

Relatório 1 - Componentes Passivos em RF

Marina Rocha Guimarães

August 28, 2019

0.1 Introdução

Visto que o comportamento de componentes passivos é imensamente influenciado em aplicações de alta frequência, torna-se necessária a realização de uma boa análise de cada componente que será utilizado. Este experimento trata-se portanto da análise do comportamento do componente passivo capacitor em aplicações RF, definindo-se primeiramente alguns parâmetros desejados e escolhendo-se no catálogo disponibilizado no roteiro um modelo de capacitor. Esse modelo foi então implementado no software ADS a fim de realizar a simulação AC para extrair alguns parâmetros importantes para a análise desejada. Realizou-se também nesse experimento a análise estatística do modelo utilizado (utilizando para isso a simulação Monte Carlo), considerando a tolerância do capacitor especificada pelo fabricante. Finalmente, projetou-se um filtro passa-banda LC com o capacitor implementado, verificando-se a variação de frequência de ressonância em função da tolerância do capacitor.

0.2 Atividades Realizadas em Laboratório

0.2.1 Análise de Parâmetros

Inicialmente, foi composto o *part number* de um capacitor com especificações fornecidas no roteiro do laboratório. Para isso, utilizou-se as informações presentes em [3] obtendo-se as seguintes relações:

- Dimensão (0,4 mm x 0,2 mm): 0402
- Dielétrico: C0G
- Tensão nominal (10V): 1C
- Capacitância (1 pF): 010
- Tolerância (+- 0,25 pF): C
- Espessura (0,2 mm): 020

A partir disso e da análise do catálogo fornecido também no roteiro, escolheu-se o seguinte modelo de capacitor: "C.0402.C0G.1C.010.C.020.B.C". A fim de realizar a simulação AC, montou-se o circuito presente na Figura 1 abaixo, referente ao modelo escolhido.

Um parâmetro importante de se analisar (ao analisar um capacitor operando em RF) é a frequência de auto ressonância. Esse parâmetro indica em qual valor de frequência o capacitor passa a se comportar como um indutor, ou seja, a sua impedância começa a aumentar com o aumento da frequência. Visto que a parte imaginária do valor da impedância do capacitor modelado é igual a zero na frequência de ressonância, pôde-se calcular como ponto de partida seu valor teórico, sendo esse cálculo mostrado na Figura 2 abaixo.

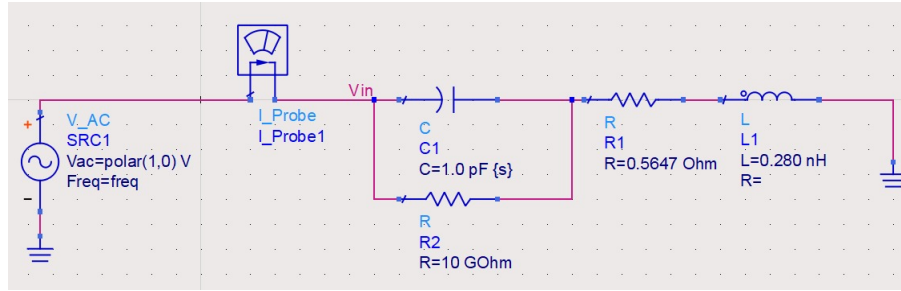


Figure 1: Circuito utilizado para simulação

A partir do cálculo realizado, percebe-se que o valor teórico esperado para a frequência de auto ressonância do capacitor modelado é de 9.511 GHz. Para analisar se esse resultado obtido conseguiria ser reproduzido na simulação do software utilizado, plotou-se a parte real e imaginária da impedância do capacitor modelado em função da frequência, o que pode ser observado na Figura 3 abaixo. Vale ressaltar que os valores obtidos para a impedância na faixa de frequência analisada foram obtidos através da razão do valor da fonte de tensão e do valor de corrente, medido com um amperímetro no ADS.

