

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA - UFSC**  
**CENTRO TECNOLÓGICO - CTC**  
**DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA E ELETRÔNICA**  
**CURSO DE ENGENHARIA ELETRÔNICA**  
**EEL 7319 - CIRCUITOS RF**

**PATRIK LOFF PERES**  
20103830

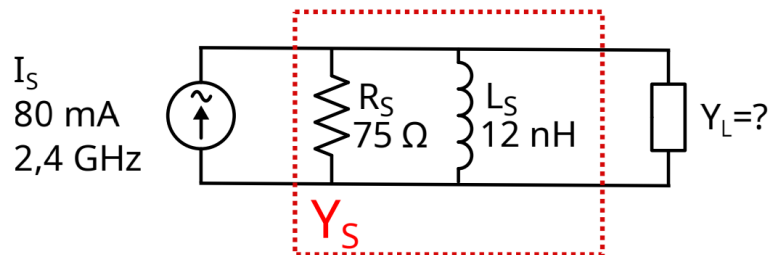
**Relatório 5 - Adaptação de Impedâncias**

**FLORIANÓPOLIS**  
**2023**

## Pré Lab

- 1) Na figura abaixo vê-se uma fonte de corrente senoidal  $I_S$  (amplitude de 80 mA e frequência 2,4 GHz) em paralelo com a admitância  $Y_S$  (resistor de 75  $\Omega$  e indutor de 12 nH) e com a admitância  $Y_L$ . A fonte de corrente  $I_S$  e a admitância  $Y_S$  representam o equivalente de Norton de um amplificador e  $Y_L$  representa sua carga. No problema em questão, o amplificador deve transferir para a carga a máxima potência possível com eficiência de 75 %. Considerando este cenário:

Figura 1 - Circuito inicial



- Encontre a expressão da potência dissipada na carga (PL);

Lab 5

1)

$Y_S = \left( \frac{1}{75} - j \frac{1}{2\pi f \cdot 12 \cdot 10^{-9}} \right) S$   
 $f = 2,4 \text{ GHz}$   
 $Y_S = (13,33 - j5,53) \text{ mS}$

$I_L = \frac{Y_L}{Y_L + Y_S} I_S$  ,  $V_L = \frac{I_S}{Y_L + Y_S}$

$P_L = \frac{1}{2} \text{Re} \{ V_L I_L^* \} = \frac{1}{2} \text{Re} \left\{ \frac{I_S}{Y_L + Y_S} \cdot \frac{Y_L^* I_S^*}{(Y_L + Y_S)^*} \right\}$

$P_L = \frac{|I_S|^2}{2} \text{Re} \left\{ \frac{Y_L^*}{|Y_L + Y_S|^2} \right\}$

- Encontre a expressão da eficiência  $\eta = PL/PS$ , na qual PS é a potência entregue pela fonte IS ao circuito;

$$V_L = V_S$$

$$P_S = \frac{1}{2} \operatorname{Re}\{V_S I_S^*\} = \frac{1}{2} \operatorname{Re}\left\{\frac{I_S}{Y_L + Y_S} \cdot I_S^*\right\} = \frac{|I_S|^2}{2} \cdot \frac{1}{\operatorname{Re}\{Y_L + Y_S\}}$$

$$\eta = \frac{P_L}{P_S} = \frac{|I_S|^2 \operatorname{Re}\left\{\frac{Y_L^*}{|Y_L + Y_S|^2}\right\}}{\frac{|I_S|^2}{2} \cdot \frac{1}{\operatorname{Re}\{Y_L + Y_S\}}} = \operatorname{Re}\left\{\frac{Y_L^*}{Y_L + Y_S}\right\}$$

$$\eta = \frac{G_L}{G_L + G_S}$$

• Encontre um valor para  $Y_L$  que satisfaça a especificação do problema.

$$\eta = 0,75 = \frac{G_L}{G_L + G_S}, \quad G_S = 13,33 \text{ mS} \Rightarrow G_L \approx 40 \text{ mS}$$

A equação acima garante a define  $G_L$  para a eficiência de 75%, mas para definir  $Y_L$  falta determinar  $B_L$ , como foi imposta a condição de que a máxima potência possível deve ser transferida para a carga, então a parte imaginária do equivalente entre  $Y_L$  e  $Y_S$  deve se anular, desta forma  $B_L = -B_S$

$$Y_L = (40 + j5,53) \text{ mS} = 40,38 \angle +7,87^\circ \text{ mS}$$

$$Z_L = \frac{1}{Y_L} = 24,76 \angle -7,87^\circ \Omega = (24,53 - j3,39) \Omega$$

