

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA - UFSC
CENTRO TECNOLÓGICO - CTC
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA E ELETRÔNICA - DEEL
EEL7319 - CIRCUITOS RF

LAB 2
COMPONENTES PASSIVOS EM RF

GUSTAVO SIMAS DA SILVA

FLORIANÓPOLIS
SETEMBRO, 2020

Sumário

Atividades de Laboratório	3
Atividade 1	3
Atividade 2	4
Atividade 3	7
Atividade 4	11
Questões	14
Questão 1	14
Questão 2	15
Questão 3	16
Questão 4	17
Questão 5	18
Questão 6	19
Referências	21

Atividades de Laboratório

Atividade 1

Implemente no QucsStudio o modelo referido no item 3 do PRELAB

O circuito passa-baixas desenvolvido no software de simulação especializado Qucs Studio é apresentado na Figura 1.

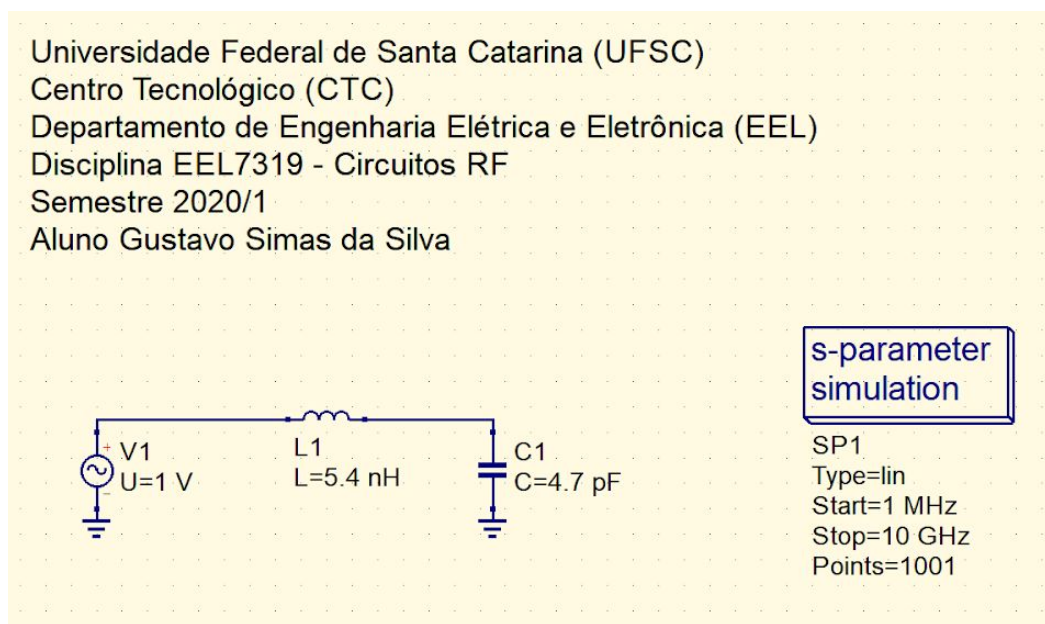


Figura 1 - Circuito passa-baixas desenvolvido no software Qucs Studio

Os valores de indutância e capacitância foram obtidos em análise pré-laboratorial, seguindo o modelo de capacitor C.0402.C0G.1C.4R7.C.020.A.B do catálogo TDK [1].

Atividade 2

Faça uma simulação (escolha aquela que achar conveniente) para extrair os seguintes parâmetros:

- Frequência de auto-ressonância
- Fator de Qualidade
- Tangente de perdas

A frequência de ressonância do circuito pode ser calculada seguindo a seguinte equação

$$f_r = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} = \frac{1}{2\pi\sqrt{0,2n*4,7p}} = 4,38GHz$$

Na simulação foi realizada a análise de parâmetros S, mais em específico verificando-se parâmetro S12 (ou S21), no ponto em que cruza o eixo-x (reatância nula). Assim, como se vê na Figura 2, obteve-se também 4,38GHz conforme esperado.