A partir dos gráficos, percebe-se que o valor da frequência de ressonância é de 9.508 GHz, já que pode ser observado esse valor quando a parte imaginária da impedância do capacitor modelado é zero. Nota-se que esse é o valor esperado com o cálculo teórico realizado anteriormente.

Outros dois parâmetros importantes que também foram analisados nesse experimento foram o fator de qualidade e a tangente de perdas, sendo um o inverso do outro. O fator de qualidade representa a eficiência do capacitor em termos de perdas de energia [2], ou seja, é a relação entre a energia ativa e reativa do capacitor. Consequentemente, a tangente de perdas é o fator relacionado à dissipação de energia do capacitor.

A fim de calcular esses dois parâmetros, foi utilizado a equação $Q = \text{Im}\{Z\} / \text{Real}\{Z\}$ e $\tan \delta = 1/Q$, como pode ser visto nas Figuras 4 e 5 abaixo.

No entanto, esse é um método problemático para se calcular esses parâmetros exatamente na frequência de auto ressonância, já que nessa frequência a parte imaginária de Z é igual a zero. Logo, outro método deve ser utilizado.

0.2.2 Simulação Monte Carlo

O próximo passo foi incluir na simulação a tolerância do capacitor especificada pelo fabricante (mais ou menos 0,25pF) a fim de se realizar uma análise estatística, utilizando a simulação de Monte Carlo, ou seja, realizou-se a mesma simulação por um grande número de vezes, alterando apenas o parâmetro especificado - o valor da capacitância do capacitor C_1 nesse caso. Para gerar os resultados, foram especificadas 100 amostras de Monte Carlo, e os resultados podem ser vistos a seguir. A Figura 6 abaixo mostra o valor da impedância do

$$\begin{aligned}
Z_C &= \frac{1}{j\omega C} \parallel R_2 + R_1 + j\omega L \\
Z_C &= \left(\frac{\frac{1}{j\omega C} \cdot R_2}{\frac{1}{j\omega C} + R_2} \right) + R_1 + j\omega L \\
Z_C &= \frac{R_2 \cdot j\omega C}{j\omega C + R_2 j\omega C} + R_1 + j\omega L \\
Z_C &= \frac{R_2}{1 + R_2 j\omega C} + R_1 + j\omega L \\
Z_C &= \frac{R_2 (1 - R_2 j\omega C)}{(1 + R_2 j\omega C)(1 - R_2 j\omega C)} + R_1 + j\omega L \\
Z_C &= \frac{R_2 - j\omega C R_2^2}{1 + \omega^2 C^2 R_2^2} + R_1 + j\omega L \\
Z_C &= \frac{R_2}{1 + \omega^2 C^2 R_2^2} + R_1 + j \left(\omega L - \frac{\omega C R_2^2}{1 + \omega^2 C^2 R_2^2} \right) = 0 \\
\Rightarrow \omega L &= \frac{\omega C R_2^2}{1 + \omega^2 C^2 R_2^2} \Rightarrow L + L\omega^2 C^2 R_2^2 = C R_2^2 \\
\Rightarrow \omega &= \sqrt{\frac{C R_2^2 - L}{C^2 R_2^2 L}} \Rightarrow f = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{C R_2^2 - L}{C^2 R_2^2 L}} \\
\text{↳ SUBSTITUINDO OS VALORES:} \\
f_s &= 9,511 \text{ GHz} //
\end{aligned}$$

Figure 2: Cálculo do valor teórico da frequência de ressonância

capacitor - parte real e imaginária - em função da frequência, ao passo que a Figura 7 abaixo mostra os valores do fator de qualidade e da tangente de perdas para a simulação de Monte Carlo.

