



Universidade Federal de Santa Catarina – UFSC
Campus Universitário de Florianópolis
Curso de Engenharia Eletrônica
Disciplina EEL7319 - Circuitos RF
Professor Dr. Fernando Rangel de Sousa

Relatório 03

Adaptação de Impedâncias

Alunos: Guilherme Yuji Aoki Mat.: 15204942

Florianópolis, 27 de julho de 2020

1 Introdução

O objetivo desse experimento foi projetar e analisar um amplificador de potência, afim de trabalhar com a eficiência de transferência de energia igual a 75% para uma carga de 50Ω , nesse caso sendo representada por uma antena. Para chegar a tal objetivo, deve-se ter um estudo sobre adaptação de impedâncias.

Para projetar tal circuito, primeiramente deve ser feita uma análise teórica e posteriormente simulações utilizando o software Qucs para demonstrar os resultados obtidos.

A ultima etapa do trabalho foi analisar o projeto substituindo os componentes utilizados por componentes comerciais.

2 Valores Teóricos

Primeiramente devemos encontrar os resultados teóricos para comparar com os valores que serão obtidos das simulações. Tais cálculos estão representados a seguir.

A Figura 1 mostra o circuito a ser analisado nesse experimento

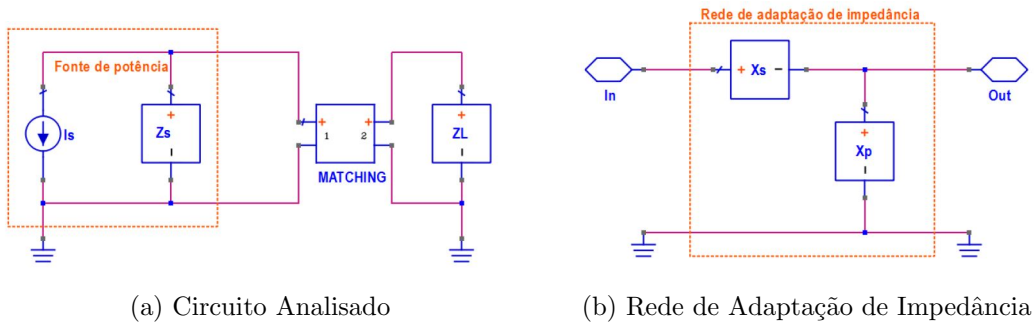


Figura 1: Circuito Analisado

Para encontrar os valores dos componentes X_s e X_p , devemos encontrar o valor no qual $Z_s = Z'_L$, onde Z'_L é a impedância resultante da rede de adaptação e da carga Z_L .

Assim, resumimos o circuito da Figura 1a no circuito da Figura 2

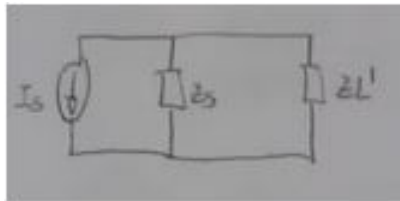


Figura 2: Circuito Teórico Analisado

Partindo da fórmula do rendimento, podemos obter os seguintes dados apresentados na Figura 3

Sabendo que

$$\eta = \frac{P_L}{P_S} = \frac{\frac{1}{2} \operatorname{Re}\{V_L I_L^*\}}{\frac{1}{2} \operatorname{Re}\{V_S I_S^*\}}$$

$$Y_S = \frac{1}{Z_S} = G_S + jB_S \quad \text{e} \quad Y_L = \frac{1}{Z_L} = G_L + jB_L$$

Temos:

$$I_L = I_S \cdot \frac{Y_L}{Y_L + Y_S} \quad \text{e} \quad V_S = V_L = \frac{I_L}{Y_L} = \frac{I_S \cdot Y_L}{Y_L + Y_S} = \frac{I_S}{Y_L + Y_S}$$

Assim,

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

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

Portanto,

$$\eta = \frac{\frac{1}{2} \frac{|I_S|^2}{|Y_L + Y_S|^2} \cdot G_L}{\frac{1}{2} \frac{|I_S|^2}{|Y_S + Y_L|^2} \cdot (G_L + G_S)} \Rightarrow \eta = \frac{G_L}{G_L + G_S}$$

Sabendo que $G_S = 8,5 - j15$!

$$Y_S = \frac{1}{Z_S} = \frac{1}{8,5 - j15} = \frac{8,5}{297,25} + j \frac{15}{297,25}$$

(a) Parte 01

Como se quer uma eficiência de 75% : $\eta = 0,75$

$$\frac{1}{\eta} = \frac{G_L + G_S}{G_L} = 1 + \frac{8,5}{297,25 \cdot G_L} \Rightarrow \frac{1}{\eta} - 1 = \frac{8,5}{297,25 \cdot G_L}$$

$$G_L = \frac{\eta}{1 - \eta} \cdot \frac{8,5}{297,25} \Rightarrow G_L = \frac{25,5}{297,25}$$

Assim, adotando que $B_L = -B_S$

$$Y_L = \frac{25,5}{297,25} - j \frac{15}{297,25}$$

$$Z_L = \frac{1}{Y_L} = 8,66 + j5,03$$

(b) Parte 02

Encontrado Z_L , devemos encontrar os valores de X_L e X_C

$$Z_L = X_C + \frac{50 X_L}{50 + X_L}$$

$$Z_L = \frac{1}{j\omega C} + \frac{50 j\omega L}{50 + j\omega L}$$

$$Z_L = \frac{-j}{\omega C} + \frac{50 j\omega L}{50 + j\omega L} \cdot \frac{50 - j\omega L}{50 - j\omega L} = \frac{-j}{\omega C} + \frac{2500 j\omega L + 50\omega^2 L^2}{2500 + \omega^2 L^2}$$

Sabendo que $Z_L = 8,66 + j5,03$ - e $\omega = 2\pi f = 2\pi \cdot 5 \cdot 10^3$

$$8,66 = \frac{50 \omega^2 L^2}{2500 + \omega^2 L^2} \Rightarrow 8,66 \omega^2 L^2 + 21650 = 50 \omega^2 L^2$$

$$41,34 \omega^2 L^2 = 21650 \Rightarrow L^2 = \frac{21650}{41,34 \omega^2} \Rightarrow L = \frac{1}{\omega} \sqrt{2218846}$$

$$L = 7,284 \cdot 10^{-10} \Rightarrow \boxed{L = 0,7284 \text{ nH}}$$

$$5,03 = \frac{-j}{\omega C} + \frac{2500 j\omega L}{2500 + \omega^2 L^2} = \frac{-j}{\omega C} + j8,32$$

$$\frac{1}{\omega C} = 13,83 \Rightarrow C = 2,30 \cdot 10^{-12} \Rightarrow \boxed{C = 2,30 \text{ pF}}$$

(c) Parte 03

Figura 3: Desenvolvimento para Encontrar os Valores do Capacitor e do Indutor

Como pode ser observado, os valores encontrados foram:

$$L = 0.7284 \text{ nH} \quad C = 2.30 \text{ pF}$$

O circuito se comporta como um Passa-Alta visto que o componente X_s é o capacitor. Caso fosse o indutor o seu comportamento seria de um Passa-Baixa.

Além disso, encontramos o valor de Z'_L :

$$Z'_L = 8.66 + j5.09$$

Encontrado isso, podemos encontrar o valor da Admitância:

$$Y = \frac{1}{Z} = \frac{1}{8.6366 + j5.02} = 0.08578 - j0.05046$$

A última etapa é encontrar o valor para I_S .

Para o cálculo do I_S , utilizou-se da característica da fonte P_{AVS} , no qual é a potência no componente Z'_L quando esse possui o valor do conjugado de Z_S .

Os cálculos podem ser observados na Figura 4

Handwritten derivation for finding I_S :

$$P_{AVS} = \frac{1}{2} \operatorname{Re} \{ v_L \cdot i_L^* \} \Big|_{Z_L' = Z_S^*} = \frac{1}{2} \operatorname{Re} \left\{ \frac{I_S}{Y_S + Y_L'} \left(\frac{I_S \cdot Y_L'}{Y_S + Y_L'} \right)^* \right\}$$

$$= \frac{1}{2} \cdot \frac{|I_S|^2}{|Y_S + Y_L|^2} \cdot \operatorname{Re} \{ Y_L'^* \}$$

Forçando $Z_L' = Z_S^*$

$$= \frac{1}{2} \cdot \frac{|I_S|^2}{|2Y_S|^2} \cdot \operatorname{Re} \{ Y_L'^* \} \Rightarrow 10^{-3} = \frac{1}{2} \cdot \frac{|I_S|^2}{|2Y_S|^2} \cdot \frac{8.5}{257.25}$$

$$\frac{8 \cdot \left(\frac{8.5}{257.25} \right)^2 \cdot 10^{-3}}{\frac{8.5}{257.25}} = |I_S|^2 \Rightarrow \boxed{I_S = 35.12 \text{ mA}}$$

Figura 4: Desenvolvimento para Encontrar o Valor de I_S

Como pode ser observado, o valor encontrado foi:

$$I_S = 15.12 \text{ mA}$$

Partindo dos valores obtidos do capacitor e do indutor, podemos encontrar a frequência de auto-ressonância:

$$X_C = X_L \quad \frac{1}{j\omega C} = j\omega L \quad f = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} = 3.88 \text{ GHz}$$

3 Atividades de Laboratório

3.1 Rede de Adaptação de Impedância

Primeiramente, podemos observar pelos dados obtidos que o Z_s apresenta propriedades capacitivas, visto que sua parte imaginária é negativa. Assim, para construir a rede de adaptação de

impedância, devemos desenvolver com propriedades indutivas, para isso, o indutor deve estar em paralelo com a carga, nesse caso, representado por R_L .