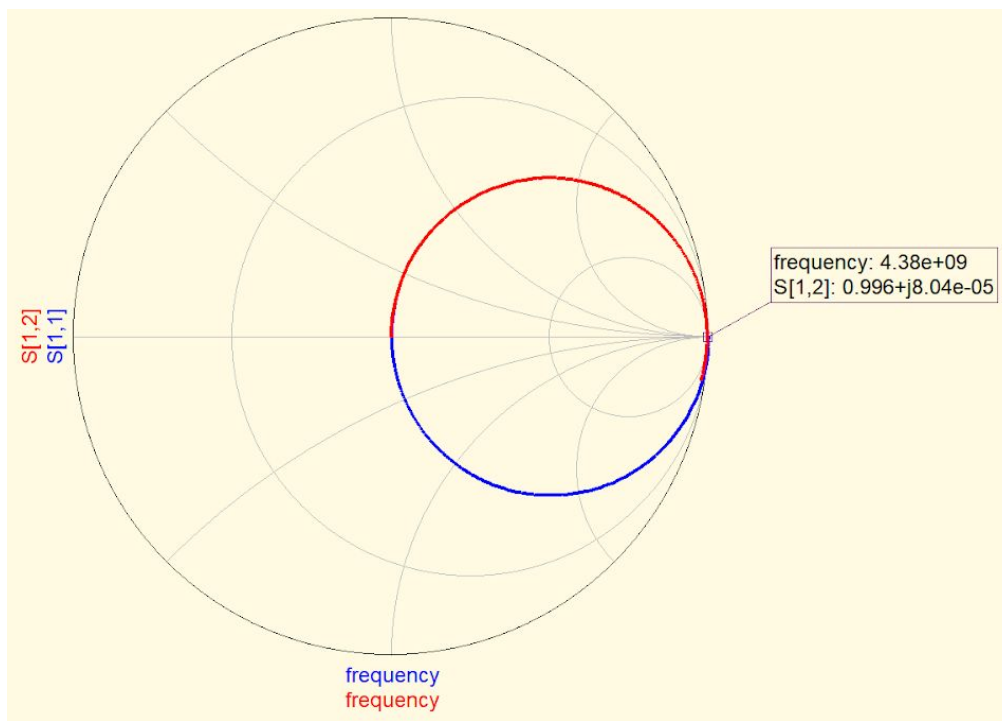


Figura 2 - Ábaco de Smith para parâmetros S do circuito simulado

Quanto ao fator de qualidade e tangente de perdas, foram aplicadas equações referentes à parte real (resistência) e imaginária (reatância) da impedância de entrada do circuito. Com a simulação AC, plotou-se os resultados em gráfico função da frequência, variando de 1MHz até 10THz, de forma que fossem verificadas “baixas frequências” até frequências altas onde o indutor ESL apresentasse influência sobre os sistema. A Figura 3 exibe o gráfico obtido.

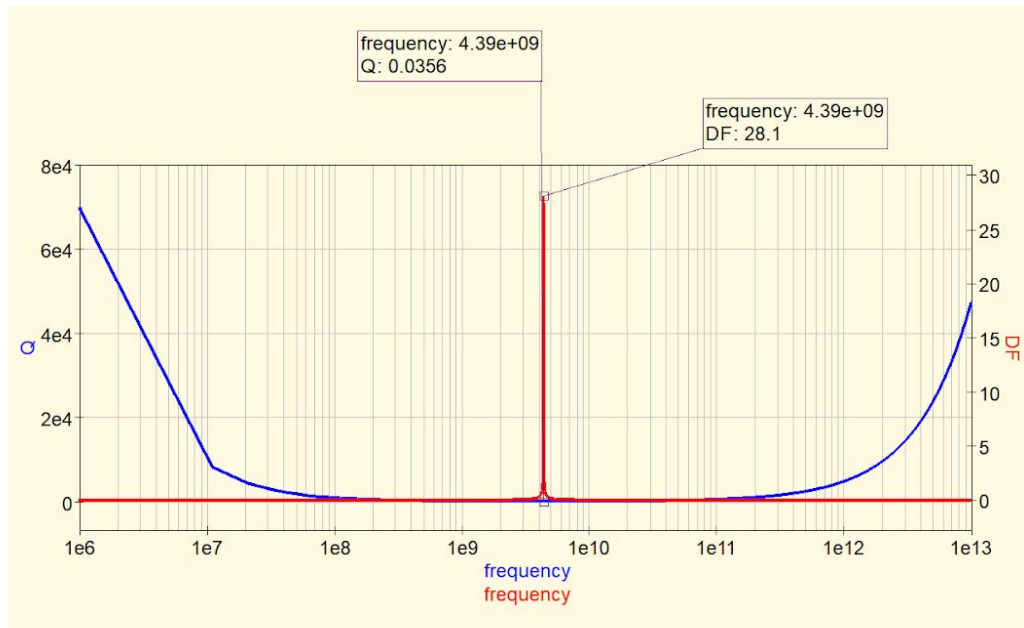


Figura 3 - Fator de Qualidade e Tangente de Perdas (DF) simulados

Observa-se que, devido à imprecisão da simulação, não verifica-se o sinal de tangente de perdas (Dissipation Factor - DF) tendendo ao infinito. Configuram-se 1 milhão de pontos para a simulação, resultando (dada a faixa de simulação) em passos de 10 MHz. Assim, na frequência de auto-ressonância, onde teoricamente deveríamos obter $Q = 0$ e DF infinito, temos $Q = 0,0356$ e $DF = 28,1$.

A Figura 4 apresenta a tabela obtida para o fator de qualidade e tangente de perdas de acordo com diferentes valores de frequência.

frequency	Q	DF
1e9	86.5	0.0116
2e9	36.1	0.0277
3e9	16.2	0.0618
4e9	3.85	0.26
5e9	5.45	0.183
6e9	13.2	0.0756
7e9	20.1	0.0496
8e9	26.5	0.0377
9e9	32.5	0.0307
1e10	38.3	0.0261

Figura 4 - Tabela de Fator de Qualidade e Tangente de Perdas

Atividade 3

Inclua a tolerância do capacitor especificada pelo fabricante e refaça o item 2 usando análise estatística. (Salve os pontos e plote histograma da frequência onde ocorre o máximo fator de qualidade).