A partir dos resultados obtidos, nota-se que a impedância do capacitor, o fator de qualidade e a tangente de perdas são dependentes do valor de C_1 utilizado. A fim de se fazer uma breve análise estatística dos dados obtidos com essa simulação, os pontos do gráfico referente ao cálculo do fator de qualidade foram exportados e analisados em Python para que um histograma fosse gerado. Escolheu-se de cada simulação realizada o menor valor obtido do fator de qualidade e analisou-se em que frequência ele ocorreu, a fim de analisar a frequência

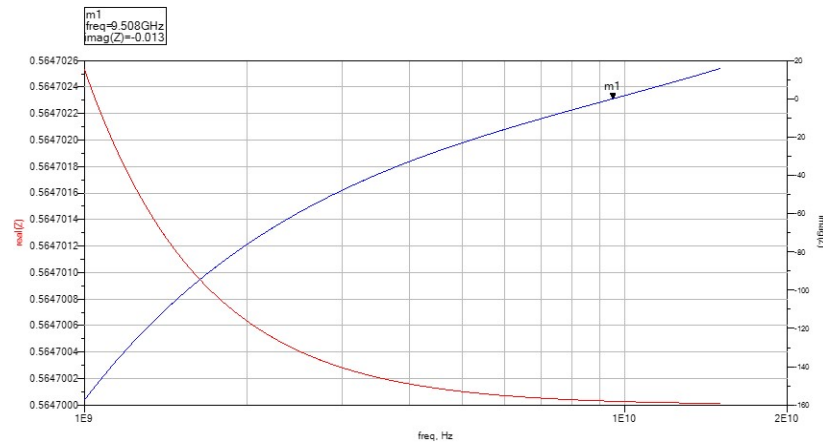


Figure 3: Parte real e imaginária da impedância do capacitor modelado em função da frequência



Figure 4: Determinação do fator de qualidade Q do capacitor

de ressonância para diferentes valores de C_1 . O histograma obtido é mostrado abaixo na Figura 8.

Visto que a frequência de auto ressonância varia com o valor de C_1 , mas não de maneira linear (como foi visto na Figura 2), percebe-se que o gráfico apresenta uma tendência de queda para maiores valores de frequências e que o maior número de ocorrências aconteceu próximo ao valor teórico calculado com C_1 igual a 1 pF.

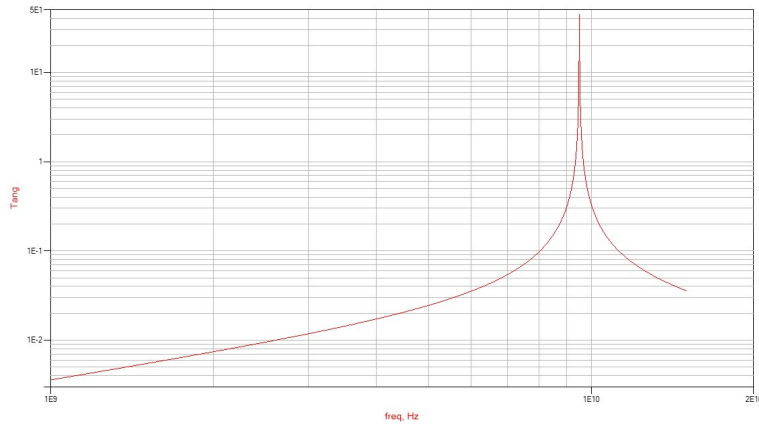


Figure 5: Determinação da tangente de perdas do capacitor

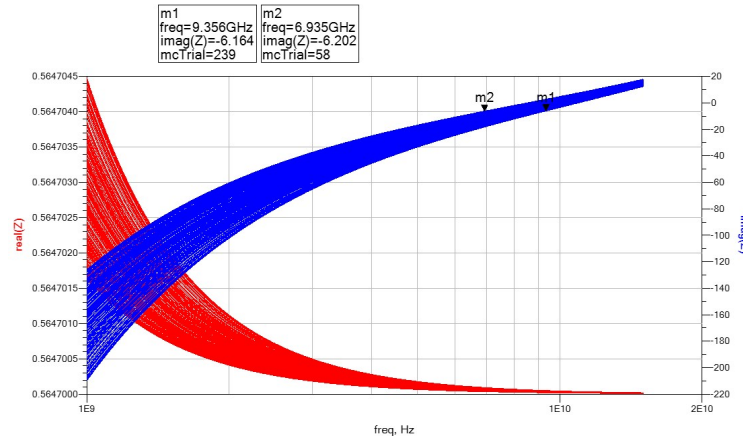


Figure 6: Componentes Real e Imaginária da impedância do capacitor em função da frequência para a simulação Monte Carlo