A Rede de Adaptação de Impedância desenvolvida, portanto, pode ser observada na Figura 5

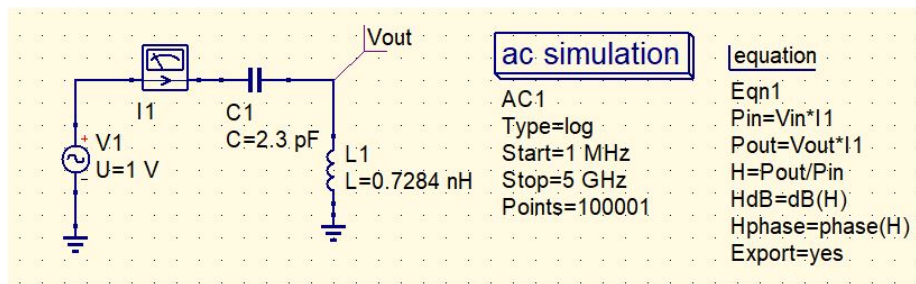


Figura 5: Circuito Desenvolvido para a Rede de Adaptação de Impedância

Ao simular esse circuito, obtemos os seguintes resultados para o Diagrama de Bode, mostrados na Figura 6

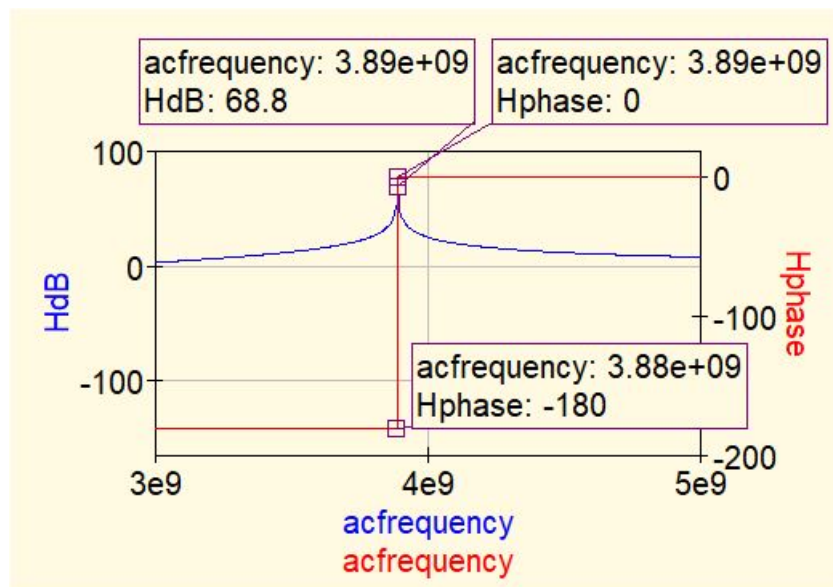


Figura 6: Diagrama de Bode da Rede de Adaptação de Impedância

Pode-se observar que tanto o pico da magnitude quanto a inversão de fase ocorrem perto da frequência de ressonância encontrada nos cálculos teóricos.

Para ver se a rede realiza a transformação de impedância desejada, foi realizada a simulação do parâmetro S. Assim, foi inserido o resistor em paralelo, resultando no seguinte circuito mostrado na Figura 7

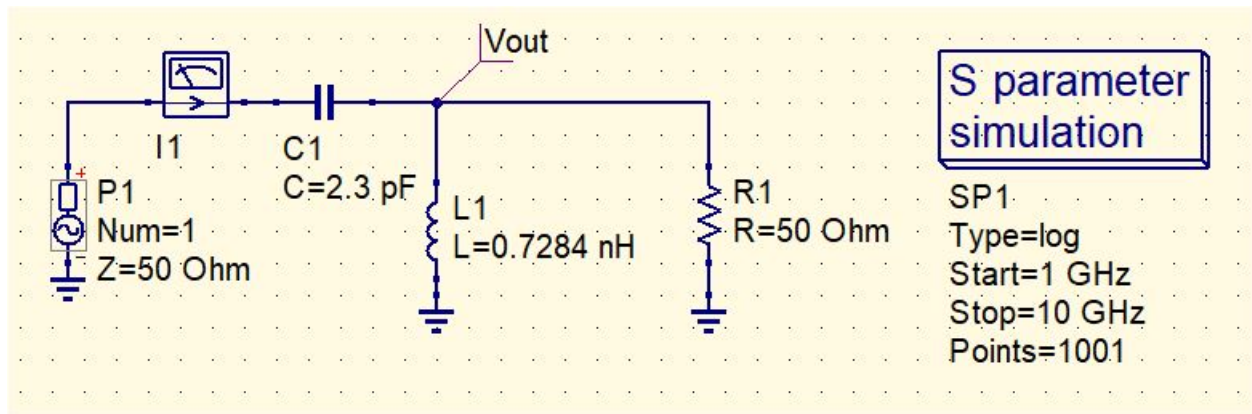


Figura 7: Circuito para Simulação S Parameter Simulation

Os resultados obtidos estão demonstrados na Figura 8

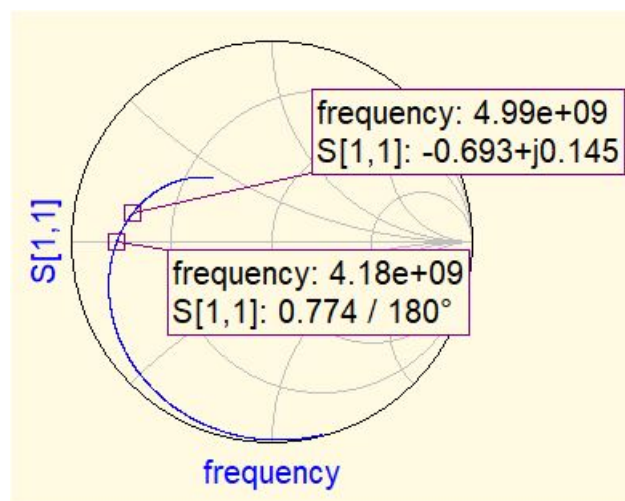


Figura 8: Resultados obtidos do S Parameter Simulation

Partindo da seguinte equação:

$$S = \frac{Z - Z_0}{Z + Z_0}$$

Temos:

$$Z = \frac{S_{11}Z_0 + Z_0}{1 - S_{11}}$$

Obtendo o seguinte resultado, a partir do valor obtido da Figura 8:

$$Z = \frac{(-0.693 + j0.145) * 50 + 50}{1 - (-0.693 + j0.145)} = 8.6366 + j5.02$$

Mostrando que o resultado foi parecido com o encontrado nos cálculos teóricos na frequência de 5GHz.

3.2 Circuito forçando ZL igual ao valor que atende aos requisitos de transferência de potência especificados

Primeiramente foi simulado o circuito casado para verificar se a fonte está fornecendo o P_{AVS} desejado. Isso pode ser observado na Figura 9

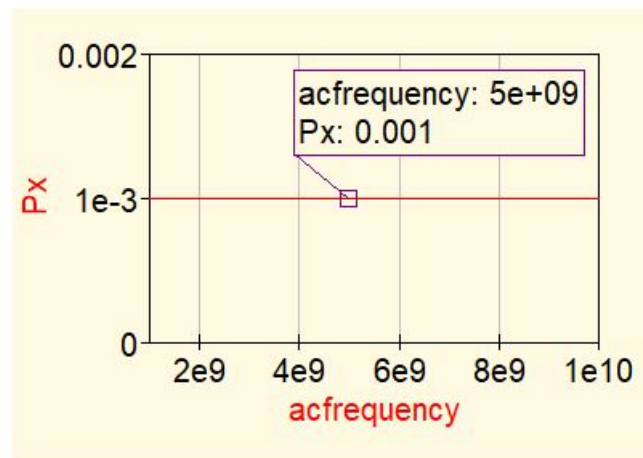


Figura 9: Potência Disponível P_{AVS} do Circuito Casado

Visto que os resultados para a Rede de Adaptação de Impedância e o P_{AVS} se comportaram de acordo com o que se esperava, na segunda parte do experimento foi acoplar essa impedância a uma fonte de potência.

O circuito simplificado, no qual toda rede de adaptação é representada por apenas uma impedância, é demonstrado na Figura 10

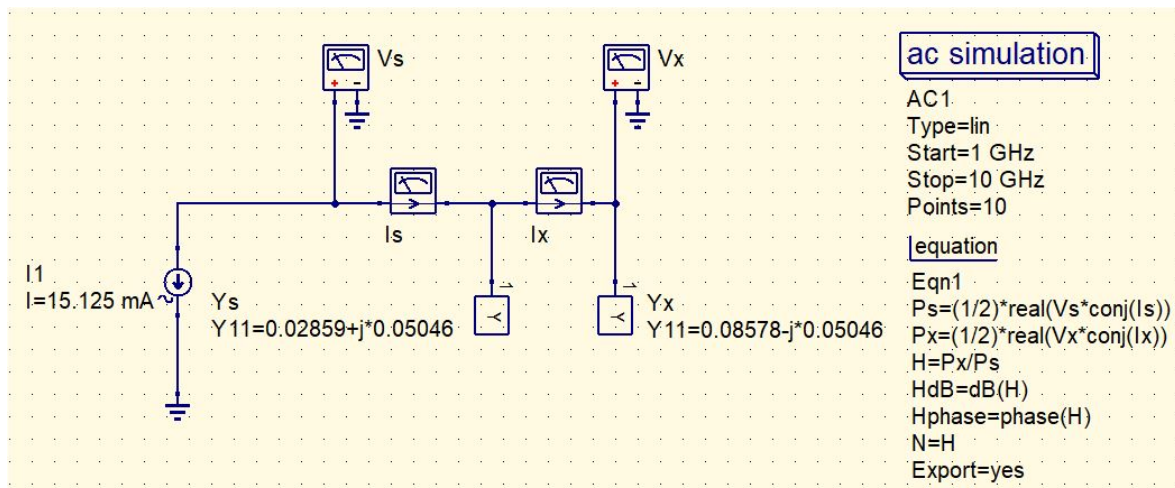


Figura 10: Circuito Simplificado

Como pode-se observar, nesse caso, a potência disponível é igual a potência na carga. Além disso, o circuito foi projetado utilizando admitância (Y).