Utilizando-se o modelo da TDK de part number C.0402.C0G.1C.4R7.C.020.A.B, identifica-se a seção de tolerância de letra C com $\pm 0,25\text{pF}$. Dessa forma houve faixa de $4,45\text{pF}$ a $4,95\text{pF}$. Em relação a variação em conjunto com frequência, foi utilizada a função Parameter Sweep do software e plotado gráfico 3D cartesiano, conforme Figura 5.

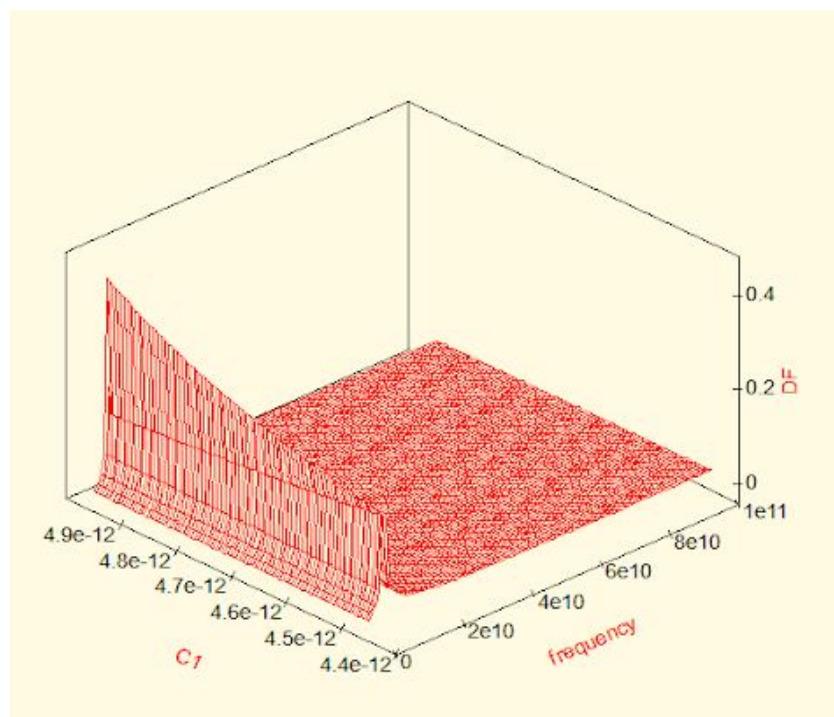


Figura 5 - Gráfico 3D cartesiano da tangente de perdas com variação de capacitância

O gráfico para o fator de qualidade se encontra na Figura 6, havendo diferentes pontos de mínimo (valores Q nulos) devido às distintas frequências de auto ressonância.

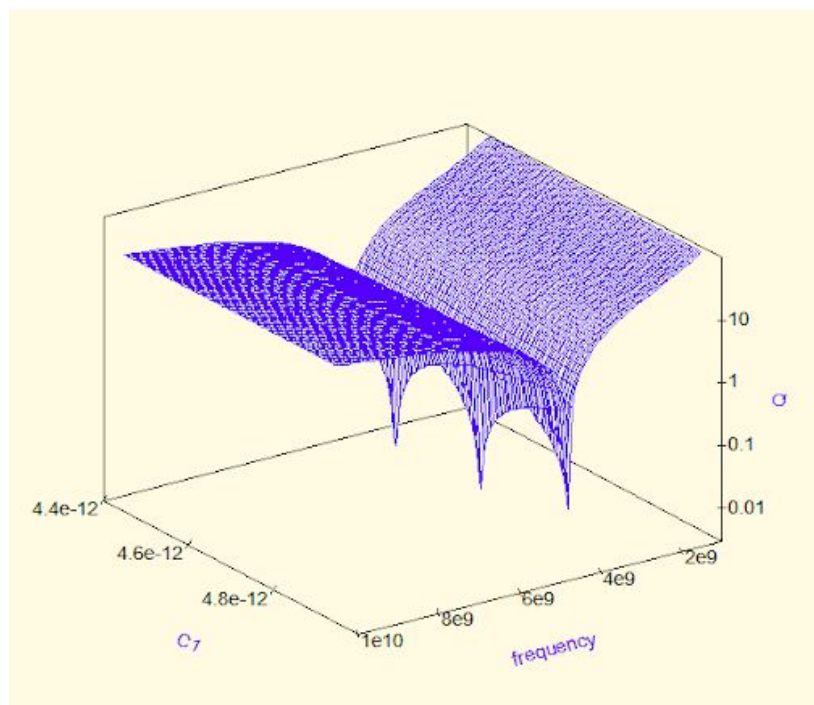


Figura 6 - Gráfico 3D cartesiano do fator de qualidade com variação de capacitância

Para obter as frequências de auto ressonância se plotou a parte imaginária resultante do circuito em função da frequência, obtendo-se o gráfico apresentado na Figura 7.