0.2.3 Filtro Passa-Banda

Por fim, projetou-se um filtro passa-banda LC com o capacitor implementado. A Figura 9 abaixo mostra o circuito utilizado no ADS a fim de realizar a simulação do filtro, sendo o valor do indutor adicionado igual a 0.73nH já que foi escolhido o valor de 5 GHz para a frequência central do filtro.

Na Figura 10, pode ser observado o diagrama de bode traçado para o filtro modelado acima para uma carga de 1 k Ω .

Foram então traçados novamente os gráficos do fator de qualidade e tangente de perdas para o novo circuito, os quais são apresentados na Figura 11 abaixo. Mais uma vez os pontos do gráfico referente ao cálculo do fator de qualidade foram exportados e analisados em Python para que um novo histograma fosse

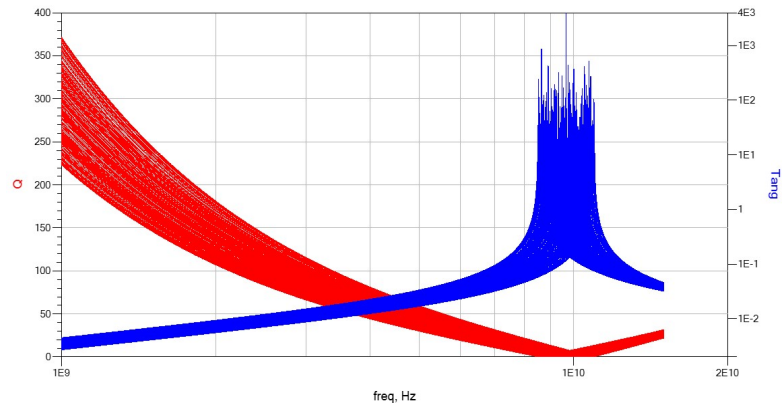


Figure 7: Fator de qualidade Q e tangente de perdas em função da frequência para a simulação Monte Carlo

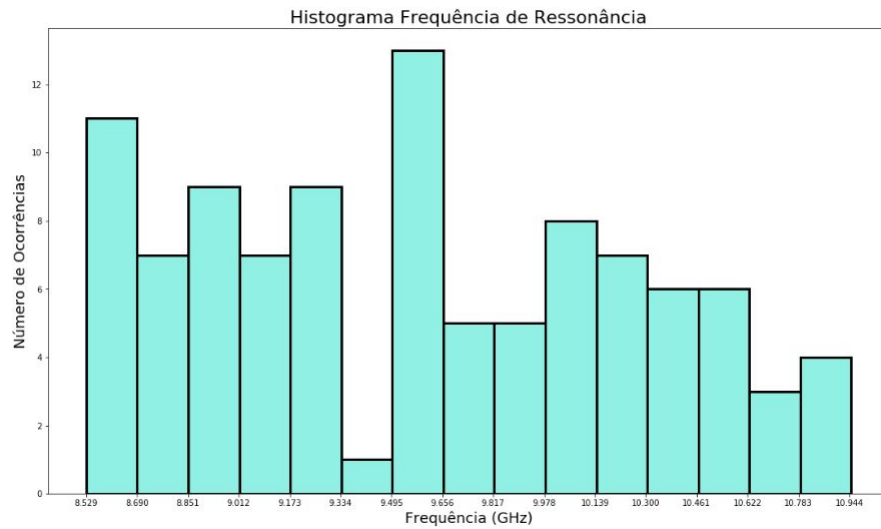


Figure 8: Histograma da Frequência de Ressonância determinada pelas mínimas do fator de qualidade

gerado, o qual pode ser visto na Figura 12 abaixo.