Simulando esse circuito, obtemos os seguintes resultados mostrados na Figura 11:

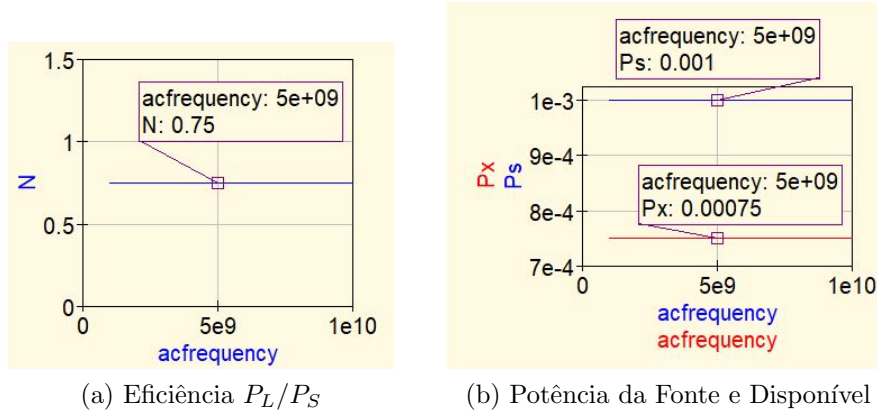


Figura 11: Resultados Obtidos da Eficiência e Potências da Fonte e Disponível

Nesse caso, P_x representa a potência disponível e P_s a potência da fonte, ou seja, a potência total fornecida ao circuito.

Como pode ser observado, com a impedância desenvolvida, cumpriu-se os requisitos de 75%, e a potência disponível foi de 0.75mW para frequência de 5GHz.

O valor máximo que poderia ser encontrado é de 1mW, isso porque o circuito foi desenvolvido para que a corrente I_S fornecesse um $P_{AVS} = 0dBm$. Assim, só seria encontrado caso houvesse o casamento perfeito das impedâncias. Ou seja, só ocorreria se a eficiência fosse de 50%.

3.2.1 Variando Parte Imaginária

O próximo passo foi fixar a parte real da impedância Z_X no valor calculado inicialmente e fazer uma varredura na sua parte imaginária. Para isso, foi utilizado a simulação Parameter Sweep fornecido pelo Qucs.

Analisou-se os resultados obtidos para a potência disponível P_X e para a eficiência η , os quais podem ser observados na Figura 12.

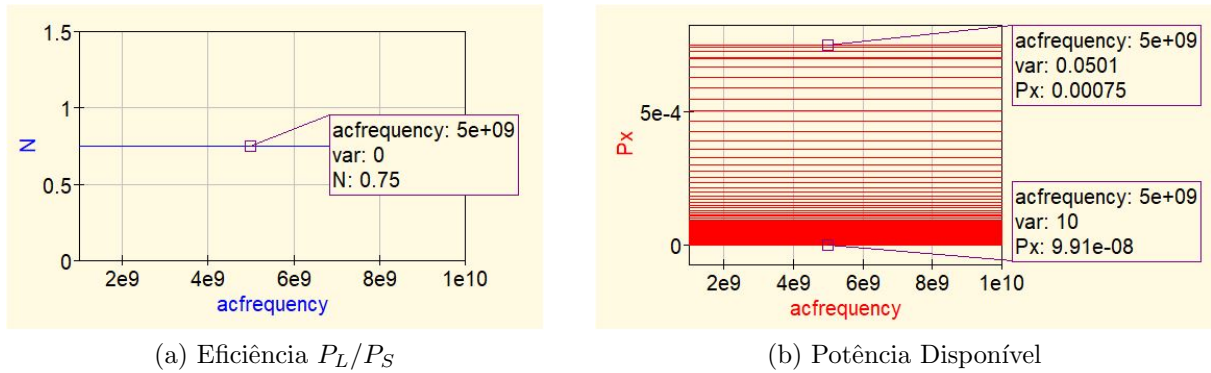


Figura 12: Resultados Obtidos da Eficiência e Potência Disponível Variando a Parte Imaginária de Z_X

Como estamos simulando o circuito simplificado, para cada nova parte imaginária é plotado uma reta constante.

Como pode ser observado no desenvolvimento teórico apresentado na Figura 3a, a eficiência (quando a Rede de Adaptação e a carga estão simplificadas em uma única impedância) fica em função apenas da parte real.

O gráfico da eficiência, portanto, deveria ser uma constante, o que é verificado na Figura 12a e, como esperado, com o valor de 75%.

O fato da eficiência ser constante e a potência disponível variar nos leva a concluir que a potência da fonte varia proporcionalmente com a potência disponível.

3.2.2 Variando Parte Real

Agora que variamos a parte imaginária, resta fixar a parte imaginária e variar a parte real do Z'_L .

Os resultados da eficiência e potência disponível são mostradas na Figura 13

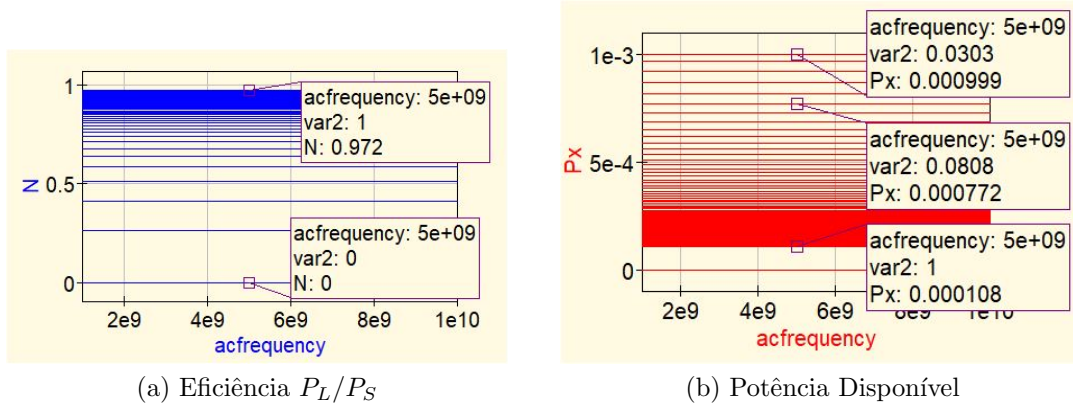


Figura 13: Resultados Obtidos da Eficiência e Potência Disponível Variando a Parte Real de Z_X

Como pode ser observado, a eficiência agora varia, visto que a fórmula que a define é dada por:

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

no qual G_L é a parte real da admitância da carga e G_S a parte real da admitância da fonte.

Assim, pode-se perceber que quando a parte real for igual a zero, temos que $\eta = 0$ e conforme se aumenta o valor de G_L , η tende a 1.

Diferente do que aconteceu anteriormente, η varia, assim podemos concluir que a potência da fonte não varia proporcionalmente com a potência disponível.

3.3 Substituindo Z_X pela Rede de Adaptação de Impedância com $Z_L = 50\Omega$

Agora iremos substituir a impedância Z_X pela Rede de Adaptação de Impedância e o Z_L . O circuito pode ser observado na Figura 14

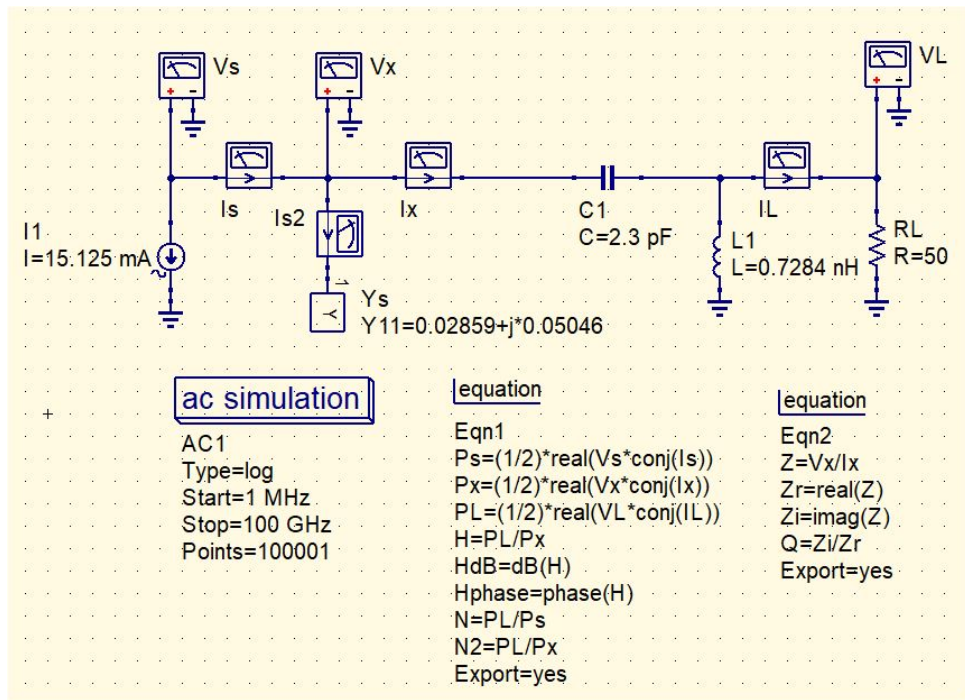
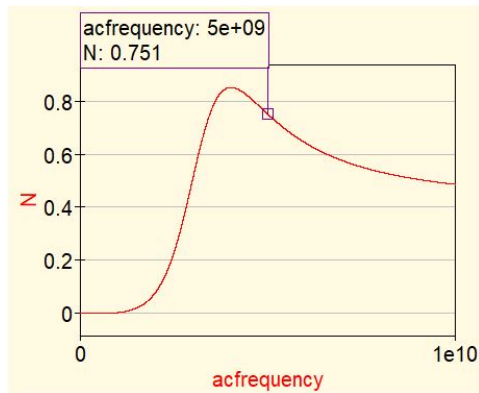


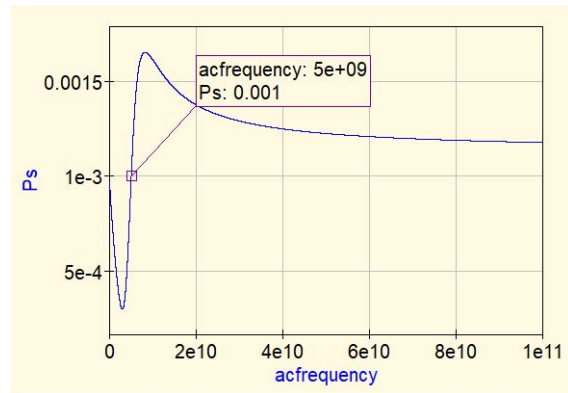
Figura 14: Circuito com Rede de Adaptação de Impedância

Analisaremos os mesmos parâmetros do Circuito Simplificado.