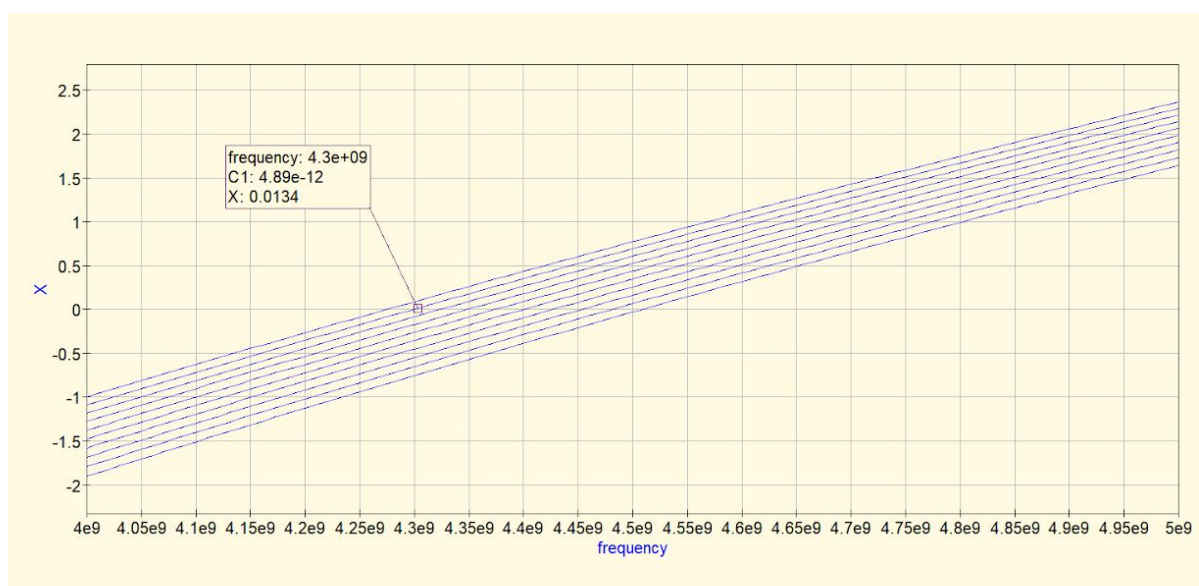


Figura 7 - Reatância resultante vs. frequência com variação de capacitância

Os dados (aproximados, devido à precisão finita do software) para a frequência de auto ressonância, conforme condições supracitadas, são apresentados na Tabela 1.

Tabela 1 - Frequências de auto ressonância com tolerância de capacitância

Capacitância (pF)	Frequência de auto ressonância (GHz)
4,95	4,27
4,89	4,3
4,84	4,32
4,78	4,34
4,73	4,37
4,67	4,39
4,62	4,42
4,56	4,45
4,51	4,48
4,45	4,51

A queda substancial no fator de qualidade, ao se simular em frequência de 1GHz é identificável na Figura 8. O histograma revela a característica linearmente decrescente, evidente ainda mais quando a linha de tendência é visível.

Para a tangente de perdas, centralizou-se análise aproximadamente na frequência de auto ressonância da capacitância nominal do dispositivo (4,7pF), ou seja, em 4,38 GHz. Verifica-se o histograma resultante na Figura 9. Valor central de referência (que idealmente deveria ser infinito) se apresenta como 10,2571. A linha de tendência em média móvel de 2 períodos esboça o que seria uma similaridade de curva gaussiana.

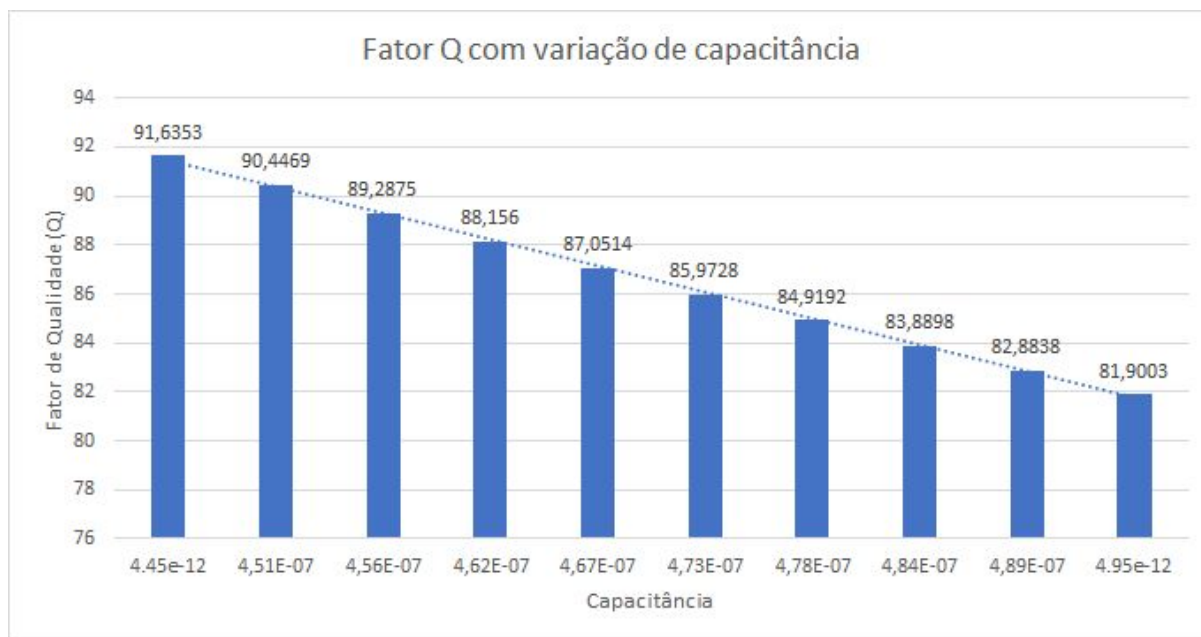


Figura 8 - Histograma de Fator Q com variação de capacitância em $f = 1\text{GHz}$