Nota-se que a tendência de queda observada no histograma da Figura 8 pode ser também observada utilizando o filtro projetado, confirmando a influência não linear do valor de C_1 na frequência de ressonância. No entanto, apesar de a tendência de queda se manter, os valores de ocorrência de máximos do fator de qualidade (valores de frequência de ressonância) mudaram, ficando agora em torno de 5 GHz - o que era esperado, visto que essa foi a frequência central do filtro projetado.

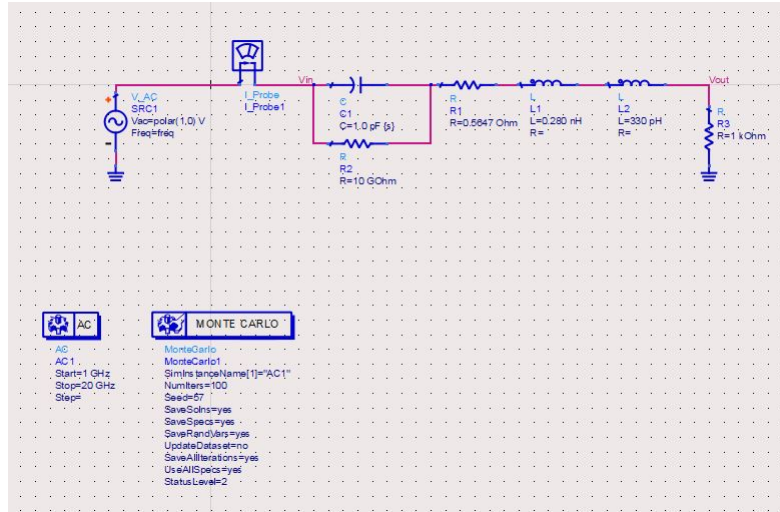


Figure 9: Filtro passa-banda com o capacitor implementado

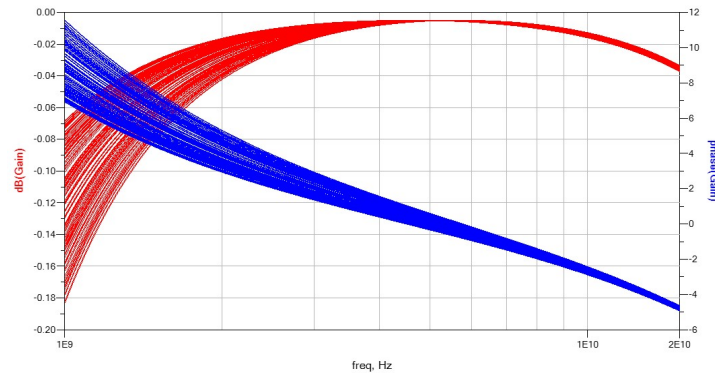


Figure 10: Diagrama de bode referente ao filtro passa-banda projetado

0.3 Questões Propostas

1. Explicar o significado de ESR, ESL, tangente de perdas.

O parâmetro denominado como ESR (*Equivalent Series Resistance*) é o resistor utilizado em série com o capacitor do modelo sendo, no caso desse experimento, o resistor R_1 , ao passo que o parâmetro ESL (*equivalent series inductance*) é o indutor que se encontra em série também com o capacitor do modelo. Enquanto o ESR é um componente resistivo que causa perda de energia em forma de calor o ESL faz com que um campo magnético se acumule nos dispositivos interferindo na forma como a corrente sobe até seu valor de pico e depois desce[4], ou seja, o ESR representa as perdas do capacitor enquanto o