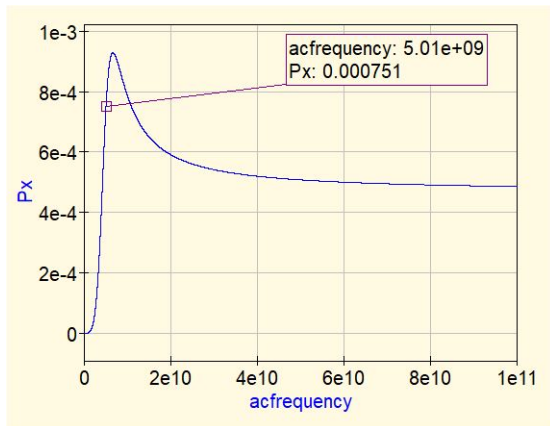
Primeiramente foi feita as simulações da Potência Fonte, Disponível e na Carga, além da Eficiência. Os resultados para a frequência de 5GHz podem ser observados na Figura 15



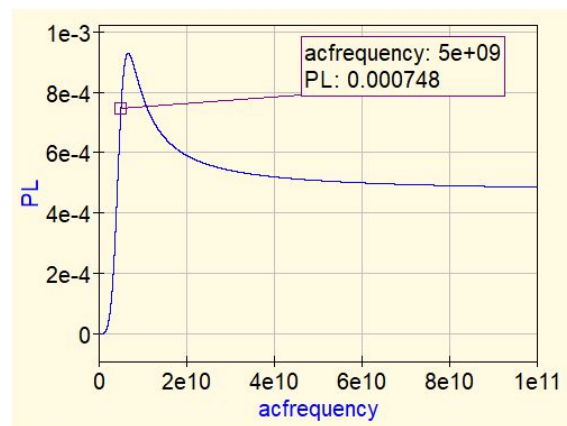
(a) Eficiência P_L/P_S



(b) Potência da Fonte



(c) Potência da Disponível



(d) Potência da Carga

Figura 15: Resultados Obtidos da Eficiência, Potência Fonte, Disponível e na Carga

Como pode-se observar, os resultados bateram com os obtidos na Figura 11. Além disso, pode-se perceber que praticamente toda potência disponível foi entregue a carga.

3.3.1 Variando a Parte Imaginária

O próximo passo é fixar a parte real ótima e variar a parte imaginária, para isso, foi introduzido um indutor em série com a carga. Para obter os novos dados, variou o valor desse novo indutor entre 0 e 1nH.

Os resultados podem ser observados na Figura 16

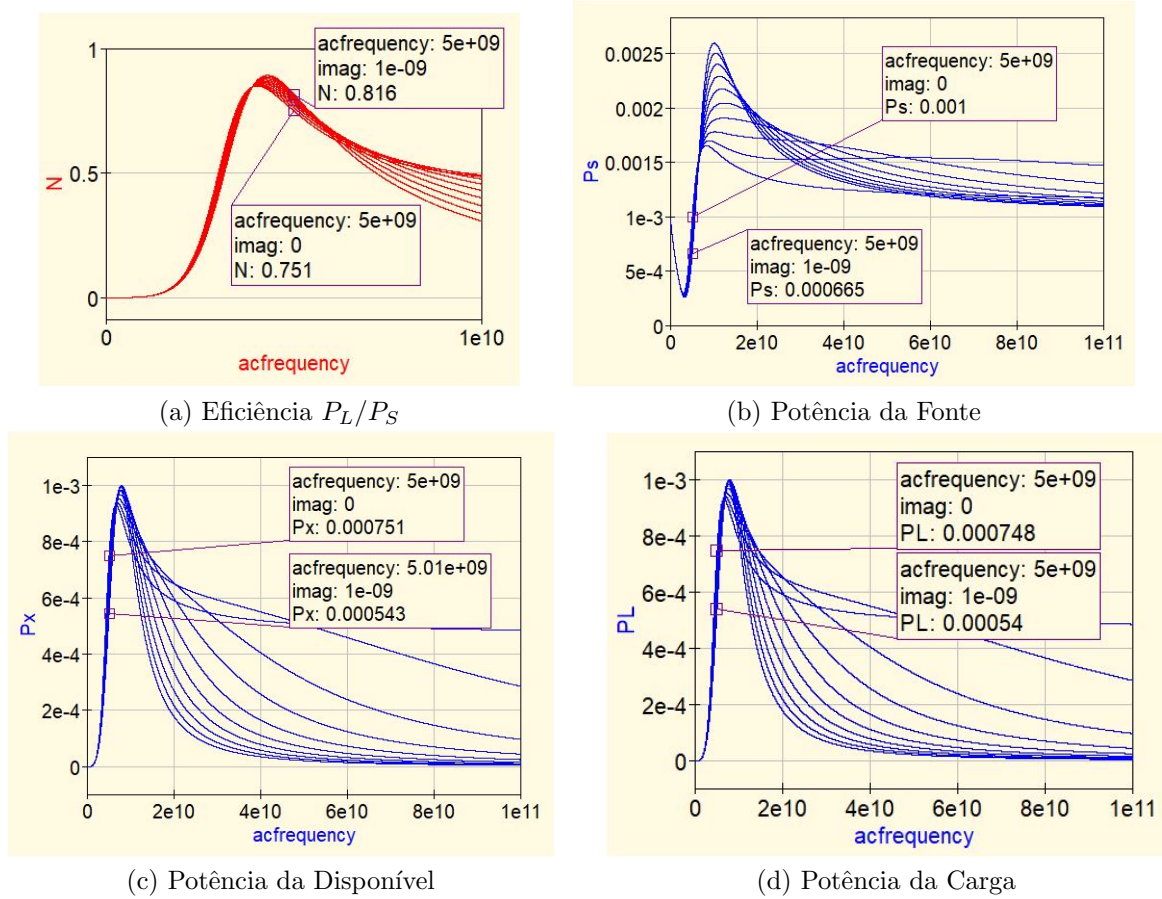


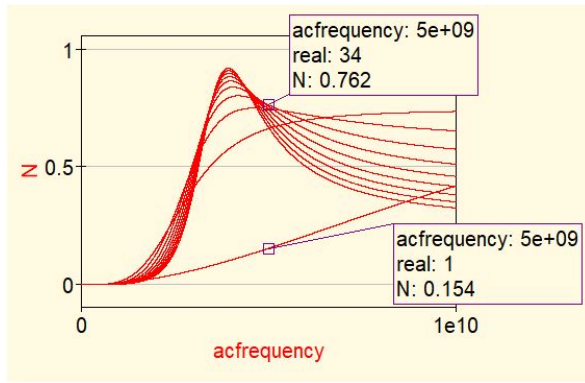
Figura 16: Resultados Obtidos da Eficiência, Potência Fonte, Disponível e na Carga Variando o Valor do Indutor Introduzido em Série com a Carga

Como pode ser observado, a eficiência aumentou conforme o valor do indutor aumenta, isso se deve pelo fato de que houve uma maior queda na Potência da Fonte comparada com a Potência Disponível na mesma frequência de 5GHz. A Potência na Carga seguiu o decaimento da Potência Disponível.

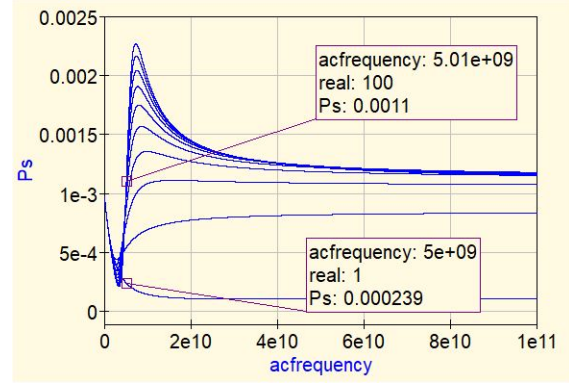
3.3.2 Variando a Parte Real

Agora falta fixar a parte imaginária e variar a parte real.

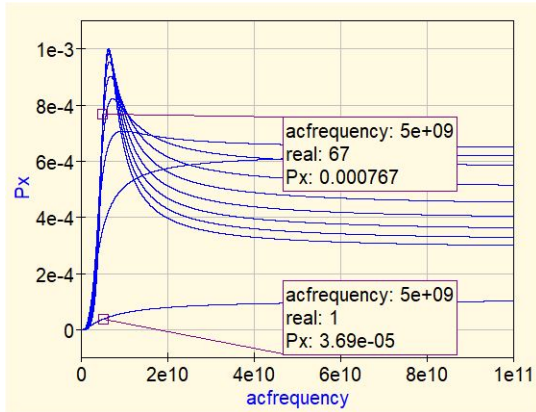
Os resultados podem ser observados na Figura 17



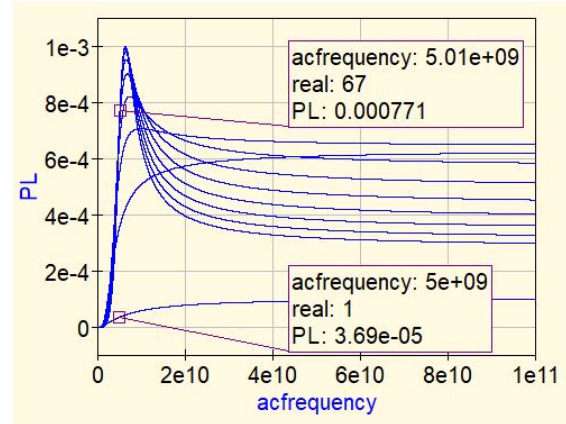
(a) Eficiência P_L/P_S



(b) Potência da Fonte



(c) Potência da Disponível



(d) Potência da Carga

Figura 17: Resultados Obtidos da Eficiência, Potência Fonte, Disponível e na Carga Variando o Valor do Resistor R_L

Como pode ser observado, a variação na parte real impacta na eficiência, o que colabora com os resultados previamente obtidos.

3.4 Circuitos com Componentes Reais

3.4.1 Simulação do Circuito com Componentes Reais sem Incluir as Tolerâncias

O próximo passo do experimento foi substituir os componentes por produtos reais que mais chegassem perto dos valores requisitados. Para isso, pesquisou-se diferentes marcas de fabricantes.