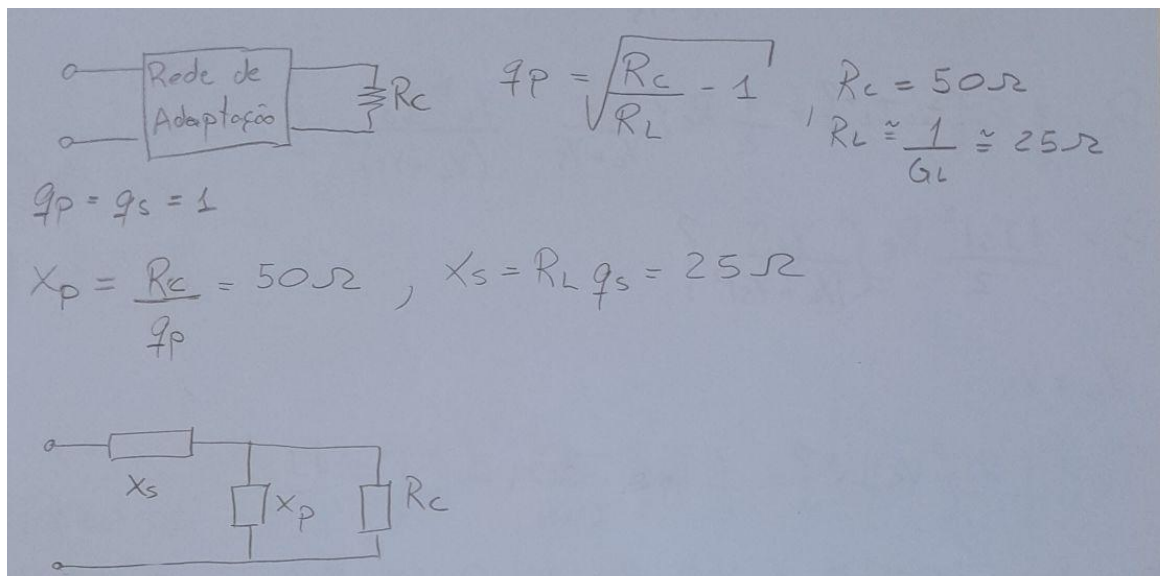
## Atividades

**2) Projete uma rede de adaptação (topologia L) que transforme uma resistência de  $50 \Omega$  na carga encontrada na questão anterior. Obs.: Use a metodologia proposta nas aulas e mostre todos os passos do projeto.**

O objetivo desta rede de adaptação é fazer o circuito da entrada ver a impedância

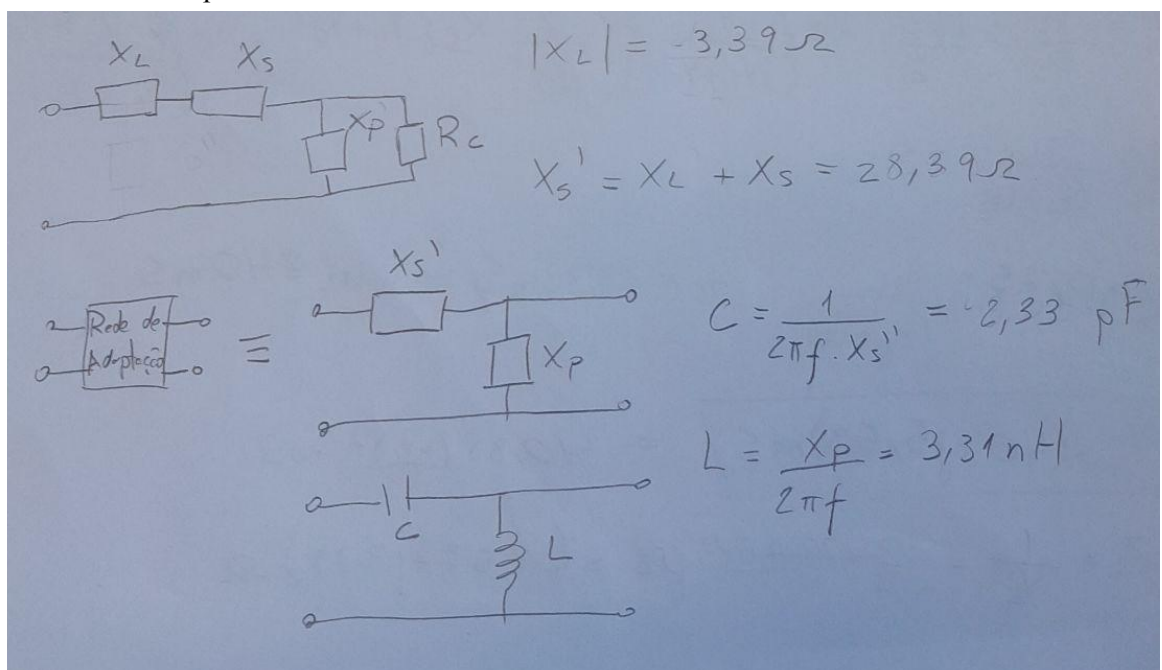
$Z_L = R_L - jX_L$  ao invés de  $R_c$ . Para tanto, inicialmente será feita uma rede de adaptação da resistência  $R_c$  para  $R_L$  pelo método do fator  $q$  mostrado em aula.