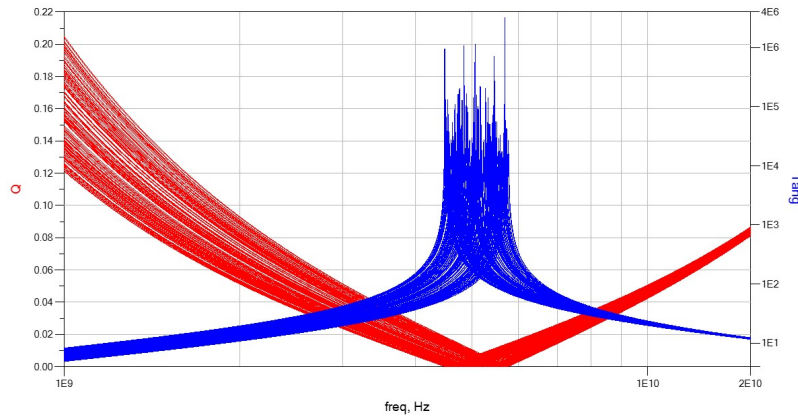


Figure 11: Fator de qualidade Q e tangente de perdas em função da frequência para a simulação Monte Carlo utilizando o novo circuito

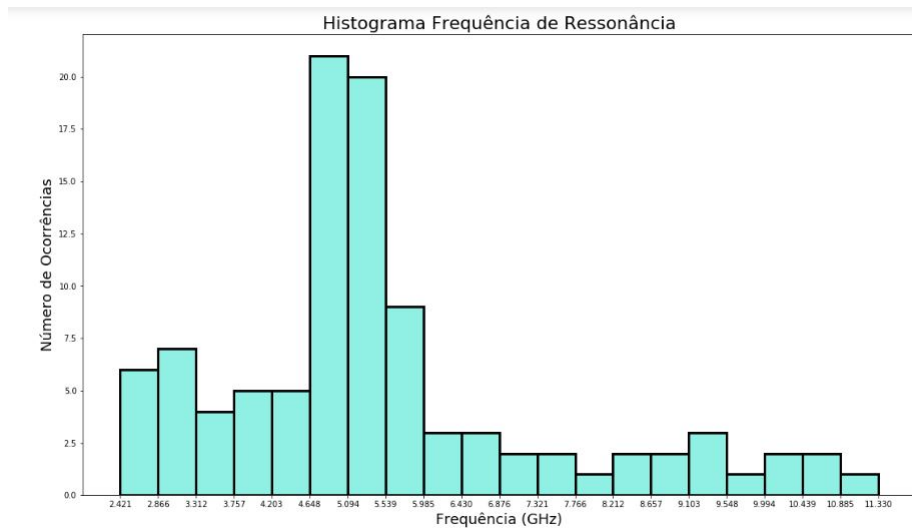


Figure 12: Histograma da Frequência de Ressonância determinada pelas mínimas do fator de qualidade utilizando o novo circuito

ESL modela o aumento da impedância, também do capacitor, para frequências muito altas (acima da frequência de auto ressonância).

A tangente de perdas, por sua vez, é definida como a tangente da diferença do ângulo fase entre a tensão e a corrente do capacitor em relação ao valor teórico de 90° previsto, sendo essa diferença causada pelas perdas dielétricas dentro do capacitor[5]. Ou seja, é o fator relacionado à dissipação de energia do capacitor, sendo diretamente proporcional à parte real da impedância do

capacitor modelado.

2. Como medir o fator de qualidade na frequência de auto-ressonância do componente?

A maneira como foi realizada a medição do fator de qualidade nesse experimento não pode ser utilizada para o exato valor da frequência de auto-ressonância do capacitor. Nesse caso, há um método específico que seria deslocar esse valor de frequência de auto-ressonância ao adicionar no circuito outro componente reativo, e realizar assim a medição da impedância do capacitor.

