

# Relatório Experimento 03:

Bruno C. Messias

## 1 Introdução

Este relatório é referente ao experimento 03 da matéria EEL7319(Circuitos RF), sobre o tema de Adaptatação de Impedâncias, que possui o objetivo de avaliar o comportamento dos componentes em aplicações de RF. Primeiramente foi calculado os valores teóricos para a adaptção de uma fonte proposta com um eficiência de potência definida, utilizando os conceitos da referência[1]. Esse modelo foi testado primeiramente no Software *SimSmith* e implementado no *QUCS* para uma análise mais detalhada. Foi analisado a resposta em frequência da rede de adaptação em ganho e fase. Também foi analisado o potência em cada parte de circuito proposto

## 2 Parte Experimental

### 2.1 Rede de Adaptação

#### 2.1.1 Requisitos do Projeto

Para o projeto inicilamente encontramos a Impedância relativa para a eficiencia requerida de 75% para uma impedância de:

$$Z_S = (8.5 - j15)\Omega$$

Sabemos que a eficiência é definida pela equação 1a onde  $P$  pode ser definida pela equação 1b.

$$\eta = \frac{P_L}{P_S} \quad (1a)$$

$$P = 1/2 \Re\{VI^*\} \quad (1b)$$

Se utilizando das Equações 1 chegamos na seguinte expressão, que foi deduzida na seção de Questões deste relatório, na Expressão 6.

$$\eta = \frac{\Re\{Y_x\}}{\Re\{Y_x + Y_s\}} \quad \text{Onde : } Z = \frac{1}{Y}$$

Definimos assim um  $Z_x$  da qual será nossa referência para a adaptação da impedância de  $50 \Omega$ . Substituindo os valores obtemos:

$$Z_x = (8.796 + j5.223)\Omega$$

#### 2.1.2 Projeto

Para definirmos a topologia da rede de adaptação, utilizamos as esqações encontradas na referência[1]. Da qual fornece as condições de existência, no nosso caso como temos:

$$R_G < R_L \text{ e } |X_G| < \sqrt{R_G(R_L - R_G)}$$

Para esta condição foi escolhida a topologia representada pela Figura 1.

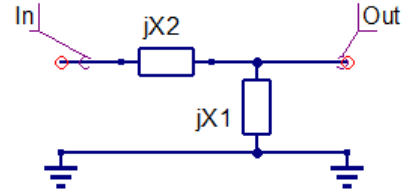


Figura 1: Topologia utilizada para o projeto da rede

Seguindo o livro[1]. Para esta topologia temos as equações representadas nas Equações 2.

$$X_1 = \frac{X_L \pm R_L Q}{\frac{R_L}{R_G} - 1} \quad (2a)$$

$$X_2 = -(X_G \pm R_G Q) \quad (2b)$$

$$Q = \sqrt{\frac{R_L}{R_G} - 1 + \frac{X_L^2}{R_G R_L}} \quad (2c)$$

Assim obtemos os seguintes valores:

$$X_1 = X_L = 23.06 \text{ e } X_2 = X_C = -24.22$$

Portanto assim podemos determinar os componentes pelas seguintes equações:

$$L = \frac{X_L}{2\pi f_0} \quad (3a)$$

$$C = \frac{1}{2\pi f_0 |X_C|} \quad (3b)$$

Para  $f_0 = 5GHz$  temos os seguintes valores da rede de adaptação representado pela Figura 2.

$$L = 734.02pH \text{ e } C = 1.31pF$$

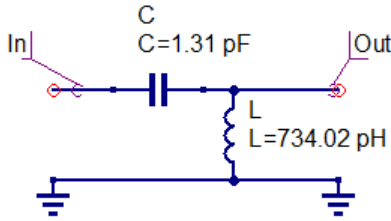


Figura 2: Rede a ser utilizada para a adaptação

### 2.1.3 Análise da Rede

Para testar a veracidade dos valores obtidos, foi utilizado como apoio o Software *SimSmith* onde podemos observar o circuito simulado na Figura 3 e o resultado na Carta de Smith na Figura 4.

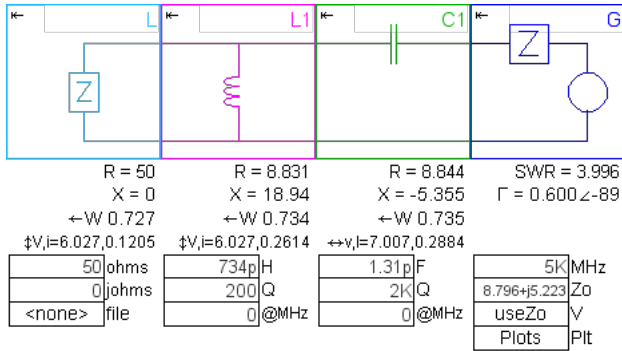


Figura 3: Circuito Simulado no SimSmith

Podemos observar que o caminho traçado se aproxima do requerido para o projeto com um valor de impedância:

$$Z_x = (8.90 - j5.41)\Omega$$

Como mais uma verificação, foi observado a impedância vista da referência, simulado no simulador *Qucs*, representado na Figura 5.

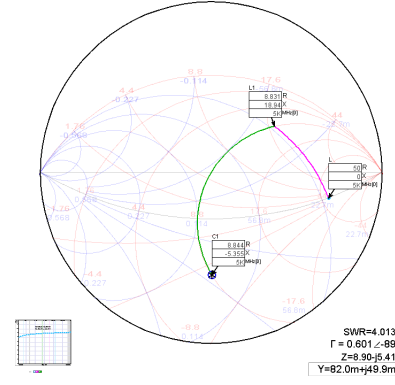


Figura 4: Resultado do circuito simulado no SimSmith

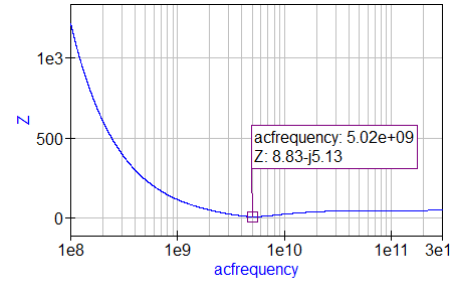


Figura 5: Impedância da rede de adaptação

Onde podemos observar que a sua impedância em  $5GHz$  se equivale a:

$$Z_x = (8.83 - j5.13)\Omega$$

Da qual está próximo do valor projetado anteriormente.