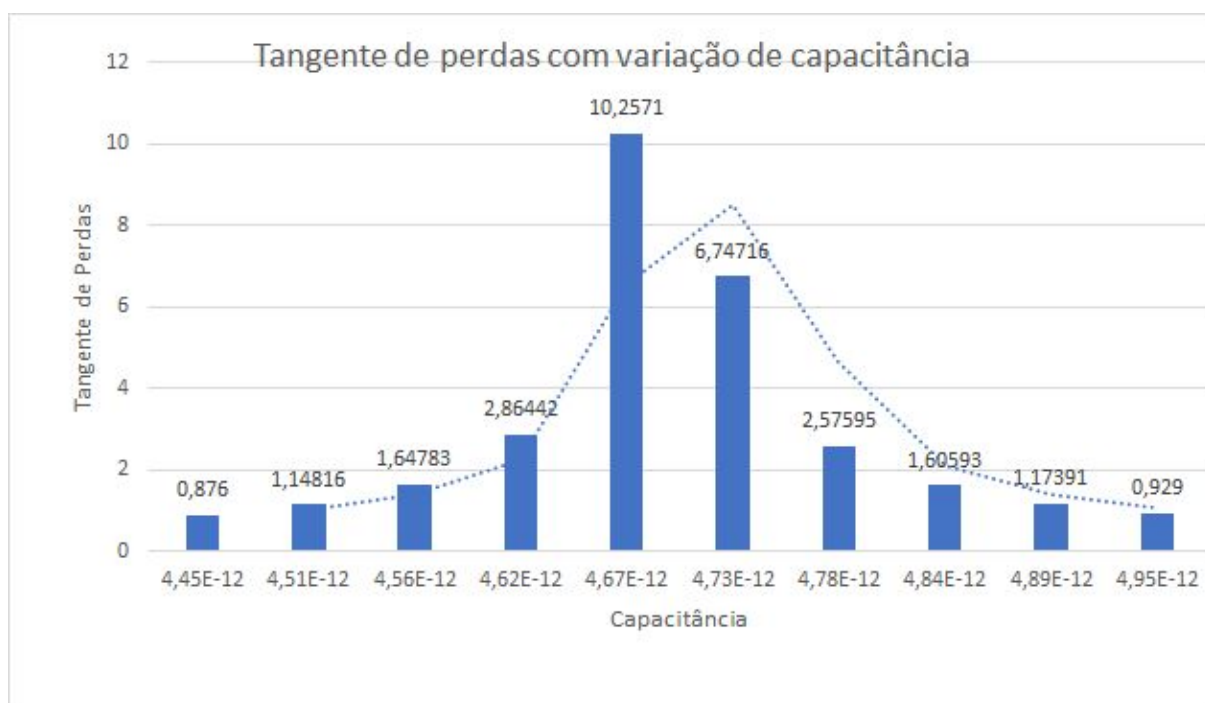


Figura 9 - Histograma de Tangente de Perdas com variação de capacitância em $f = 4,39\text{GHz}$

Atividade 4

Simule o filtro projetado no item 4 do PRELAB e verifique a variação da frequência de corte do filtro em função da tolerância do capacitor. (Use histograma para mostrar o resultado).

A Figura 10 apresenta o gráfico de Bode do sinal de saída resultante (V_o) para o circuito montado (considerando o modelo “realístico” de capacitor).