Um indutor encontrado que chega perto dos requisitos pedidos foi o MHQ0402PSA0N7BT000 da fabricante TDK, pois apresenta uma indutância de 0.7nH e com a menor tolerância: $\pm 0.1\text{nH}$ (14.28%). O diagrama do seu circuito pode ser observado na Figura 18

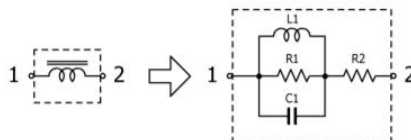


Figura 18: Diagrama do Circuito do Indutor TDK

No qual apresenta os seguintes valores:

$$L_1 = 0.7nH$$

$$C_1 = 0.014pF$$

$$R_1 = 19K\Omega$$

$$R_2 = 0.0214\Omega$$

Além disso, deve-se encontrar um capacitor que chegue próximo dos valores teóricos encontrados de 2.3pF. O capacitor encontrado foi C0402C0G1C2R2C020BC da fabricante TDK, apresentando uma capacitância de 2.2pF e tolerância de $\pm 0.25pF$ (11.36%). O diagrama do seu circuito pode ser observado na Figura 19

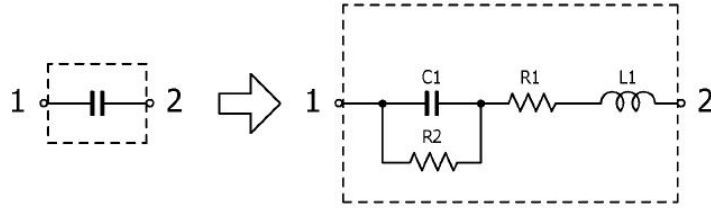


Figura 19: Diagrama do Circuito do Capacitor TDK

No qual apresenta os seguintes valores:

$$C_1 = 2.2pF$$

$$L_1 = 0.280nH$$

$$R_1 = 0.3940\Omega$$

$$R_2 = 10G\Omega$$

Assim, obtemos o circuito a ser simulado na Figura 20

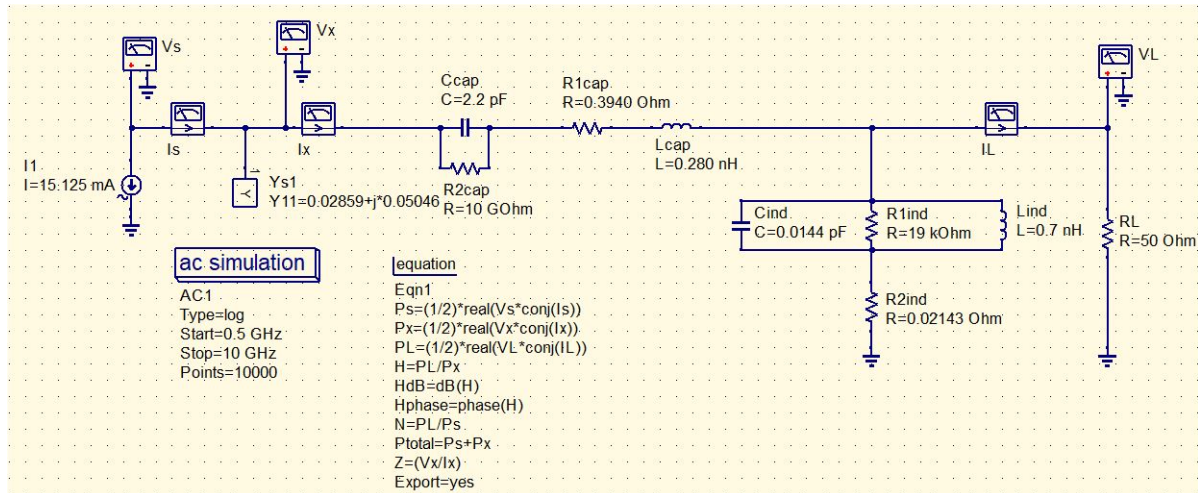


Figura 20: Circuito com Componentes do Fabricante TDK

Foi feito a simulação para obter os mesmos parâmetros previamente calculados. Os resultados obtidos podem ser vistos na Figura 21

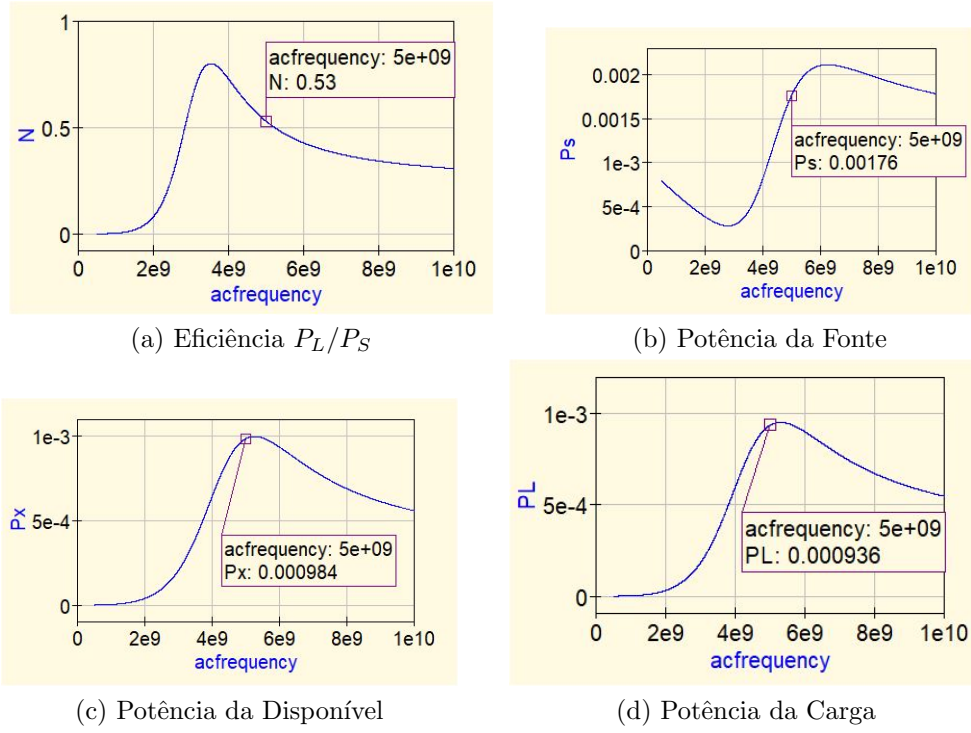


Figura 21: Resultados Obtidos da Eficiência, Potência Fonte, Disponível e na Carga Utilizando Componentes Reais

Como pode ser observado, os resultados estão diferentes do obtidos teoricamente, isso se deve por diversos fatos, sendo eles:

- Não foi possível encontrar componentes com valores exatos dos teóricos;
- A presença de não só 1 componente, mas sim um circuito para simular o capacitor e o indutor real, faz com que a impedância da Rede de Adaptação + Carga seja diferente;

Podemos provar esse último item através da S Parameter Simulation, visto na Figura 22

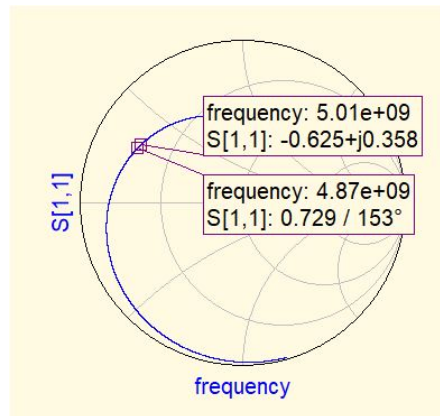


Figura 22: Resultado Obtido do S Parameter Simulation para Rede de Adaptação de Impedâncias+Carga

Partindo da seguinte equação:

$$Z = \frac{S_{11}Z_0 + Z_0}{1 - S_{11}}$$

Obtendo o seguinte resultado, a partir do valor obtido da Figura 22:

$$Z = \frac{(-0.625 + j0.358) * 50 + 50}{1 - (-0.625 + j0.358)} = 8.6899 + j12.9298$$

Como pode ser observado, a inclusão desses componentes interferiu principalmente na parte imaginária da rede de adaptação de impedâncias, visto que, anteriormente, $Z = 8.66 + j5.09$.

3.4.2 Monte Carlo

O próximo passo foi inserir as tolerâncias de cada componente e realizar a simulação Monte Carlo, foram feitas 250 iterações utilizando o software Qucs. Alguns resultados podem ser observados na Figura 23