### 2.1.4 Resposta em frequência

Para as seguintes análises foi simulado o modelo proposto no Software *Qucs*, para assim pudermos determinar sua resposta em frequência representados nas Figura 6.

Onde podemos observar um filtro passa-altas com sua frequência de corte próxima de  $3.31GHz$ .

### 2.1.5 Utilização da Rede

Para averiguarmos a utilização da rede de adaptação, iremos simular o circuito sem a adaptação primeiramente, forçando  $Z_L$  para um rendimento de 75%, afim de determinarmos os seguintes parâmetros:

- Potência da Fonte( $P_s$ )
- Potência Disponível( $P_d$ )
- Potência na Carga( $P_l$ )

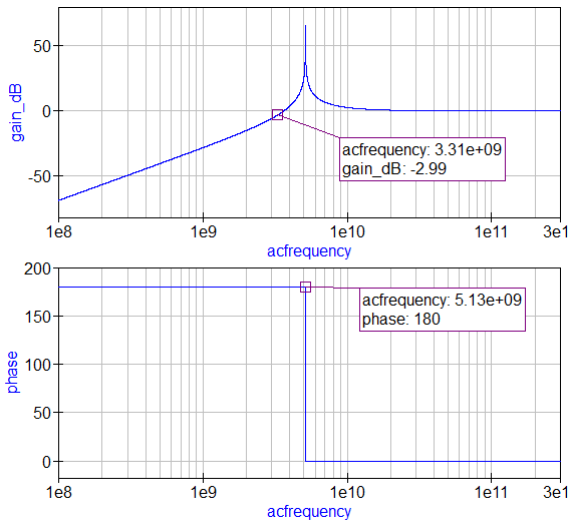


Figura 6: Resposta em frequência da Rede

- Eficiência(n)

Temos eles representados na Figura7, onde observamos o seu rendimento(n) de 75%.

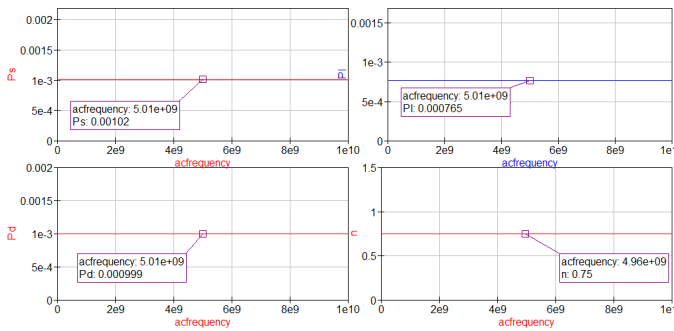


Figura 7: Parâmetros de potência obtidos sem Match

Para uma análise de quanto uma variação nos componentes pode acarretar na variação da potência e sua eficiência, foi analisado de duas formas: fixando o valor ótimo da parte real de  $Z_L$  e variando sua parte imaginária representado na Figura 8 e variando sua parte real com a parte imaginária fixa no valor ótimo, representado na Figura 9.

Podemos observar que ao variar a parte real temos uma maior variação de valores seguindo de acordo com a Equação 6, onde o rendimento não depende das componentes imaginárias do circuito.

Incluindo a rede de adaptação temos as seguintes curvas de potência na Figura 10.

Onde podemos analisar que o rendimento manteve-se como esperado do projeto da rede de

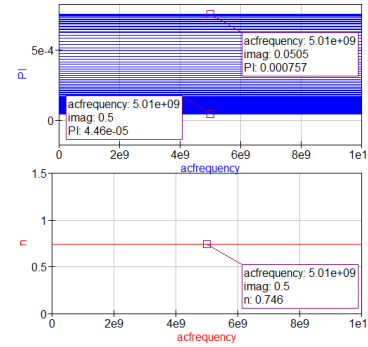


Figura 8: Variação com a varredura da parte imaginária

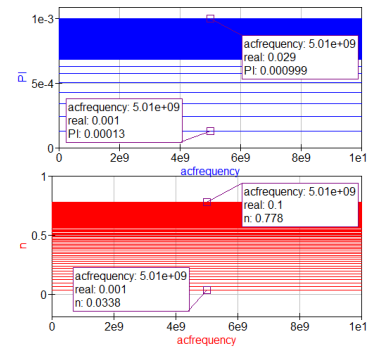


Figura 9: Variação com a varredura da parte real

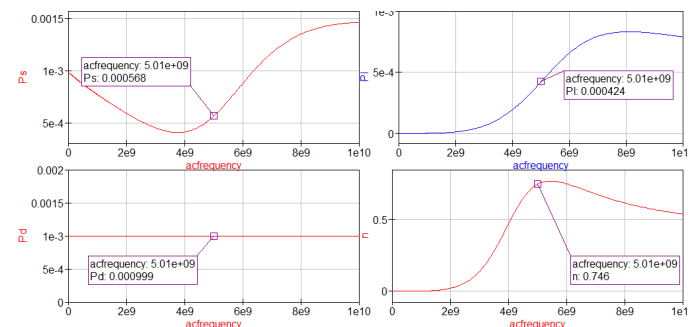


Figura 10: Parâmetros de potência obtidos com Match

adaptação.