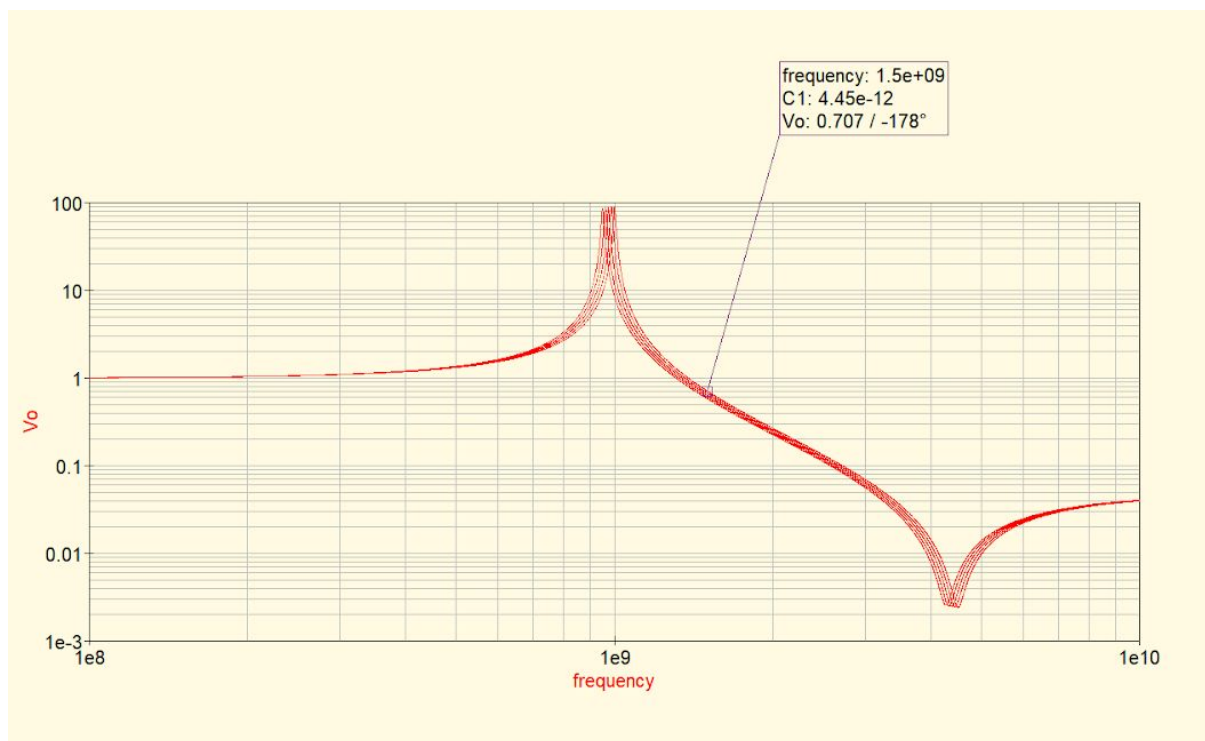


Figura 10 - Diagrama de Bode para filtro LC montado

Assim, verificou-se a frequência respectiva para cada valor de capacitância no ponto de -3dB (tensão em aproximadamente 0,707V). A Tabela 2 apresenta os resultados para esta análise.

Tabela 2 - Frequências corte -3dB de filtro passa-baixas LC com tolerância de capacitância

Capacitância (pF)	Frequência de auto ressonância (GHz)
4,45	1,5
4,51	1,49
4,56	1,49
4,62	1,48
4,67	1,47
4,73	1,46
4,78	1,45
4,84	1,44
4,89	1,43
4,95	1,43

Portanto, com o histograma plotado, conforme Figura 11, verifica-se decréscimo linear, evidente na linha de tendência adicionada, da frequência de corte -3dB do filtro LC ao se admitir a tolerância do capacitor conforme especificada pelo fabricante. Os valores do resultado distam do teórico pelo fato da frequência de corte calculada considerar o modelo ideal de capacitor.

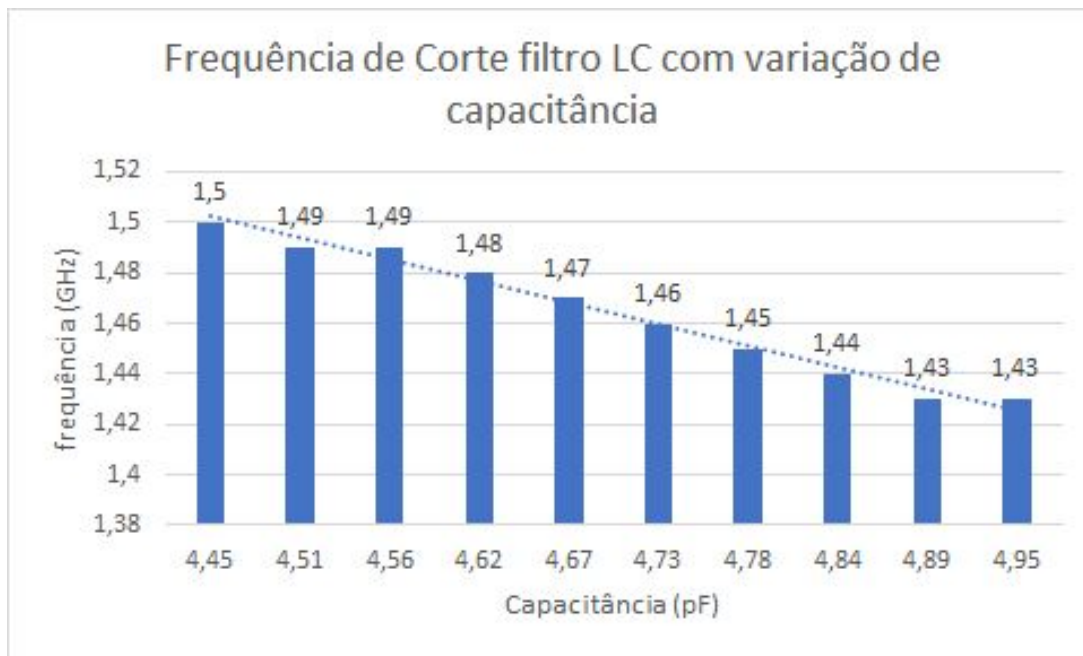


Figura 11 - Histograma de Frequência de corte do filtro LC admitindo tolerância de capacitor

Questões

Questão 1

Explicar o significado de ESR, ESL, tangente de perdas

O componente ESR (Equivalent Series Resistance) é o resistor em série no modelo equivalente do capacitor analisado. Ele inclui resistência do material dielétrico, da placa, solução eletrolítica e metal dos terminais em uma frequência específica [5].

O componente ESL (Equivalent Series Inductance) é o indutor em série no modelo equivalente do capacitor analisado. É presente, em geral, devido à indutância de eletrodos, sendo denominada, de mesmo modo, como auto-indutância do capacitor.