Como  $R_c > R_L$  será considerado que  $R_c$  é a resistência em paralelo.



Agora, será adicionado em série a rede de adaptação uma reatância de valor  $X_L$  que será incorporada pela própria rede, para resultar na adaptação de  $Y_L$  como desejado.

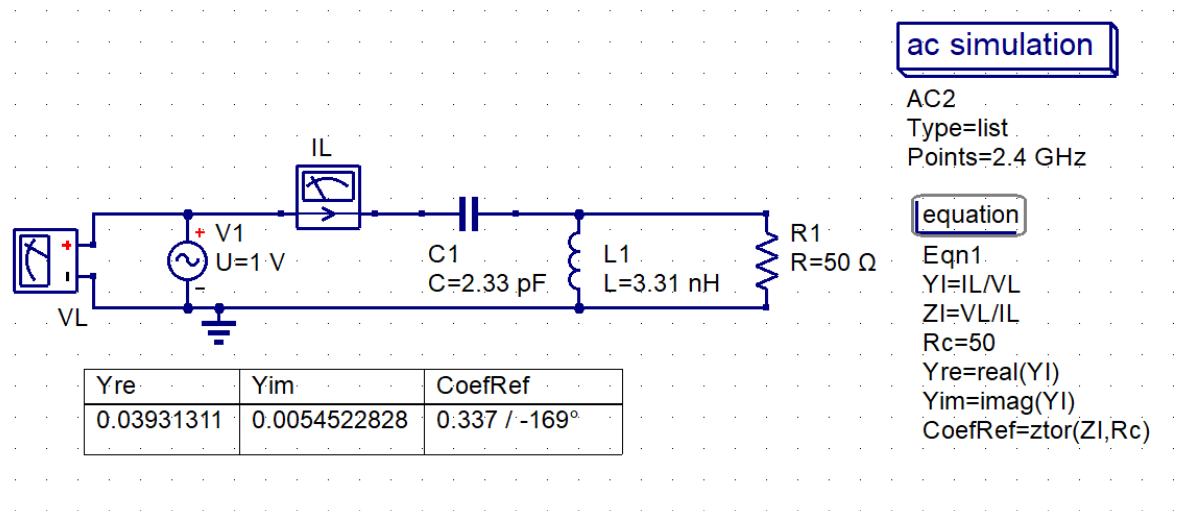
Arbitrariamente foi definida uma topologia passa altas para a rede, com um capacitor em série e um indutor em paralelo.



### 3). Simule o item 2 no Qucsstudio.

- Em uma tabela, mostre a admitância transformada (parte real e parte imaginária) e o coeficiente de reflexão (use a função  $ztor(x,Z)$  do QucsTudio) para a frequência nominal de projeto .

Figura 2 - Simulação da adaptação de impedância



- Em um gráfico plote curvas para cada uma das grandezas em função da frequência (neste caso a simulação terá que ser refeita, considerando agora uma faixa de frequências e não apenas um ponto).