Fazendo a mesma análise feito anteriormente, fixamos sua parte real e fazemos uma varredura na parte imaginária, representado na Figura 11 e fixando a parte imaginária na Figura 12.

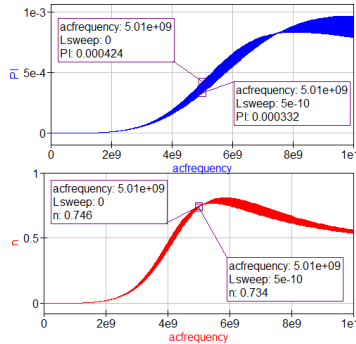


Figura 11: Variação com a varredura da parte complexa, considerando a rede

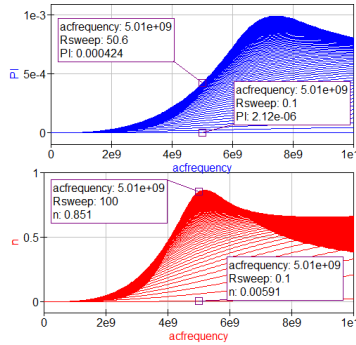


Figura 12: Variação com a varredura da parte real, considerando a rede

Vemos como a rede de adaptação é bem robusta para a variação da parte imaginária onde o rendimento se manteve sem variação significativa, pois novamente segue de acordo com a Expressão 6, da qual não depende de elementos reativos em sua impedância, no entanto ele continua sendo bem suscetível à variações da parte real, como esperado.

## 2.2 Componentes Comerciais

### 2.2.1 Modelos Comercias

Nesta seção iremos substituir os componentes por modelos reais e analisar seu funcionamento quanto as tolerâncias.

Para o capacitor foi escolhido o componente C0402C0G1C1R5C020BC de valor  $1.5pF$  da fabricante *TDK*®, que pode ser representado pelo modelo representado na Figura 13, com tolerância de  $\pm 0.25pF$ .

E para o indutor, foi escolhido o componente MHQ0402PSA0N7BT000 de valor  $0.7nH$ , também da mesma fabricante anterior, onde seu modelo pode ser representado pela Figura 14, onde possui um tolerância de  $\pm 0.1nH$ .

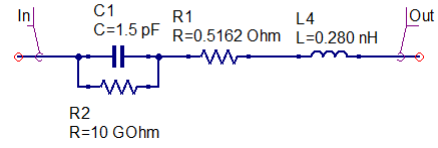


Figura 13: Modelo comercial do capacitor utilizado

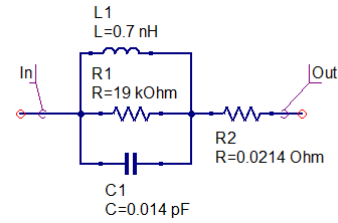


Figura 14: Modelo comercial do indutor utilizado

### 2.2.2 Verificação da Rede

Foi verificado com os arquivos Touchstone oferecidos pela *TDK*® no software *SimSmith* quanto a sua discrepância ao ser comparado com o modelo teórico, com seu resultado representado a Figura 15.

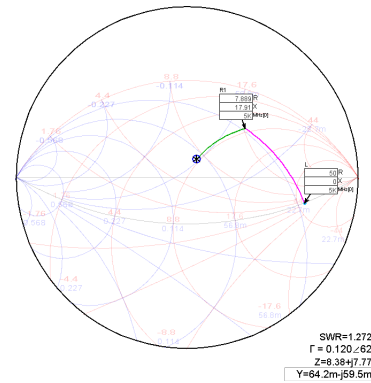


Figura 15: Ábaco de Smith para os modelos comerciais

Podemos observar que a rede faz a transformação par um valor de  $Z = 8.38 + j7.77$  que está diferente do requerido por conta das imperfeições introduzidas.

Como uma segunda aproximação foi simulado no software *QUCS* a impedância do modelo representado na Figura 16.

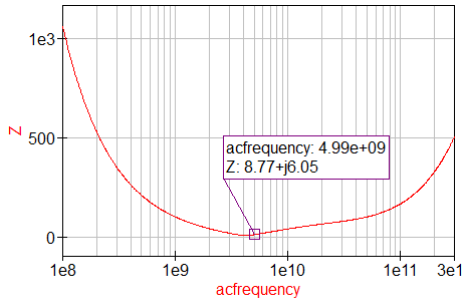


Figura 16: Impedância da Rede com valores Comerciais

Onde chegamos a um valor de  $Z = 8.77 + j6.05$  próximo do teórico proposto.

### 2.2.3 Resposta em frequência do modelo

Também foi analisado a resposta em frequência da rede onde podemos observar na Figura 17.

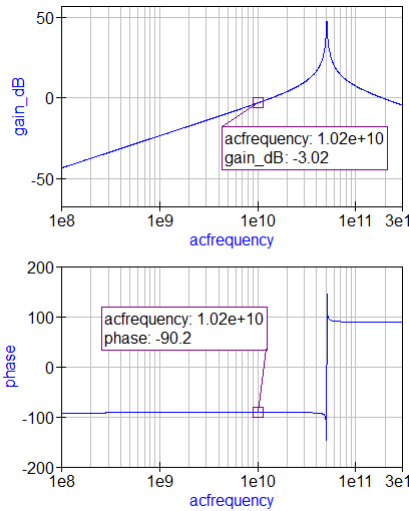


Figura 17: Resposta em frequência do modelo comercial

Temos que o circuito de match se comporta como um passa-altas, com frequência de corte próximo de  $10.2GHz$ .

### 2.2.4 Análise de potência

Foi analisado a curvas de potencia do circuito com os modelos comerciais que estão representado no Figura 18.

Onde podemos observar sua eficiencia de  $\eta = 68.5\%$  que difere do proposto anteriormente, por conta das imperfeições introduzidas.