A tangente de perdas, também dita como Fator de Dissipação (Dissipation Factor - DF), representa a relação entre a parte imaginária efetiva da reatância capacitiva e a sua parte real (ESR). Convenciona-se uso de $\tan(\sigma)$ para defini-la, tendo a caracterização pela equação seguinte:

$$\tan(\sigma) = DF = \frac{ESR}{|X_C|} = \frac{1}{Q}$$

Assim, representa a tangente do ângulo entre ESR e X_C num gráfico Imaginário vs. Real. Além de ser igual ao inverso do fator de qualidade Q de capacitores e, em modelos ideais, podemos ver que a tangente de perdas é nula [2].

Questão 2

Explique o papel de cada componente do modelo do capacitor utilizado no experimento

O componente ESR tem um papel de realizar as “perdas ôhmicas” no modelo, dissipando potência e, conseqüentemente, sendo responsável por deteriorar o capacitor devido ao escalamento térmico. O resistor equivalente série aglomera diferentes fatores que dissipam potência ativa, como “fricção” de dipolos alinhantes, tão como resistência intrínseca de condutores. Uma forma de reduzir a ESR é aumentar a área relativa às placas paralelas de um capacitor, mantendo constante, no entanto, a espessura das placas.

O componente ESL é a auto-indutância do modelo, sendo um limitante do quão rápido um capacitor pode atuar e desacoplar sinais. Define, de mesmo modo, uma ressonância, por conta de formar um circuito tank.

A resistência em paralelo representa a corrente de fuga no modelo do capacitor. Em geral, apresenta altos valores ôhmicos, de forma que é desconsiderada dissipação de potência sobre tal elemento.

Salienta-se que os valores do modelo são para condições específicas de análise, ou seja, sendo tratados como estáticos. Assim, em verificação prática (ou modelos mais realistas) é possível que haja não-linearidades e comportamento dinâmico (alteração de valores dos componentes de acordo com frequência, temperatura, entre outros fatores).

Questão 3

Refleta e disserte sobre como medir o fator de qualidade na frequência de auto-ressonância de um capacitor?

Na frequência de auto-ressonância do capacitor temos reatância nula, de maneira tal que se dificulta (ou impossibilita de maneira direta) a obtenção por equação padrão de cálculo de fator de qualidade ou tangente de perdas (fator de dissipação). Assim, pode-se inserir uma impedância (de preferência puramente reativa, de modo tal que não se dissipe potência ativa numa possível resistência presente) de valor conhecido em série ao circuito, de forma que se extraia o valor Q a partir das variáveis resultantes. Contudo, há técnicas de medição como por largura de banda em -3dB ou estabilidade de fase (havendo técnicas em semelhante modo para indutores) [3].

Questão 4

Explicar a diferença entre capacitores X7R e C0G

Capacitores X7R são pertencentes à denominada Classe 2, com a seguinte composição: primeiro caractere indicando a menor temperatura que o capacitor suporta (X correspondendo a -55°C); segundo caractere indica máxima temperatura (7 correspondendo a 125°C); e terceiro caractere indicando máxima mudança de capacitância em relação à faixa de temperatura de operação (R como $\pm 15\%$) [6].

Já o capacitor C0G, pertencente à denominada Classe 1, apresenta um coeficiente de alteração de capacitância em função da temperatura seguindo partes por milhão. Mais especificamente, sendo $0 \pm 30 \text{ ppm}/^{\circ}\text{C}$, equivalente a $0,003\%/^{\circ}\text{C}$. Com isso, são apropriados para aplicações em circuitos ressonantes e sistemas que necessitam de operação precisa em face de alta dinamicidade de temperatura. Em geral, apresentam encapsulamento de maiores dimensões do que modelos X7R.

Questão 5

No caso do capacitor do experimento, até que frequência você sugere a sua utilização? Explique com detalhes.