Figura 3 - Gráfico da admitância pela frequência para uma banda larga

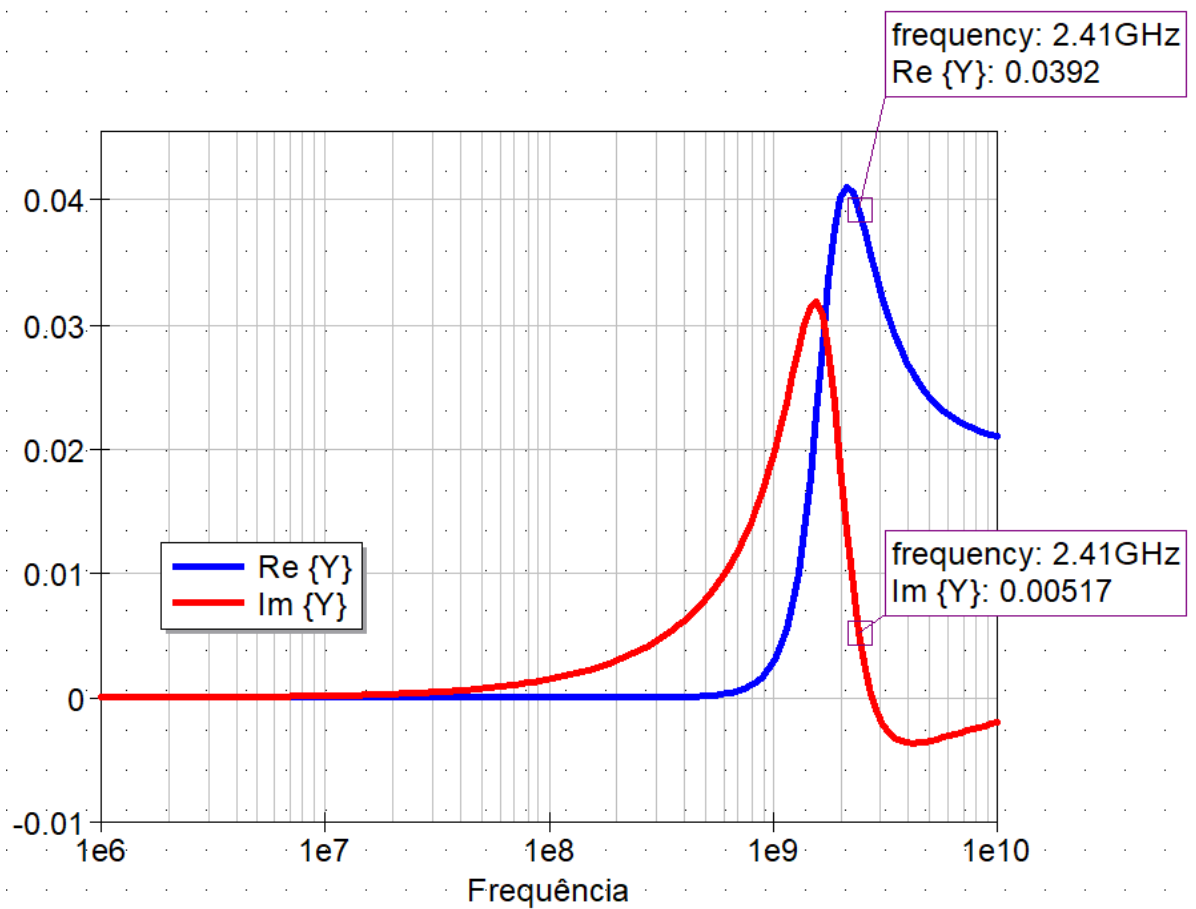


Figura 4 - Gráfico da admitância pela frequência para uma banda estreita

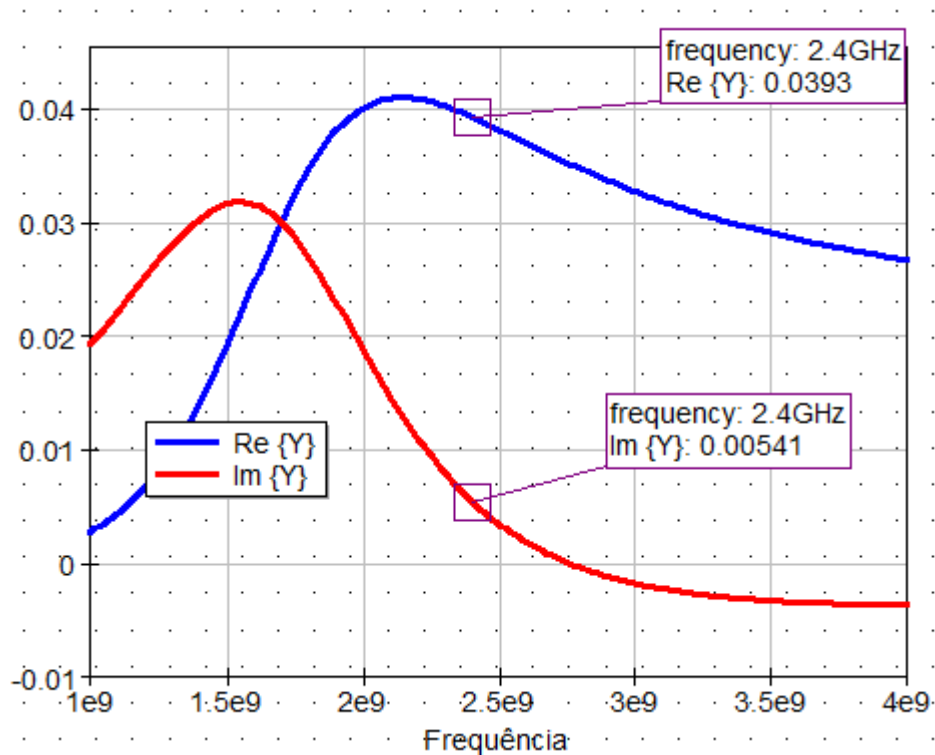
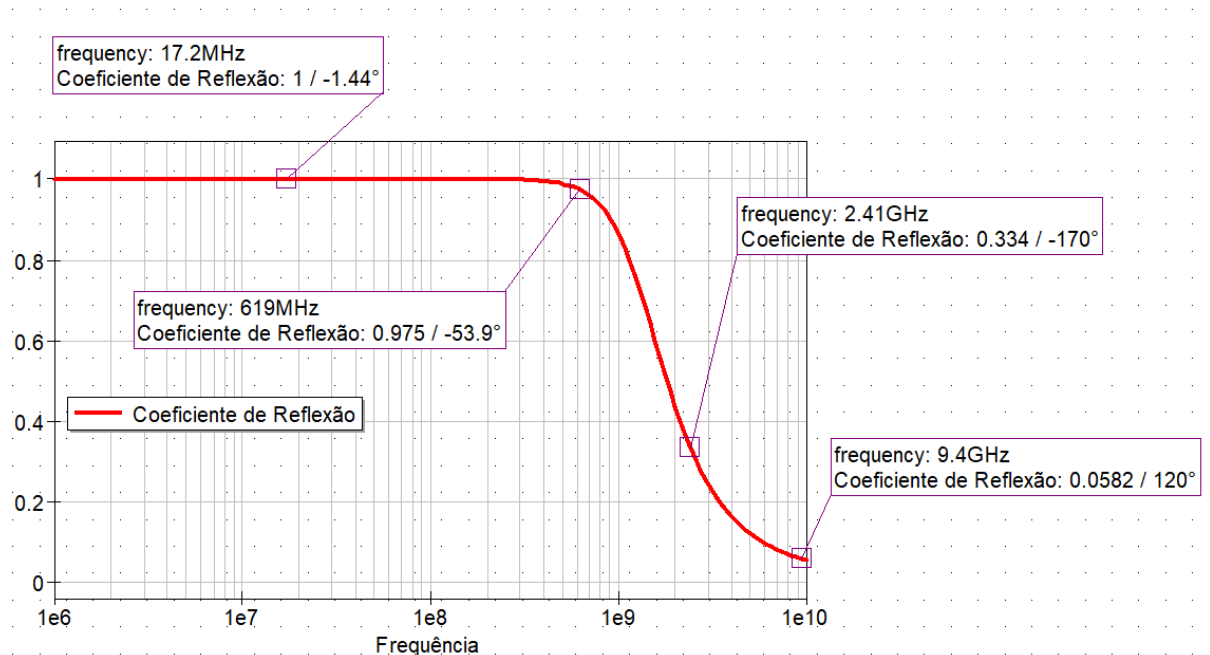


Figura 5 - Gráfico do coeficiente de reflexão pela frequência



• **Análise os resultados criticamente.**