Também como feito, como no modelo teórico, variarmos a parte real e fixando a parte imaginária

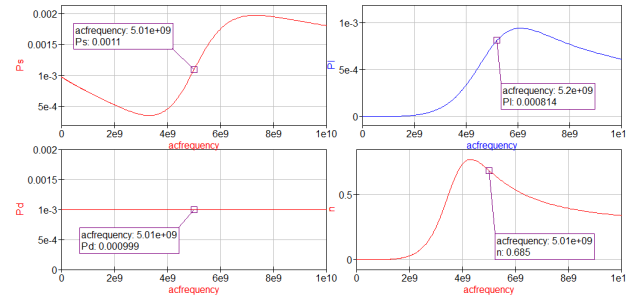


Figura 18: Análise de Potência do modelo comercial

de  $Z_L$  representada na Figura 19 e fixando a parte real e variando a imaginária na Figura 20

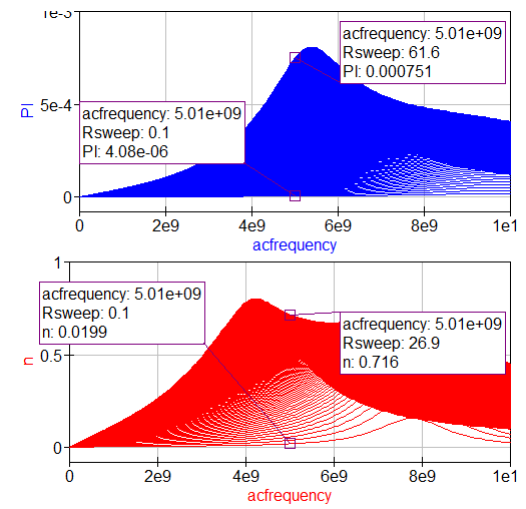


Figura 19: Varredura na Parte Real

Onde podemos comprovar, novamente o analisado anteriormente, pois a variação da parte imaginária não altera o resultado significamente, enquanto a parte real consegue geram grande variações na potência de carga e seu rendimento.

### 2.2.5 Efeito das tolerância

Utilizando a simulação de Monte Carlo para efeito de observação das tolerâncias fornecidas pelo fabricante, temos as curvas de potência representados na Figura 21

Temos a seguir os histogramas das simulações de potência da fonte, Figura 22, da potência na carga, Figura 23 e da eficiência na Figura 24, baseados na simulação de Monte Carlo anterior, desenvolvidos utilizando a linguagem *Python* como apoio.

Podemos observar que mesmo incluindo as tolerâncias dos elementos da rede de adaptação, o

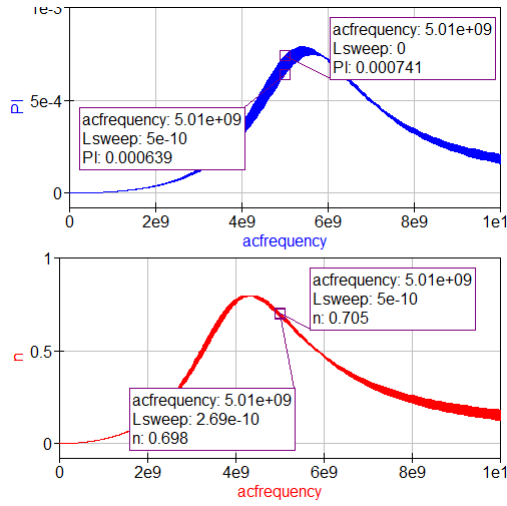


Figura 20: Varredura na Parte Imaginária

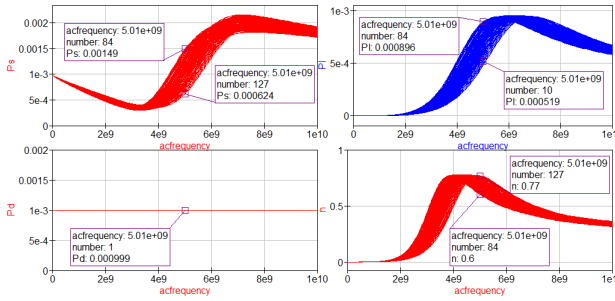


Figura 21: Inclusão das tolerância especificadas

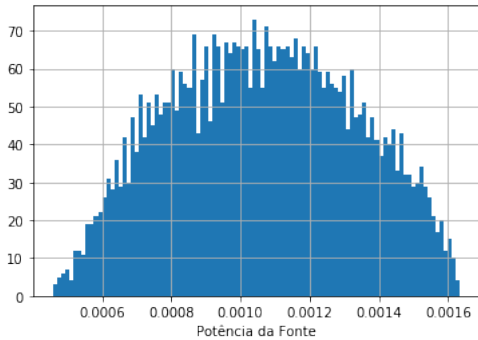


Figura 22: Histograma da Potência da Fonte

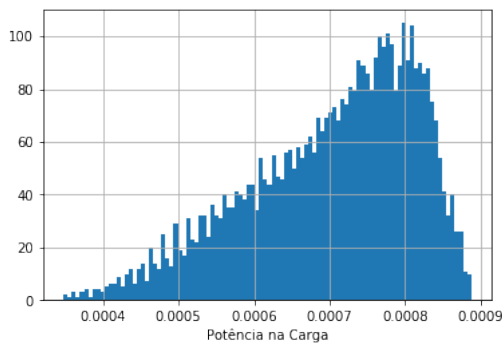


Figura 23: Histograma da Potência na Carga

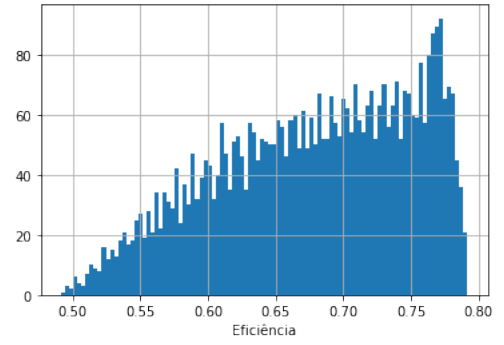


Figura 24: Histograma da Eficiência

projeto manteve sua eficiência próxima do proposto, com maior incidência ente 75% e 80%.