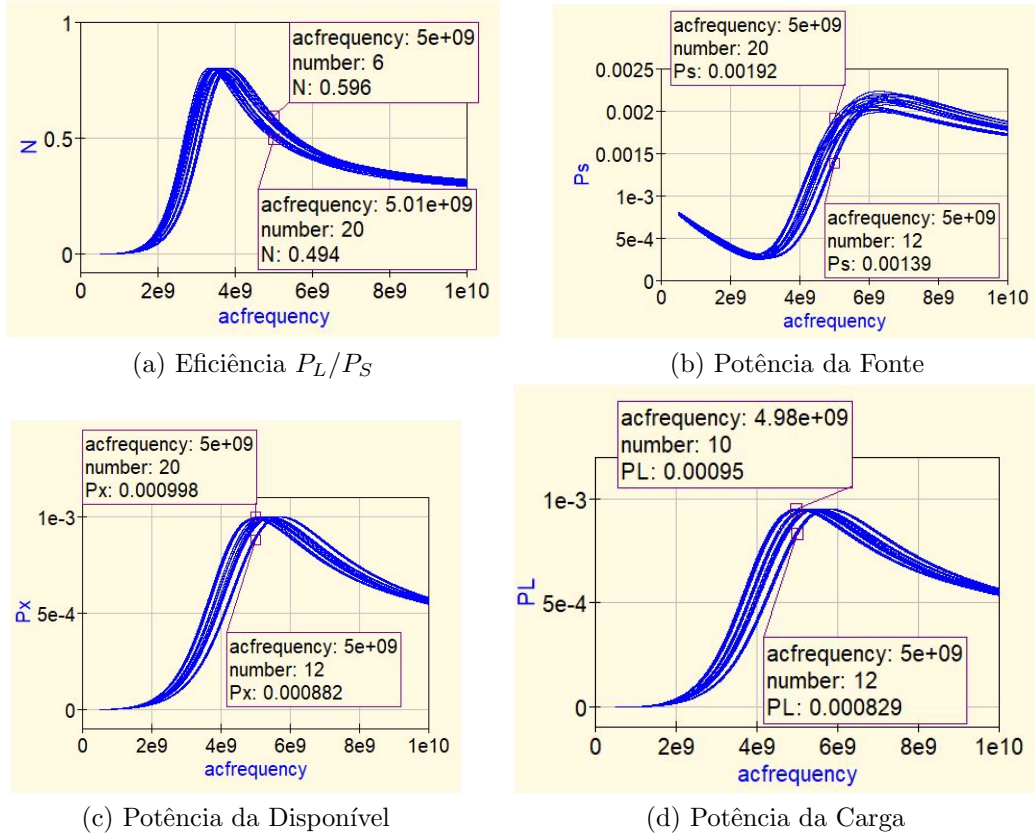
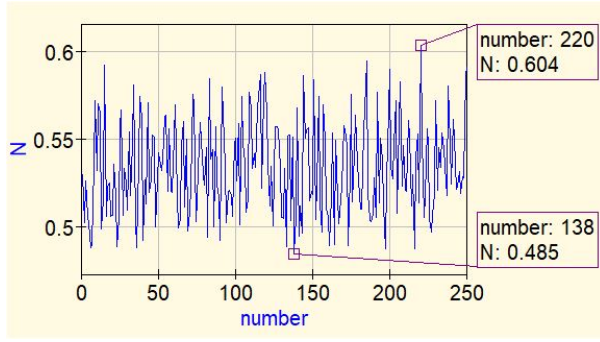
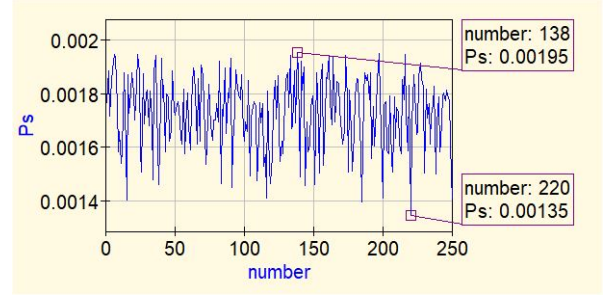


Figura 23: Resultados Obtidos da Eficiência, Potência Fonte, Disponível e na Carga Utilizando Componentes Reais Incluindo a Tolerância e Simulando em Monte Carlo em Função da Frequência

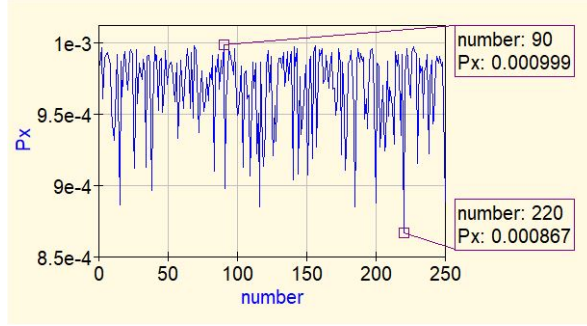
Como estamos analisando o circuito em 5GHz, foi feito o gráfico dos resultados obtidos nessa frequência, isso pode ser observado na Figura 24.



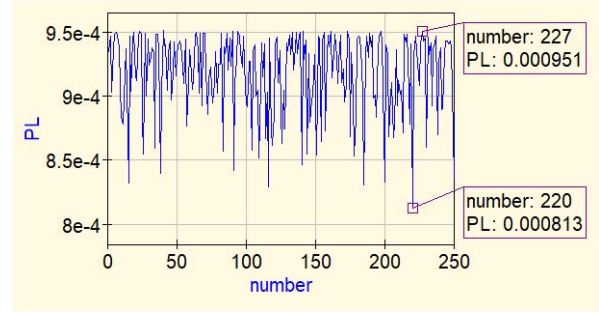
(a) Eficiência P_L/P_S



(b) Potência da Fonte



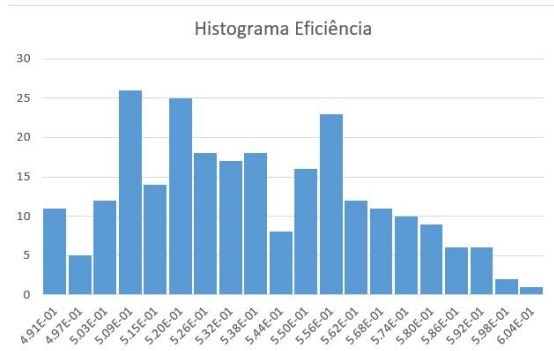
(c) Potência da Disponível



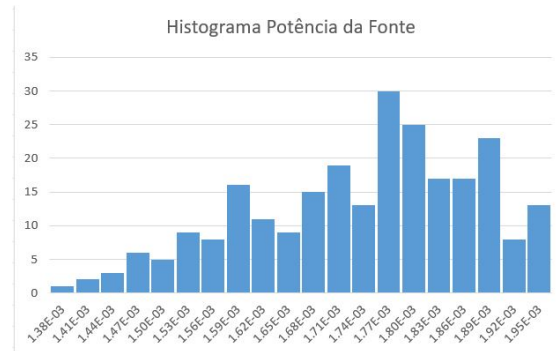
(d) Potência da Carga

Figura 24: Resultados Obtidos da Eficiência, Potência Fonte, Disponível e na Carga Utilizando Componentes Reais Incluindo a Tolerância e Simulando em Monte Carlo na Frequência de 5GHz

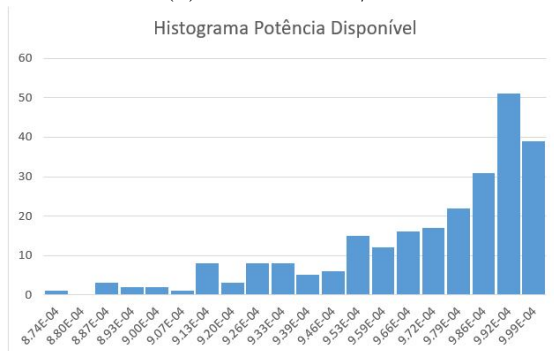
Esses dados foram exportados para o software Excel para que fosse feito os gráficos dos Histogramas apresentados na Figura 25



(a) Eficiência P_L/P_S



(b) Potência da Fonte



(c) Potência Disponível



(d) Potência da Carga

Figura 25: Histograma da Eficiência, Potência Fonte, Disponível e na Carga Utilizando Componentes Reais Incluindo a Tolerância e Simulando em Monte Carlo na Frequência de 5GHz

Como pode ser observado, houve uma maior frequência nos casos perto dos resultados obtidos sem incluir as tolerâncias.

3.4.3 Proposta para Melhorar as Imperfeições Observadas ao Incluir Componentes Reais

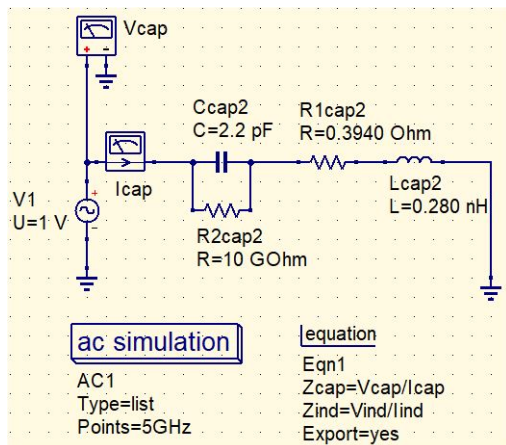
O ultimo passo do experimento é propor uma técnica para deixar o projeto robusto às imperfeições dos componentes, garantindo o atendimento às especificações.

Uma dessas técnicas foi analisar a impedância real de cada componente. Na sua análise ideal, a impedância do capacitor e do indutor podem ser obtidas através das seguintes equações, respectivamente:

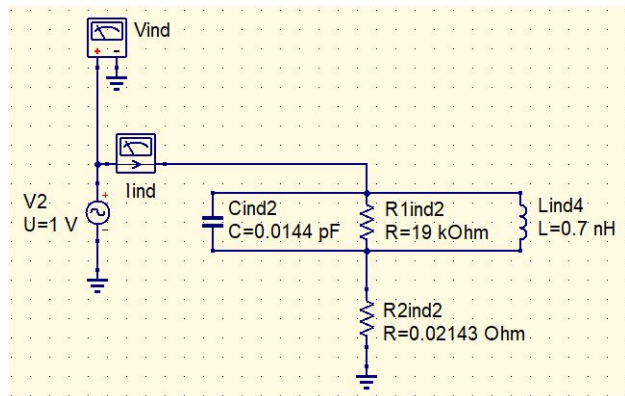
$$Z_{cap} = \frac{1}{j\omega C} \quad Z_{ind} = j\omega L$$

Porém, na realidade não conseguimos esses valores, pois há muitas imperfeições que mudam o valor dessa impedância ideal.

Assim, foi simulado a impedância de cada componente. Os resultados podem ser observados na Figura 26



(a) Circuito para Simular a Impedância do Capacitor



(b) Circuito para Simular a Impedância do Indutor

number	Zcap	Zind
1	0.394-j5.67	0.0474+j22.2

(c) Resultados da Impedância do Capacitor e do Indutor

Figura 26: Resultados Obtidos da Simulação para Encontrar os Valores de Impedância do Capacitor e do Indutor Reais

Sabendo os valores da impedância do capacitor e do indutor, podemos encontrar o valor a do Z_L utilizando do seguinte circuito apresentado na Figura 27

Handwritten calculations for finding Z_L :

$$Z_{cap} = 0,334 - j5,67$$

$$Z_{ind} = 0,0474 + j22,2$$

$$Z_t = 8,66 + j5,03$$

$$\frac{Z_{ind} \cdot Z_L}{Z_{ind} + Z_L} + Z_{cap} = Z_t$$

$$Z_{ind} Z_L + Z_{cap} Z_{ind} + Z_{cap} Z_L = (Z_{ind} + Z_L) Z_t$$

$$Z_L (Z_{ind} + Z_{cap} - Z_t) = Z_{ind} Z_t - Z_{cap} Z_{ind}$$

$$Z_L = \frac{Z_{ind} (Z_t - Z_{cap})}{Z_{ind} + Z_{cap} - Z_t} = 20,4875 + j6,1277$$

Figura 27: Desenvolvimento para Encontrar Z_L

Assim encontramos que a parte do $Z_L = 20.4875 + j6.277$.