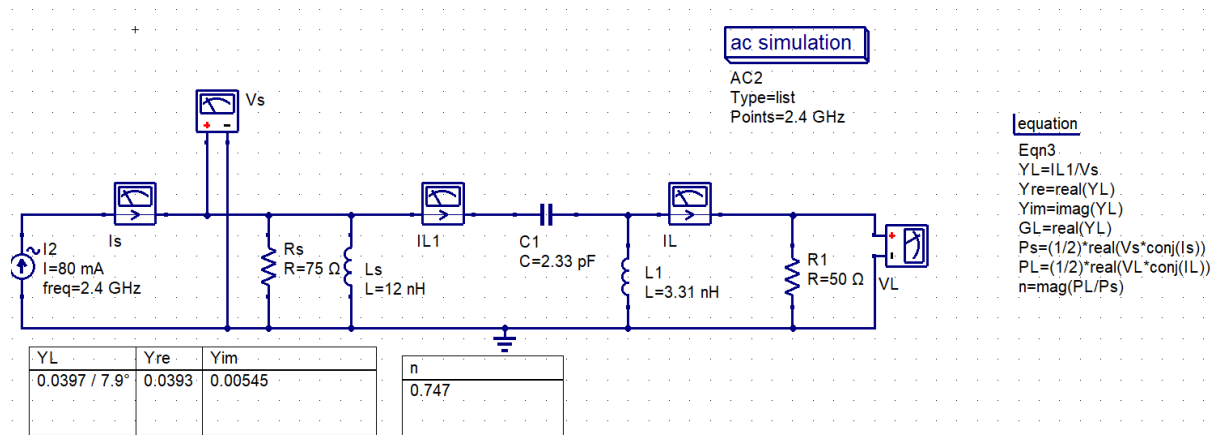
Como esperado da topologia passa altas, para frequências relativamente baixas a admitância é zero. Também é notável pelos gráficos que a admitância (tanto parte real quanto imaginária) varia muito com a frequência, o que torna esse adaptador de impedância de faixa estreita, por só atingir o objetivo na frequência de operação ou muito próximo dela.