### 3 Sugestão de Melhoria

Visto os problemas causados pela adição das não-idealidades dos componentes comerciais, a seguir proponho um modelo que possa aumentar a robustez do projeto contra essas variações.

Como sugestão, proponho o uso de duas redes L em cascata como substituição, utilizando o menor Q possível para pudermos analisar seu efeito, toda a documentação de como projetar a rede em cascata está na seção de Questões.

Para o desenvolvimento da rede em cascata, criamos uma impedância virtual que será o terceiro grau de liberdade, segundo o Livro [1], o maior R intermediário é encontrado seguindo a Equação, considerando um fator Q mínimo:

$$R = \sqrt{R_G R_L}$$

Sabendo que  $Z_G = 8.796 + j5.223$  e  $Z_L = 50$ , temos que  $R = 20.97\Omega$

Temos então a seguinte rede, desenvolvida como na seção de Questões, representada na Figura 25.

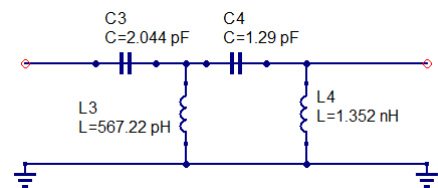


Figura 25: Rede L em cascata desenvolvida

A partir desta topologia escolhemos componentes comerciais para analisar o efeito das não-idealidades. Foram escolhidos compeonentes

da Fabricante *TDK*® com as seguintes características:

- Capacitor de  $2pF \pm 0.25pF$ ;  
→Modelo: C0402C0G1C020C020BC
- Capacitor de  $1.5pF \pm 0.25pF$ ;  
→Modelo: C0402C0G1C1R5C020BC
- Indutor de  $0.5nH \pm 0.1nH$ ;  
→Modelo: MHQ0402PSA0N5BT000
- Indutor de  $1.4nH \pm 0.1nH$ ;  
→Modelo: MHQ0402PSA1N4BT000

Temos a seguir os modelos nas Figuras 26, 27, 28 e 29.

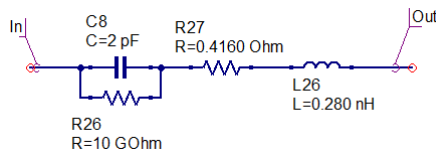


Figura 26: Modelo do Capacitor 2pF

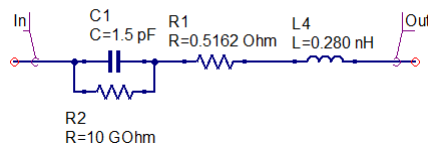


Figura 27: Modelo do Capacitor 1.5pF

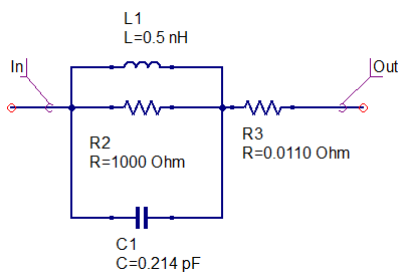


Figura 28: Modelo do Indutor 0.5nH

A seguir a análise de potências, sem incluir as tolerâncias num primeiro momento, na Figura 30

Observamos a eficiência próxima de 70.6%, já melhor que a rede L original, por conta da inserção dos componentes comerciais e suas não-idealidades.

Temos a simulação, considernado o efeito das tolerâncias na Figura 31

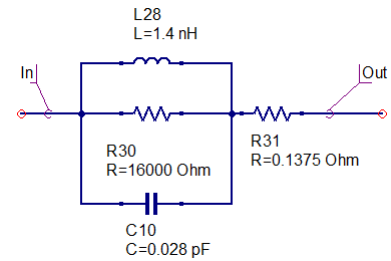


Figura 29: Modelo do Indutor 1.4nH

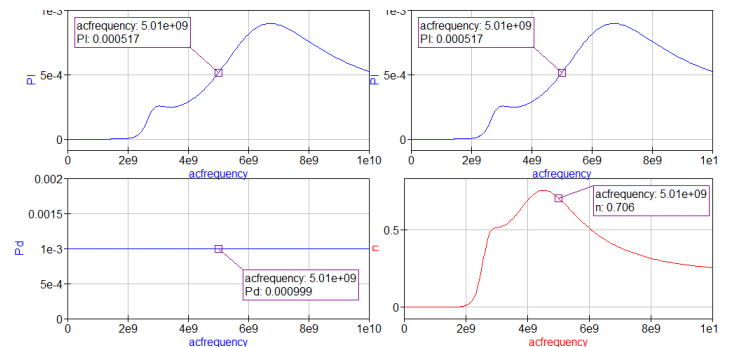


Figura 30: Análise de Potência na Rede em cascata

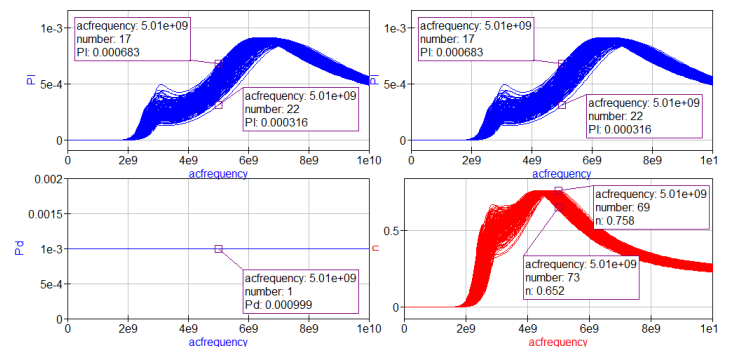


Figura 31: Análise de Potência na Rede em cascata considerando tolerâncias



Já observamos uma melhora significativa de quando comparado com a rede L originalmente projetada, pois em consideração a eficiência, temos uma variação de 10.6% e anteriormente, na rede L original, uma variação de 17.6%, lembramos que o projeto foi feito para o menor Q possível de ser utilizado, caso utilizássemos um Q maior, observaríamos uma melhora ainda maior em sua robustez quanto as tolerâncias dos componentes.

