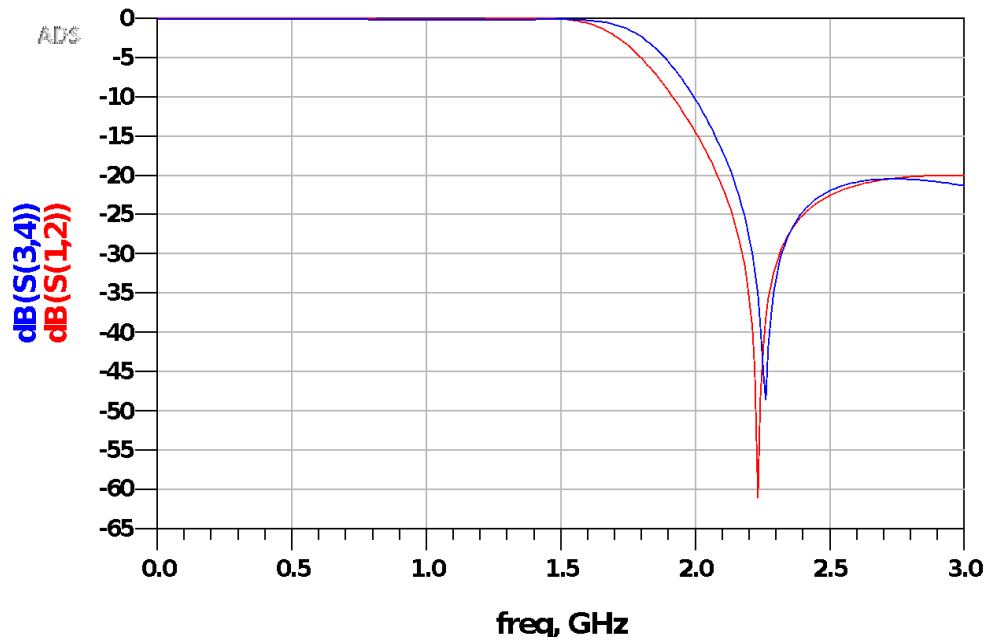
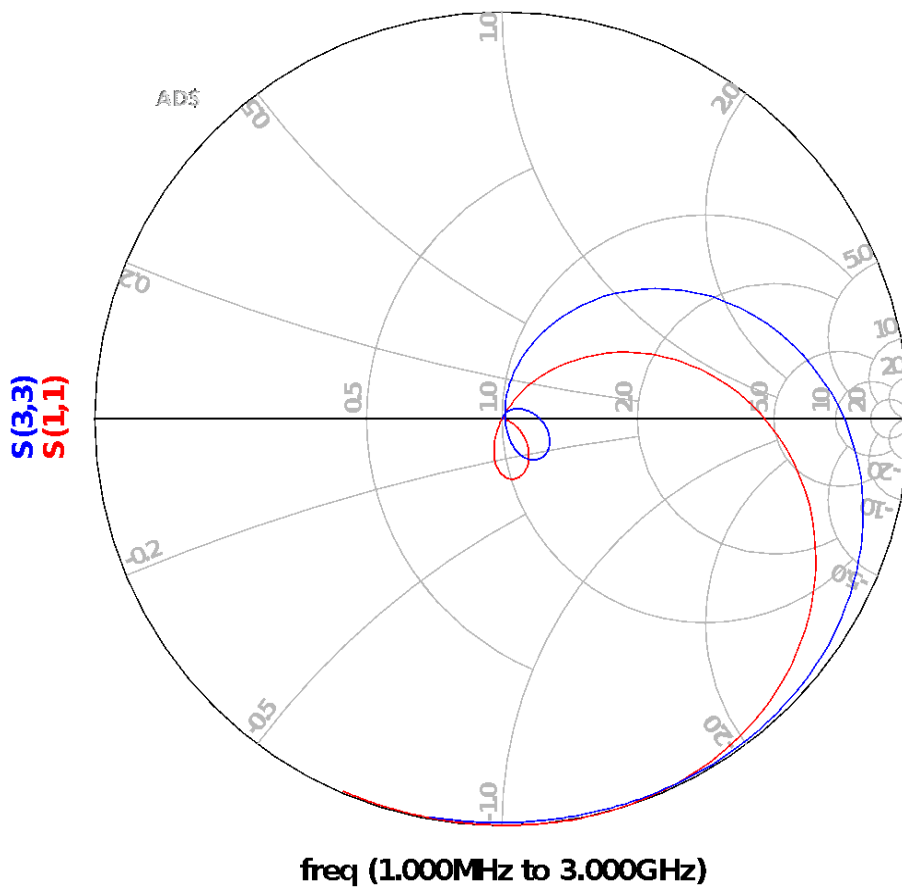


Figura 17 - Carta de Smith do Parâmetro S_{11} para o Filtro Elíptico Ideal comercial após sintonia (S_{33})



COMENTÁRIOS FINAIS

Neste trabalho foi apresentado um procedimento de projeto e desenvolvimento de um Filtro LC passa-baixa frequência, com frequência de corte de 1,5 GHz, desenvolvido no ambiente de projeto Keysight ADS 2015, utilizando componentes SMT comerciais. A topologia escolhida foi a de FPB Elíptico de 4^o ordem em paralelo, devido a simplicidade da arquitetura do circuito (apenas 3 capacitores e 2 indutores), de baixo valor, e a excelente resposta obtida com esta arquitetura de circuito após a sintonia dos componentes comerciais. O filtro ainda apresenta excelente eficiência em relação ao filtro ideal, ou seja, -17,19 dB em contraste aos -16,43 dB de nível de perda por retorno na pior condição (1,11 GHz e 1,05 GHz).

A continuação do projeto se dá pelo desenvolvimento do layout e avaliação da melhor disposição dos componentes na placa de circuito impresso, o que ocasionará em novos efeitos parasitas indesejáveis. O desafio será o compromisso entre as especificações desejadas, o impacto na performance no circuito montado e o custo envolvido.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem Escola Politécnica da Universidade de São Paulo pelo uso de recursos e suporte técnicos oferecidos para esta pesquisa.

REFERÊNCIAS

MATZNER, S. H.; LEVY, H. Moalem and D. Ackerman. **RF Laboratory Manual - Passive Filter Design**. 2008. Conteúdo online. Disponível em: http://www.hit.ac.il/.upload/engineering/experiment_5_-_filter_design109.pdf. Acesso em: dez. 2018.

KEYSIGHT TECHNOLOGIES. **Filter Design Guide**. Agilent Technologies – Advanced Design System. 2011. Disponível em: <http://edadownload.software.keysight.com/eedl/ads/2011/pdf/dgfilter.pdf> . Acesso em: dez. 2018.