Do coeficiente de reflexão podemos afirmar que para (relativamente) baixas frequências, há reflexão total sem inversão de fase, e a medida que frequência aumenta gera atraso de fase, e

a partir de 600MHz deixa de ter reflexão total, diminuindo para 33% na frequência de projeto e a 5% a partir de 10 GHz.

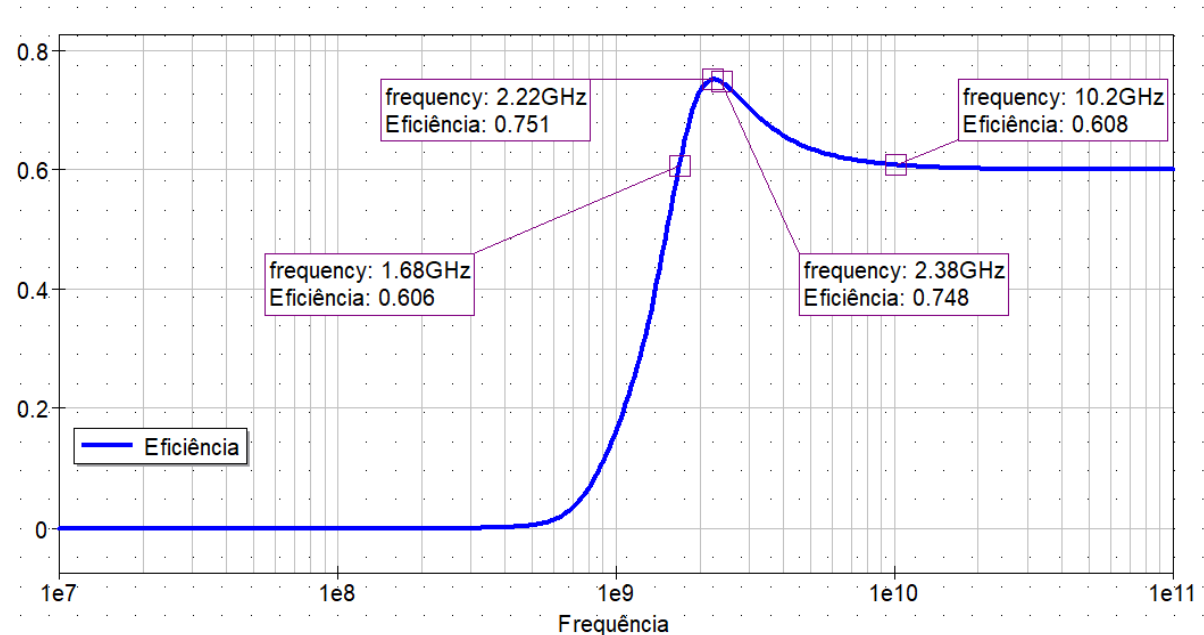
**4) Inclua a rede de adaptação no problema inicial, simule e mostre que o resultado atende às especificações de projeto.**

Figura 6 - Simulação da rede de adaptação com a fonte de entrada



Podemos ver que para a frequência de projeto a impedância vista pela entrada do circuito continua sendo (aproximadamente) igual a YL calculada na parte teórica e que a eficiência é de 75%