## 4 Questões

### 4.1 Questão 1:

Para o circuito da figura do experimento, encontre uma expressão para a eficiência de transferência de potência entre fonte e carga, definida como:

$$\eta = \frac{P_L}{P_S}$$

Onde  $P_L$  é a potência dissipada pela carga e  $P_S$  é a potência total produzida pela fonte.

#### Resolução:

Sabemos que  $P$  é definido pela Equação 1b, portanto substituindo na Equação 1a temos:

$$\eta = \frac{\Re \{V_x I_x^*\}}{\Re \{V_s I_s^*\}} \quad (4)$$

Temos a Figura 32 do circuito a ser analisado.

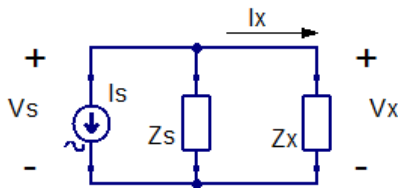


Figura 32: Modelo do circuito a ser analisado para a potência teórica

Sabemos que  $V_x = V_s$  e que  $Y = 1/Z$  e temos as Equações 5.

$$V_x = \frac{I_x}{Y_x} \quad (5a)$$

$$V_s = \frac{I_s}{Y_x + Y_s} \quad (5b)$$

Igualando as Equações 5a e 5b, temos que:

$$I_x = I_s \frac{Y_x}{Y_x + Y_s}$$

Substituindo na Equação 4, temos que:

$$\eta = \frac{\Re \{Y_x\}}{\Re \{Y_x + Y_s\}} \quad (6)$$

### 4.2 Questão 2:

Para o circuito da figura do experimento, encontre uma expressão para a eficiência de transferência de potência entre fonte e a carga, definida como:

$$\eta = \frac{P_L}{P_{AVS}}$$

Onde  $P_{AVS}$  é a potência disponível da fonte.

#### Resolução:

Para determinarmos  $P_{AVS}$  utilizamos a definição da Expressão 1b, para a condição de que  $Z_x = Z_s^*$ , onde temos o circuito a ser analisado na Figura 32. Temos as seguintes expressões:

$$V_s = \frac{I_s}{Y_s + Y_x} \quad (7a)$$

$$I_x = \frac{I_s Y_s}{Y_x + Y_s} \quad (7b)$$

Utilizando estas definições encontramos que :

$$P_{AVS} = \frac{I_s^2}{8 \Re \{Y_s\}} \quad (8)$$

Inserindo a Expressão 34 na definição de  $\eta$ , temos que:

$$\eta = \frac{4 \Re \{Y_x\} \Re \{Y_s\}}{\|Y_s + Y_x\|} \quad (9)$$

### 4.3 Questão 3:

Encontre uma expressão para a relação entre a impedância da carga e a impedância da fonte para um determinado valor de eficiência de transferência de potência e de potência na carga, considerando as duas definições de eficiência, de acordo com os itens 1 e 2 para o caso onde ambas as impedâncias são complexas.

#### Resolução:

Temos as seguir os dois gráficos, utilizando as equações encontradas pelas questões anteriores. A definição  $\eta = \frac{P_L}{P_S}$  representada na Figura 33 e a definição  $\eta = \frac{P_L}{P_{AVS}}$  Pela Figura 34, para obser-



varmos como as eficiências se comportam com a variação entre as impedâncias.

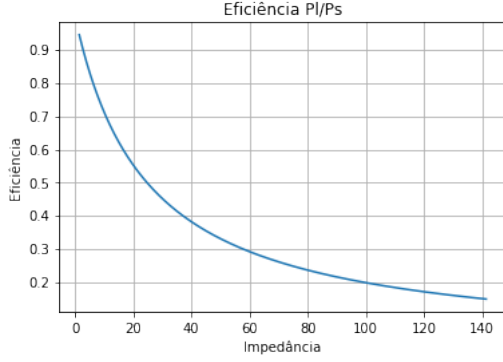


Figura 33: Eficiência Definida por PI/Ps

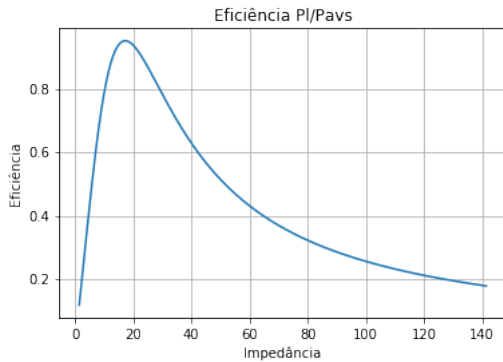


Figura 34: Eficiência Definida por PI/Pavs

#### 4.4 Questão 4:

Substitua a rede L utilizada no experimento por uma rede T, de modo a ter uma banda passante de 10%.

##### Resolução:

Para o projeto da rede T vamos seguir a metodologia do livro [1] onde iremos projetar duas redes L em cascata e combinar elas para um rede II e então transformar em uma rede T.

Para projetar duas redes L em cascata, primeiramente definimos uma impedância intermediária que define a banda de passagem de 10%, para isso definimos  $Q = \frac{f_0}{BW}$ , onde BW é definido como  $10\%f_0$ , para  $f_0 = 5GHz$ , temos então definido  $Q = 10$ .