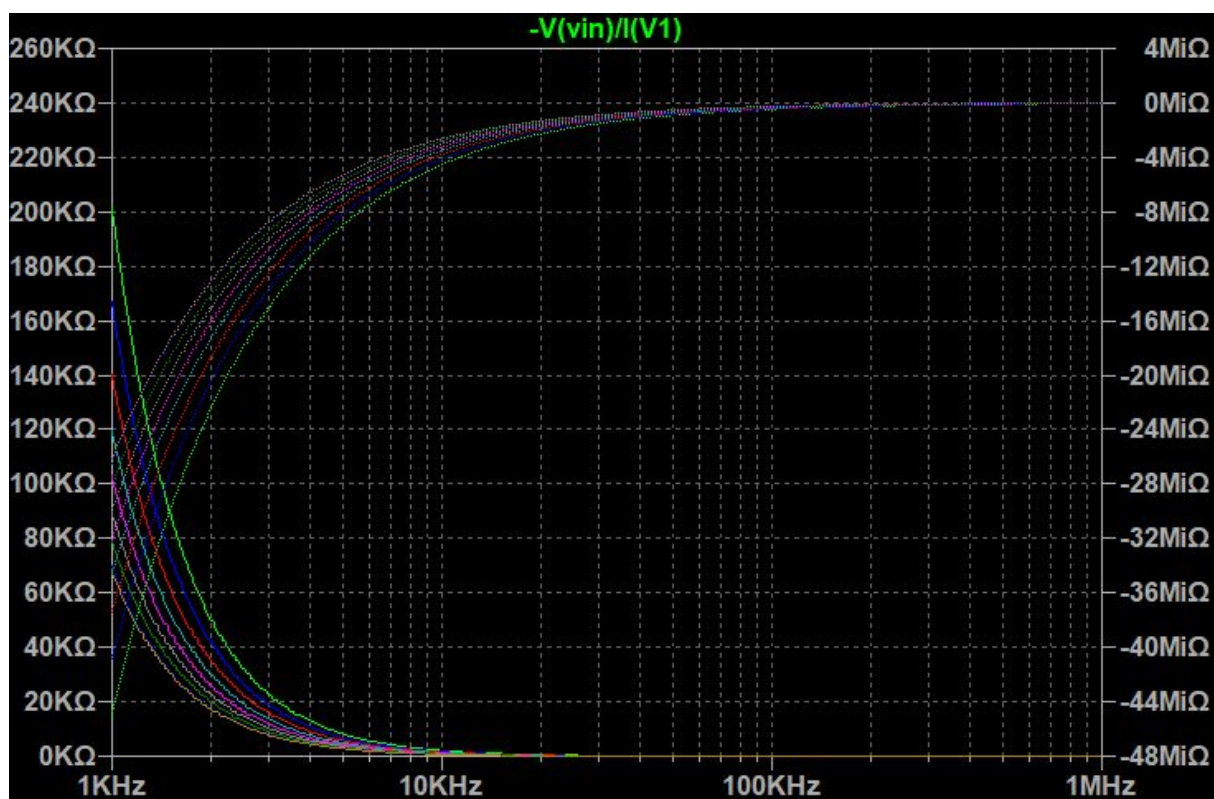
Recomenda-se a utilização do capacitor em frequências abaixo da frequência de auto ressonância (4,38GHz para o caso de análise inicial). Isto, por conta de influência crescente indesejável, após este ponto, do componente ESL, elevando-se consideravelmente a reatância indutiva e resultando em performance distante da esperada de um capacitor (idealmente).

Questão 6

Explique o comportamento do capacitor do experimento em função da temperatura.

Foi implementado o circuito referente no software LTSPICE do modelo analisado de capacitor seguindo o port number apresentado, conforme catálogo da TDK. Optou-se o software LTSPICE por apresentar melhores (e mais intuitivas) formas de análise SPICE com modificação (sweep) de temperatura).

Percebe-se que nas baixas frequências, até 1MHz, há diferença visível entre as curvas de resistência e reatância equivalentes do circuito, conforme exibido na figura a seguir. Como observação, a curva verde representa sinal de impedância resultante para -55°C e as demais curvas são temperaturas mais elevadas de 25 em 25°C até o limite de 125°C .



Dessa forma, identificou-se que, tendo a variação de -55°C até 125°C (faixa térmica de operação indicada pelo fabricante) e com o coeficiente de temperatura do capacitor referido em 30ppm/ $^{\circ}\text{C}$, há elevação proporcional linear (em modelo simplificado) de capacitância com a temperatura.

Tal efeito deve-se a fenômenos termodinâmicos como dilatação térmica volumétrica dos materiais que compõem o dispositivo, energia cinética eletrônica e demais pontos. Assim, dependendo da aplicação, um projetista deve estar atento a resposta de capacitores (entre outros elementos chave/importantes do circuito) em face de variação da temperatura [4].

Salienta-se que tal análise é referente ao modelo “simplificado”, porém mais realístico do que o tradicional, de um capacitor. Modelos mais complexos podem considerar análises com coeficientes de temperatura em ordens maiores, além de adicionar resposta do sistema em sobreposição a demais fatores moderadores da performance, como ruído, interferência, entre outros aspectos.

Referências

[1] TDK. **Multilayer Ceramic Chip Capacitors**. Disponível em: <https://product.tdk.com/info/en/technicalsupport/tvcl/general/mlcc.html>. Acesso em 24 set 2020.

[2] Notas de Aula EEL7319 - Circuitos RF

[3] Jaimes, A. F., Cabrera, F. L., & de Sousa, F. R. (2018). Characterization of High-Q Inductors Up to Its Self-Resonance Frequency for Wireless Power Transfer Applications. *IEEE Microwave and Wireless Components Letters*, 1–3. doi:10.1109/lmwc.2018.2876770

[4] STEER, Michael. **MICROWAVE AND RF DESIGN NETWORKS Vol. 3**. NC State University, 2019

[5] XTRONICS. **Capacitors and ESR**. Disponível em: https://xtronics.com/wiki/Capacitors_and_ESR.html#:~:text=ESR%20Defined,the%20name%20Equivalent%20Series%20Resistance). Acesso em 24 set 2020.

[6] ALL ABOUT CIRCUITS. **X7R, X5R, C0G...: A Concise Guide to Ceramic Capacitor Types**. Disponível em: <https://www.allaboutcircuits.com/technical-articles/x7r-x5r-c0g...-a-concise-guide-to-ceramic-capacitor-types/>. Acesso em 24 set 2020.