Figura 7 - Gráfico da eficiência pela frequência



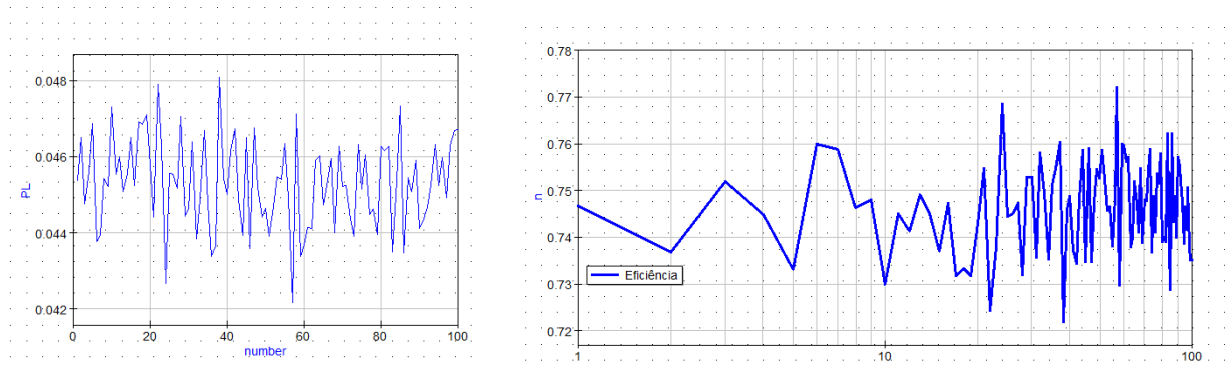
Analisando a eficiência pela frequência, nota-se que o pico ocorre perto da frequência de projeto, em 2,22GHz, que em baixas frequências a eficiência é zero, a partir de centenas de megahertz (mesma faixa que a parte real da admitância YL deixa de ser zero) tem um aumento, até que em 1,7 GHz alcança 60% de eficiência. Outro ponto notável é que a partir das dezenas de gigahertz a eficiência fica fixa em 60%.

**5) Inclua tolerância de 5% nos componentes da rede de adaptação usando a função tol(x,v,d) e faça simulação de Monte Carlo (100 rodadas). Salve em um arquivo os pontos referentes à potência na carga e à eficiência de transferência de potência. Utilizando a linguagem de programação sua preferência (ou pergunte ao chatGPT), implemente um script**

para encontrar parâmetros estatísticos (média, desvio padrão, variância, etc.) e para plotar histogramas dos resultados obtidos. Analise os resultados criticamente.

Realizando a simulação de Monte Carlo com 100 rodadas obteve-se os seguintes resultados:

Figura 8 - Resultados da simulação de Monte Carlo

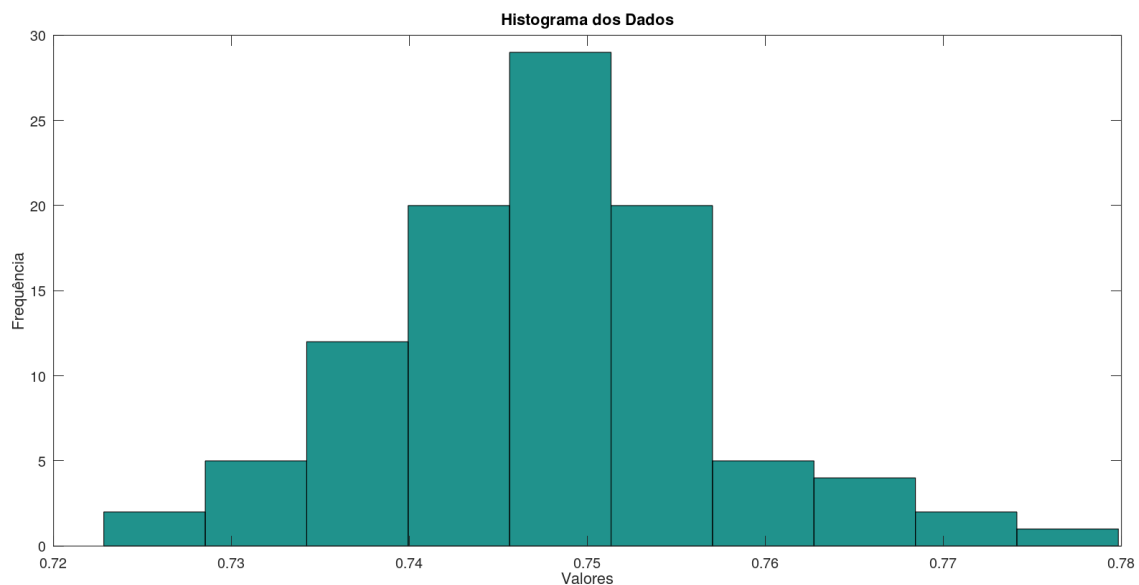


Usando octave, que tem de forma nativa funções para analisar estatisticamente dados (e com ajuda do chatGPT) analisou-se o resultado da simulação de Monte Carlo:

Para a eficiência foi encontrado os seguintes resultados:

Média: 0.747621
Desvio Padrão: 0.009738
Variância: 0.000095

Figura 9 - Histograma dos resultados de eficiência

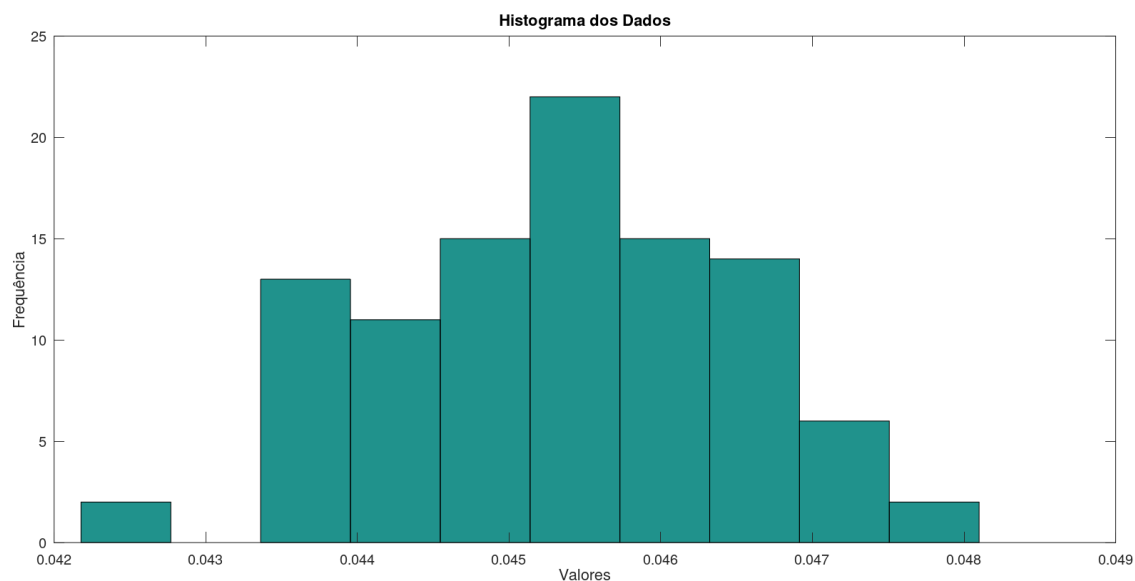


Para a potência foi encontrado os seguintes resultados:

Média: 0.045325
Desvio Padrão: 0.001171
Variância: 0.000001



Figura 10 - Histograma dos resultados de potência



Nota-se que a distribuição se assemelha a uma gaussiana, e com variância/desvio padrão muito baixos, o que mostra a baixa variabilidade da eficiência e da potência entregue à carga com leves mudanças na rede de adaptação.

#### 6) . Faça uma análise crítica do trabalho completo

Podemos inferir que o resultado simulado convergiu para os resultados teóricos (aproximadamente, porque foram feitas aproximações numéricas no desenvolvimento) para a frequência de projeto e valores muito próximos, mas diverge para frequências diferentes, o que mostra uma faixa de operação estreita. Além disso, dos resultados estatísticos pode-se concluir que a eficiência e a potência entregue a fonte ficam muito próximas dos valores nominais, mesmo com variações de 5% nos valores dos componentes da rede de adaptação, que normalmente é a tolerância dos fabricantes de componentes, mostrando consistência na rede de adaptação para manter as especificações de projeto.

#### 7) Descreva o que você aprendeu com este trabalho, deixando claro os pontos fortes e também aqueles que requerem aperfeiçoamento, além de refletir sobre qual estratégia você adotará para a necessidade de aperfeiçoamento detectada

Apreendi os passos necessários para projetar uma rede de adaptação para uma resistência a uma impedância (ou admitância) qualquer usando uma rede L e qual a robustez da rede em relação a variação de frequência, tendo em vista que a impedância de componentes reativos variam com a frequência. Também a análise estatística a partir de simulações envolvendo variabilidades no valor nominal dos componentes, que poderiam ser a tolerância do fabricante, algo que deve ser levado em conta em qualquer projeto de circuitos eletrônicos.

Alguns pontos sobre o assunto (não necessariamente deste lab) que ainda não estão 100% claros é a adaptação de uma impedância que não seja puramente resistiva para outra que também não é puramente resistiva, porque envolve alguns passos a mais, e também fazer adaptação de impedância com outras redes além da L como a pi ou T.