Para um  $Z_n = R + jX$  intermediário, temos que R é definido pela Expressão 10, retirado do livro [1].

$$R = \frac{R_{max}}{Q^2 + 1} \quad \text{Onde : } R_{max} = (R_G, R_L) \quad (10)$$

Sabemos que  $Z_G = 5\Omega$  e  $Z_L = 8.796 + j5.223\Omega$ , com essas informações e a Equação 10, temos  $R = 0.49\Omega$ , como a parte imaginária é arbitrária escolhemos  $X = 0$  e logo temos  $Z = 0.49$ .

##### 4.4.1 Projeto Primeira rede L

Temos o projeto da primeira rede L considerando  $Z_L = 50\Omega$  e  $Z_G = 0.49$ , Como  $R_G < R_L$ , utilizamos Equações do livro [1].

$$X_1 = \frac{X_G \pm R_G Q}{\frac{R_G}{R_L} - 1} \quad (11a)$$

$$X_4 = -(X_L \pm R_L Q) \quad (11b)$$

$$Q = \sqrt{\frac{R_G}{R_L} - 1 + \frac{X_G^2}{R_G R_L}} \quad (11c)$$

Com as Equações 11, definimos:

$$X_1 = 2.812 \text{ e } X_4 = -2.36$$

##### 4.4.2 Projeto Segunda rede L

Temos o projeto considerando  $Z_L = 0.49$  e  $Z_G = 8.796 + j5.223$ , Como  $R_G > R_L$ , utilizamos as Equações 2 utilizadas anteriormente.

Utilizando esses dados e as Expressões 2, temos os seguintes resultados:

$$X_3 = 4.97 \text{ e } X_5 = -4.925$$

##### 4.4.3 Projeto Rede T

Temos então que  $X_2 = X_4 + X_5 = -7.285$ , para uma rede II, para converter para uma rede T, utilizamos as Equações 12, retiradas do livro [1], para a topologia representada pela Figura 35.

$$Z_a = \frac{Z_2 Z_3}{U} \quad (12a)$$

$$Z_b = \frac{Z_3 Z_1}{U} \quad (12b)$$

$$Z_c = \frac{Z_1 Z_2}{U} \quad (12c)$$

$$U = Z_1 + Z_2 + Z_3 \quad (12d)$$

Como temos que  $Z_1 = jX_1$  e  $Z_2 = jX_2$  e  $Z_3 = jX_4$ , chegamos nos valores de  $Z_a = j72.85$ ,

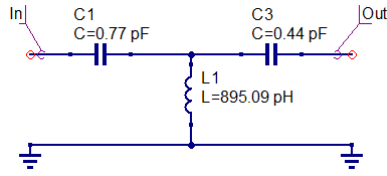


Figura 35: Topologia da rede T

$Z_b = -j28.12$  e  $Z_c = j41.22$ , onde temos o circuito composto por componentes representado na Figura 36.

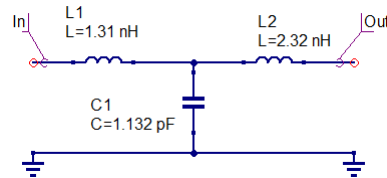


Figura 36: Esquemático da Rede T

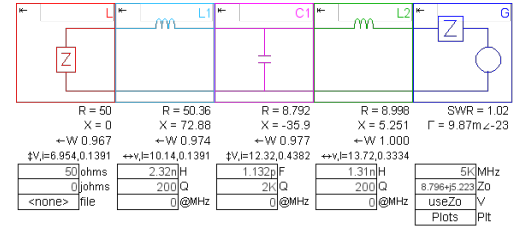


Figura 38: Circuito utilizado no Software SimSmith

#### 4.4.4 Análise de Frequência da rede T

Temos a seguir as análises de frequência da rede T na Figura 37.

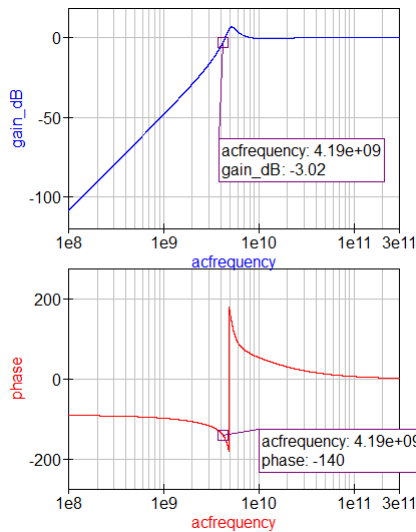


Figura 37: Resposta em frequência da rede T

Onde podemos observar que a rede se comporta como um filtro passa-baixas com um frequência de corte próximo de  $f_c = 4.19GHz$ .

#### 4.4.5 Análise de funcionamento da rede

Temos a seguir a sua resposta de casamento de impedância gerados pelo software *SimSmith*, utilizando o circuito na Figura 38 e sua carta de smith na Figura 39.

Vemos que sua transformação de impedância termina no ponto  $Z = 9 + j5.25\Omega$  que está próximo do esperado de  $Z = 8.796 + j5.223\Omega$ .