Desse resultado podemos concluir:

- Devemos incluir um indutor pois a parte imaginária é positiva;
- A parte real deve possuir o valor de 20.4875

Primeiramente vamos calcular o valor do indutor a ser incluído em série com a carga.

$$Z_{Indutor} = j\omega L = 6.1277 \quad L = 0.195nH$$

Encontrado o valor do indutor, analisaremos a parte real. Como a carga possui o valor de 50Ω , concluímos que se deveria colocar um resistor em paralelo com a carga, porém ao colocar esse resistor, a potência sobre a carga cairia afetando a eficiência.

Assim, para manter os requisitos, esse resistor não foi incluído. Os resultados podem ser observados na Figura 28

number	Ps	Px	PL	N	Z
1	0.00172	0.000971	0.000914	0.531	7.8+j12.3

Figura 28: Resultado Adicionando Indutor em Série, mas Sem Resistor em Paralelo

Como pode ser observado, a impedância possui uma parte imaginária superior ao desejado. Para compensar isso, foi incluído um capacitor em série com a rede de adaptação. Tal capacitor deveria possuir o valor para o qual apresente uma impedância imaginária de $-j7.21$.

Utilizando da formula da impedância do capacitor:

$$C = \frac{1}{w \cdot 7.21} = 4.41pF$$

Os resultados podem ser observados na Figura 29

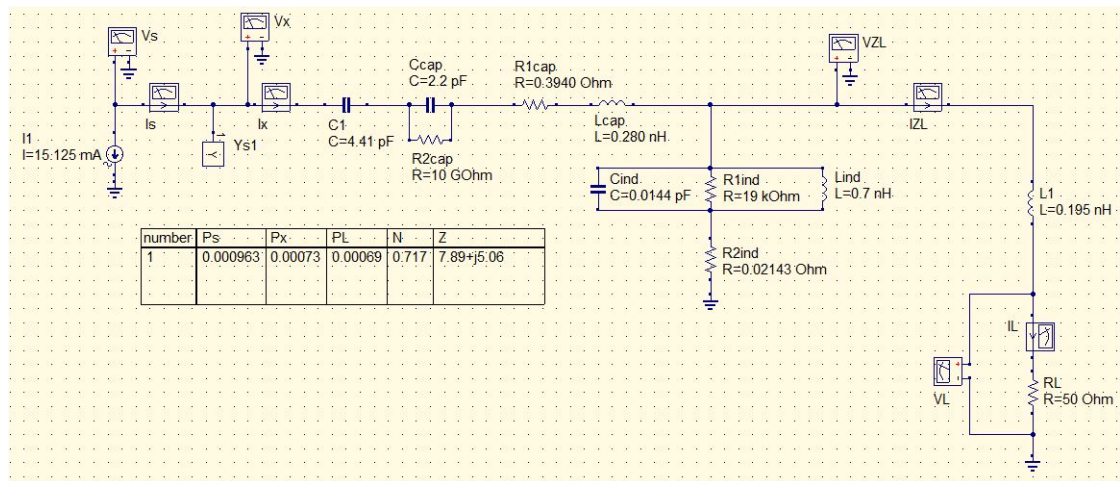
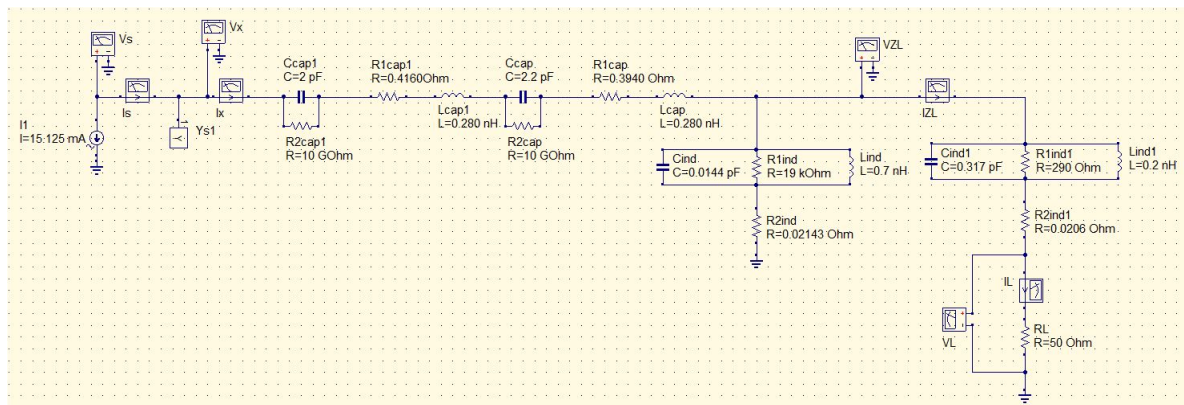


Figura 29: Resultado para um Capacitor Ideal Adicionado em Série com a Rede de Adaptação de Impedância

Idealmente o valor do capacitor deveria ser 4.41pF, porém como estamos adicionando outro componente que possui imperfeições e, baseando-se na Figura 26c, foi adicionado um capacitor de 2pF.

A substituição do indutor ideal pelo indutor real colocado em série com a carga não apresentou distorção aos resultados finais, por isso foi mantido com o valor mais próximo encontrado.

O circuito final e os resultados obtidos podem ser observados na Figura 30



(a) Circuito Final Desenvolvido para Melhorar as Imperfeições Observadas ao Incluir Componentes Reais

number	Ps	Px	PL	N	Z
1	0.000984	0.000742	0.000663	0.674	8.22+j5.14

(b) Resultados Finais Apresentando a Eficiência, Impedância, Potência da Fonte, Disponível e na Carga na Frequência de 5GHz

Figura 30: Resultados Finais para Melhorar as Imperfeições Observadas ao Incluir Componentes Reais

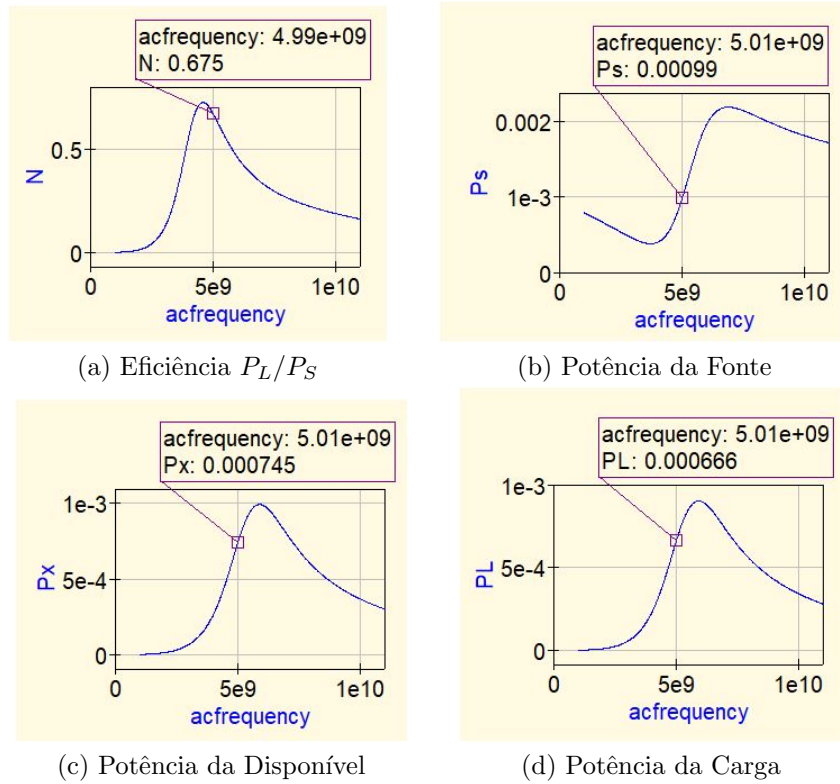


Figura 31: Resultados Obtidos da Eficiência, Potência Fonte, Disponível e na Carga Utilizando Componentes Reais Após os Aprimoramentos com Componentes Reais

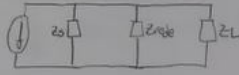
Assim, comparando as Figuras 30 e 31 com a Figura 15, podemos concluir que as alterações feitas no circuito utilizando componentes reais chegaram próximas dos resultados desejados.

4 Questões Propostas

4.1 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 PL é a potência dissipada pela carga e PS é a potência total produzida pela fonte.

O desenvolvimento pode ser observado na Figura 32

Segundo o circuito



temos:

$$V_S = \left(\frac{1}{Z_S} + \frac{1}{Z_{rede}} + \frac{1}{Z_L} \right)^{-1} \cdot I_S$$

Como $Y = 1/Z$ e $V_S = V_{rede} = V_L$

$$V_S = (Y_S + Y_{rede} + Y_L)^{-1} \cdot I_S \Rightarrow \boxed{V_S = \frac{I_S}{Y_S + Y_{rede} + Y_L}}$$

$$I_L = \frac{Y_L}{Y_S + Y_{rede} + Y_L} \cdot I_S$$

Sabendo que a potência na carga é dada por:

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

$$= \frac{1}{2} \frac{|I_S|^2}{|Y_S + Y_{rede} + Y_L|^2} \cdot \operatorname{Re} \{ Y_L^* \}$$

1/2 Potência Total

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

$$P_S = \frac{1}{2} |I_S|^2 \cdot \operatorname{Re} \left\{ \frac{1}{Y_S + Y_{rede} + Y_L} \right\} = \frac{1}{2} |I_S|^2 \cdot \frac{(G_S + G_{rede} + G_L)}{|Y_S + Y_{rede} + Y_L|^2}$$

(a) Desenvolvimento Parte 01

A eficiência é dada por

$$\eta = \frac{P_L}{P_S} = \frac{\frac{|I_S|^2}{2 |Y_S + Y_{rede} + Y_L|^2} \cdot G_L}{\frac{|I_S|^2}{2} \cdot \frac{(G_S + G_{rede} + G_L)}{|Y_S + Y_{rede} + Y_L|^2}}$$

$$\boxed{\eta = \frac{G_L}{G_S + G_{rede} + G_L}}$$

(b) Desenvolvimento Parte 02

Figura 32: Desenvolvimento para Encontrar a Expressão de η

Como pode ser observado, a eficiência depende apenas da parte real dos componentes (Fonte, Rede de Adaptação de Impedância e Carga).

$$\eta = \frac{P_L}{P_S} = \frac{G_L}{G_S + G_{Rede} + G_L}$$

4.2 Para o circuito da figura do experimento, encontre uma expressão para a eficiência de transferência de potência entre fonte e carga, definida como: $\eta = \frac{P_L}{P_{AVS}}$. Onde P_{AVS} é a potência disponível da fonte.