3. Explicar a diferença entre capacitores X7R e C0G.

Sabe-se que os diferentes materiais cerâmicos utilizados em capacitores influenciam diretamente suas características elétricas, as quais são agrupadas em "classes de aplicação" [1] segundo a norma Electronic Industries Alliance (EIA). De acordo com [7] e [6], os capacitores X7R e C0G pertencem, respectivamente, às classes II e I, sendo a classe I caracterizada por capacitores cerâmicos que oferecem alta estabilidade e baixas perdas para aplicações em circuitos ressonantes e a classe II capacitores cerâmicos que oferecem alta eficiência volumétrica para aplicações de suavização, by-pass, acoplamento e desacoplamento.

A partir da diferença de material utilizado, pode-se perceber em [3] a diferença entre a variação do valor da capacitância com a temperatura desses dois capacitores. Enquanto o X7R varia 15% para mais ou para menos, o C0G varia 30 ppm/°C.

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

Analisando o valor obtido de frequência de auto-ressonância do capacitor igual a 9.508 GHz, eu sugiro que essa seja a máxima frequência para a utilização do componente modelado nesse experimento, já que após esse valor de frequência o capacitor para de se comportar como um componente capacitivo e começa a se comportar como um componente indutivo e, conseqüentemente a impedância do componente começa a aumentar proporcionalmente com o aumento da frequência.

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

Visto que o capacitor utilizado foi o C.0402.C0G.1C.010.C.020.B.C, percebe-se que a variação do valor da capacitância com a temperatura é de 30 ppm/°C.

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

O capacitor C_1 é o próprio componente capacitivo do modelo. O resistor utilizado em paralelo com o capacitor C_1 existe para modelar a corrente de fuga do capacitor. Já o resistor utilizado em série com o capacitor C_1 é o ESR (representa as perdas do capacitor). Por fim, o indutor utilizado é o ESL sendo responsável pelo aumento da impedância do componente modelado para frequências muito altas.

0.4 Conclusão

Percebe-se a partir desse experimento como a utilização de componentes em altas frequências deve ser bem supervisionado, já que muitas propriedades e parâmetros dos componentes dependem da frequência em que ele está sendo utilizado. Nesse experimento foi possível perceber como o capacitor começa a se comportar praticamente como um indutor em frequências acima do seu valor de auto-ressonância. Logo, a especificação desse parâmetro é de extrema importância para decidir qual a faixa de frequência esse componente pode ser utilizado.

Além disso, com esse experimento notou-se que o cálculo usual do fator de qualidade - e por consequência, da tangente de perdas - não pode ser aplicado na exata frequência de auto-ressonância, já que nesse caso a parte imaginária da impedância do capacitor é igual a zero. Uma solução seria deslocar esse valor de frequência de auto-ressonância ao adicionar no circuito outro componente reativo. No entanto, não consegui realizar essa medida nesse experimento e obtive resultados inconclusivos sobre alguns parâmetros analisados exatamente na frequência de auto-ressonância.

Bibliography

- [1] *Ceramic capacitor*. Disponível em: https://en.wikipedia.org/wiki/Ceramic_capacitor.
- [2] *Q factor*. Disponível em: <http://www.capacitorguide.com/q-factor/>.
- [3] *TDK MLCC Catalog Number Description*. Disponível em: https://product.tdk.com/en/products/common/pdf/mlcc_partnumber_description.pdf.
- [4] *Effects of ESL on the performance of capacitors*. 2017, NOTE=.
- [5] *Capacitor ESR, Dissipation Factor, Loss Tangent Q*. 2019, NOTE=.
- [6] AVX. *C0G (NP0) Dielectric*. Disponível em: <http://www.avx.com/products/ceramic-capacitors/surface-mount/c0g-np0-dielectric/>.
- [7] AVX. *Standard MLCC (X7R Dielectric)*. Disponível em: <http://www.avx.com/products/ceramic-capacitors/surface-mount/x7r-dielectric/>.