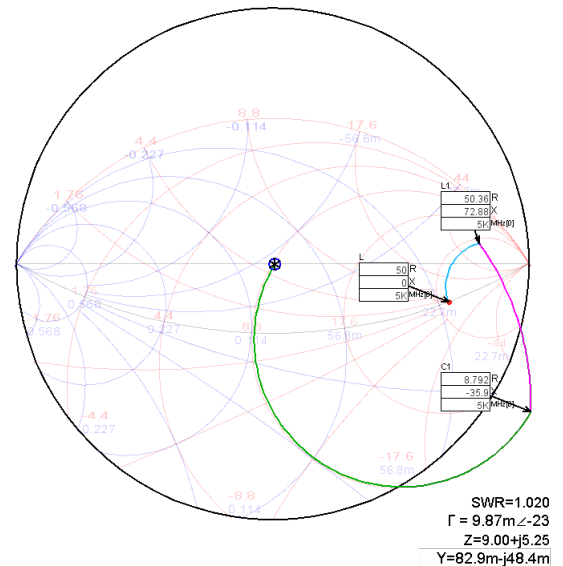


Figura 39: Ábaco de Smith gerado

Como uma segunda análise temos a seguir a análise de impedância simulada no software *QUCS*, representada na Figura 40

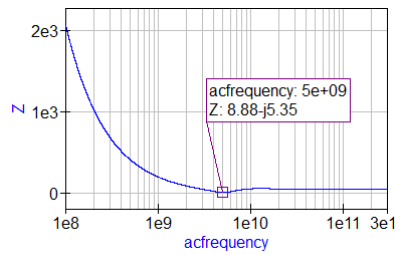


Figura 40: Impedância da rede T simulada

Onde podemos observar que o circuito aproxima para um  $Z = 8.88 - j5.35\Omega$ , bem próximo do proposto.

#### 4.4.6 Análise de potências da rede T

Temos a seguir uma análise de potência substituindo a rede L anteriormente projetada pela rede T proposta nessa seção, representadas na Figura 41.

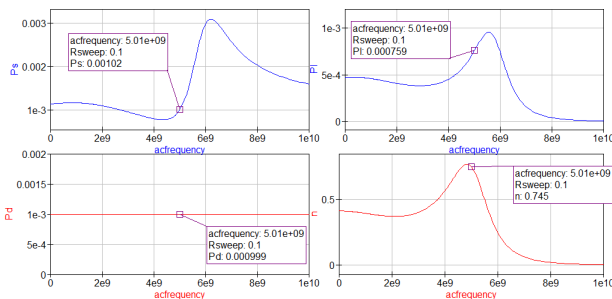


Figura 41: Análise de Potências da rede T

Onde podemos observar que temos sua eficiência de 74.5% como era esperado pelo projeto.

Analizamos seguindo as mesma etapas feitas anteriormente para a rede L, logo temos também suas varreduras na parte imaginária e na parte real, representadas pelas Figuras 42 e 43

Como conclusão, a rede T mantém suas mesmas características quando comparadas com a rede L, no entanto como temos um maior grau de liberdade podemos dimensionar um circuito mais seletivo em questão de transferência de potência, que o torna mais robusto em variações dos componentes.

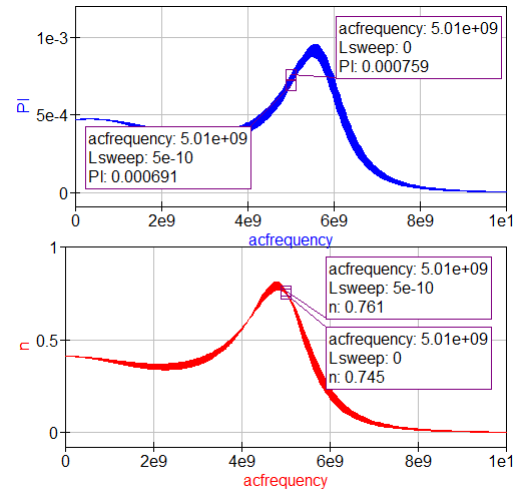


Figura 42: Varredura na parte imaginária com a parte real fixa

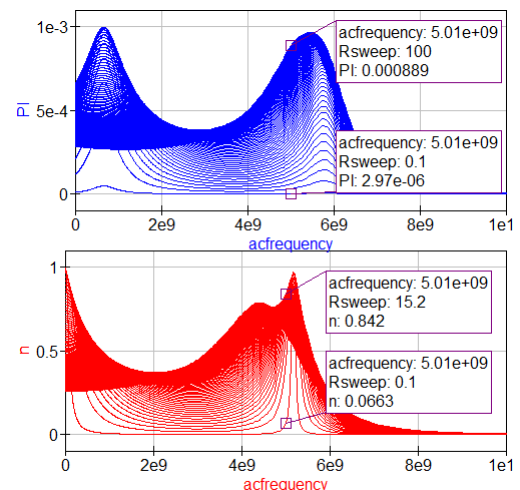


Figura 43: Varredura na parte real com a parte imaginária fixa

## 5 Conclusão

Em conclusão, este relatório tinha como objetivo, analisar todo o processo de casamento de impedâncias, considerando uma eficiência fixa e máxima transferência de potência.

Foi analisado e comprovado as equações de eficiência, quando a varreduras em componentes imaginários e reais, fornecendo um casamento e seu efeito no análise de potência.

Foi estudado a utilização de modelos dipolos no simulador *QUCS*, bem como a utilização de modelos comerciais e análise de possibilidade de utilização do projeto na realidade e como o efeito de tolerância pode afetar na resposta da rede de adaptação.

Foi sugerido melhorias para uma melhor robustez no projeto por conta das não-idealidades dos componentes reais e a utilização de diferentes redes de adaptação usando componentes discretos.

E também foi analisado as duas definições de eficiência e de como diferem quando levando em conta o projeto da rede.

## 6 Referências

### Referências

- [1] S. J. Orfanidis and J. O. Sophocles, “Electromagnetic Waves and Antennas,” *Media*, vol. 2, no. Rutgers U, pp. 313–321, 2003. [Online]. Available: <http://www.ece.rutgers.edu/orfanidi/ewa/>
- [2] J. J. Carr, “Impedance matching,” *Antenna Toolkit*, pp. 203–220, 2001.
- [3] M. Steer, *Microwave and RF design*, 2010, vol. 3.