O desenvolvimento pode ser observado na Figura 33

Sabendo que:

$$P_{AVS} = \frac{1}{2} \operatorname{Re} \left\{ I_{AVS} \cdot I_{AVS}^* \right\} \quad e \quad I_{AVS} = \frac{Y_{Rede} + Y_L}{Y_S + Y_{Rede} + Y_L} \cdot I_S$$

Podemos obter:

$$P_{AVS} = \frac{1}{2} \operatorname{Re} \left\{ \frac{I_S}{Y_S + Y_{Rede} + Y_L} \cdot \left(\frac{(Y_{Rede} + Y_L) \cdot I_S}{Y_S + Y_{Rede} + Y_L} \right)^* \right\}$$

$$= \frac{1}{2} \frac{|I_S|^2}{|Y_S + Y_{Rede} + Y_L|^2} \cdot \operatorname{Re} \{ (Y_{Rede} + Y_L)^* \}$$

dado: $\eta = \frac{P_L}{P_{AVS}}$;

$$\eta = \frac{\frac{|I_S|^2}{2 |Y_S + Y_{Rede} + Y_L|^2} \cdot \operatorname{Re} \{ Y_L^* \}}{\frac{|I_S|^2}{2 |Y_S + Y_{Rede} + Y_L|^2} \cdot \operatorname{Re} \{ (Y_{Rede} + Y_L)^* \}}$$

$$\eta = \frac{G_L}{G_{Rede} + G_L} = \frac{G_L}{G_S} \quad \left| \begin{array}{l} Y_{Rede} + Y_L = Y_S^* \\ Y_S = (Y_{Rede} + Y_L)^* \end{array} \right.$$

Figura 33: Desenvolvimento para Encontrar a Expressão de η

$$\eta = \frac{P_L}{P_{AVS}} = \frac{G_L}{G_{Rede} + G_L}$$

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

Dado que $Y_{Rede} + Y_L = Y_S^*$

- 4.3** 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. Confirme a sua expressão em um software matemático.

O desenvolvimento pode ser observado nas Figuras 34 e 35

Admitindo que $Y_X = Y_{rede} + Y_L \Rightarrow Y_X = G_X + jB_X$

Dado

$$\eta_1 = \frac{G_L}{G_S + G_{rede} + G_L} \Rightarrow G_L = \eta_1 (G_S + G_{rede} + G_L)$$

$$G_L - \eta_1 G_L = \eta_1 (G_S + G_{rede})$$

Assim,

$$G_L = \frac{\eta_1}{1 - \eta_1} \cdot (G_S + G_{rede})$$

Além disso,

$$\eta_2 = \frac{G_L}{G_{rede} + G_L} \Rightarrow \eta_2 G_{rede} = G_L - \eta_2 G_L = (1 - \eta_2) G_L$$

$$G_{rede} = \frac{1 - \eta_2}{\eta_2} \cdot G_L$$

Portanto,

$$G_L = \frac{\eta_1}{1 - \eta_1} G_S + \frac{\eta_1}{1 - \eta_1} \left(\frac{1 - \eta_2}{\eta_2} \right) G_L = K + \frac{\eta_1 - \eta_1 \eta_2}{\eta_2 - \eta_1 \eta_2} G_L$$

$$G_L + \frac{\eta_1 \eta_2 - \eta_1}{\eta_2 - \eta_1 \eta_2} G_L = K \Rightarrow K = G_L \left(\frac{\eta_2 - \eta_1 \eta_2 + \eta_1 \eta_2 - \eta_1}{\eta_2 - \eta_1 \eta_2} \right)$$

Figura 34: 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 - Parte 01

$$\frac{\eta_1}{1 - \eta_1} G_S = \frac{\eta_2 - \eta_1}{\eta_2 - \eta_1 \eta_2} G_L$$

$$G_L = \frac{\eta_1 G_S (\eta_2 - \eta_1 \eta_2)}{(1 - \eta_1)(\eta_2 - \eta_1)} = \frac{\eta_1 \eta_2 G_S (1 - \eta_1)}{(1 - \eta_1)(\eta_2 - \eta_1)}$$

$$G_L = \frac{\eta_1 \eta_2}{\eta_2 - \eta_1} G_S$$

Para encontrar a parte imaginária, temos que:

$$Y_X = Y_{rede} + Y_L = Y_S^* \Rightarrow B_{rede} + B_L = -B_S$$

$$B_L = -B_S - B_{rede}$$

Portanto,

$$Y_L = \frac{\eta_1 \eta_2}{\eta_2 - \eta_1} G_S - (jB_S + B_{rede})$$

$$Z_L = \frac{1}{Y_L}$$

Figura 35: 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 - Parte 02

4.4 Substitua a rede L utilizada no experimento por uma rede T, de modo a ter uma banda passante de 10%. (Ler seção 13.12 de [1]). 4. Disserte sobre o que aprendeu com o experimento.

O desenvolvimento pode ser observado nas Figuras 36, 37 e 38

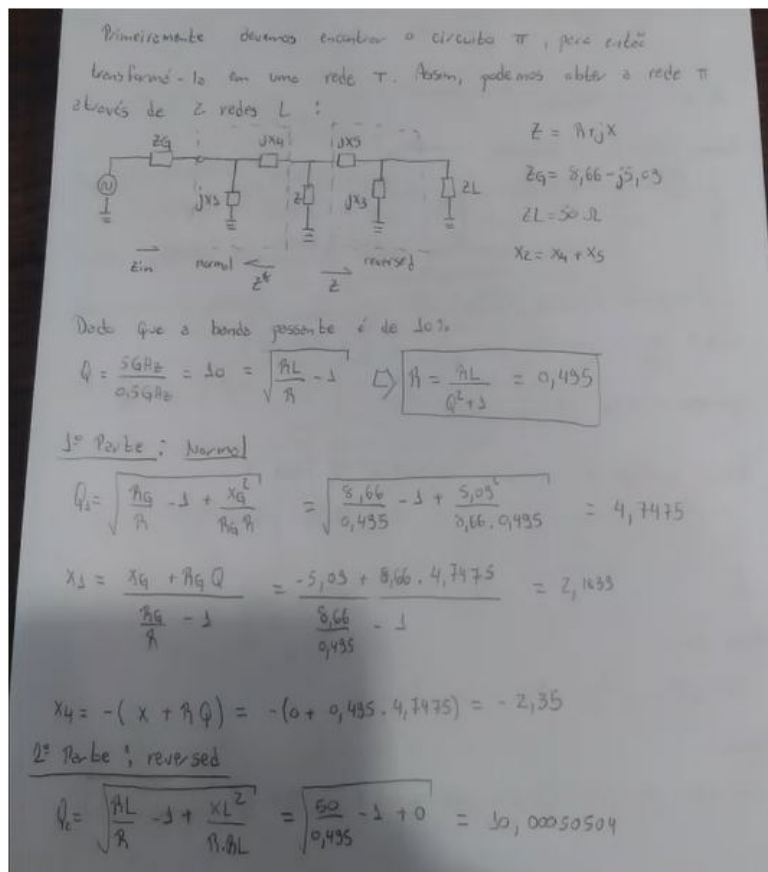


Figura 36: Desenvolvimento para a Transformação de uma Rede L para uma Rede T Parte 01

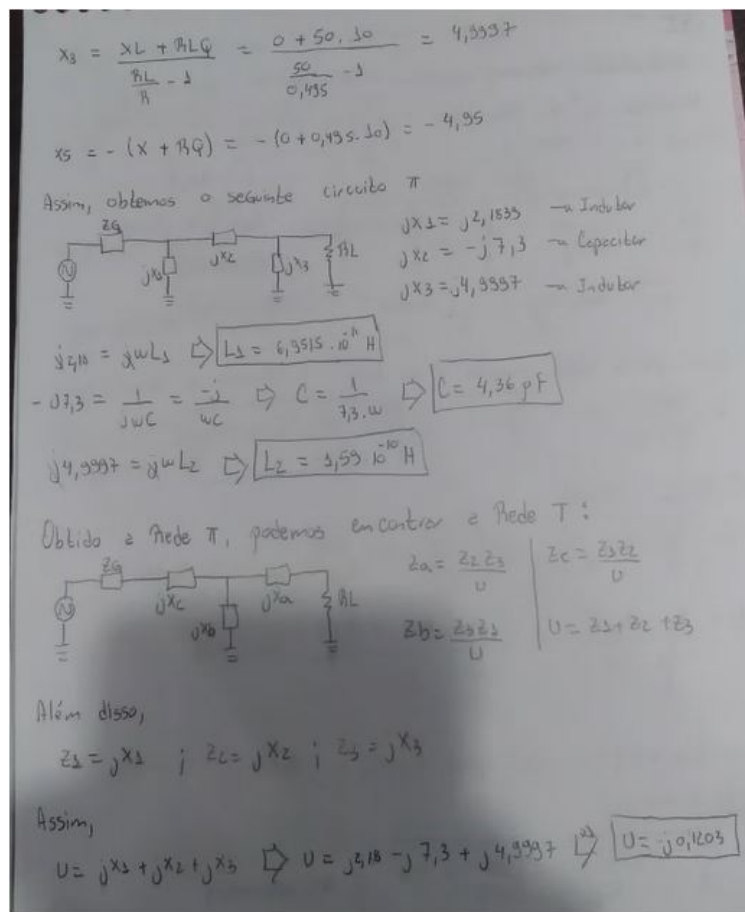


Figura 37: Desenvolvimento para a Transformação de uma Rede L para uma Rede T Parte 02

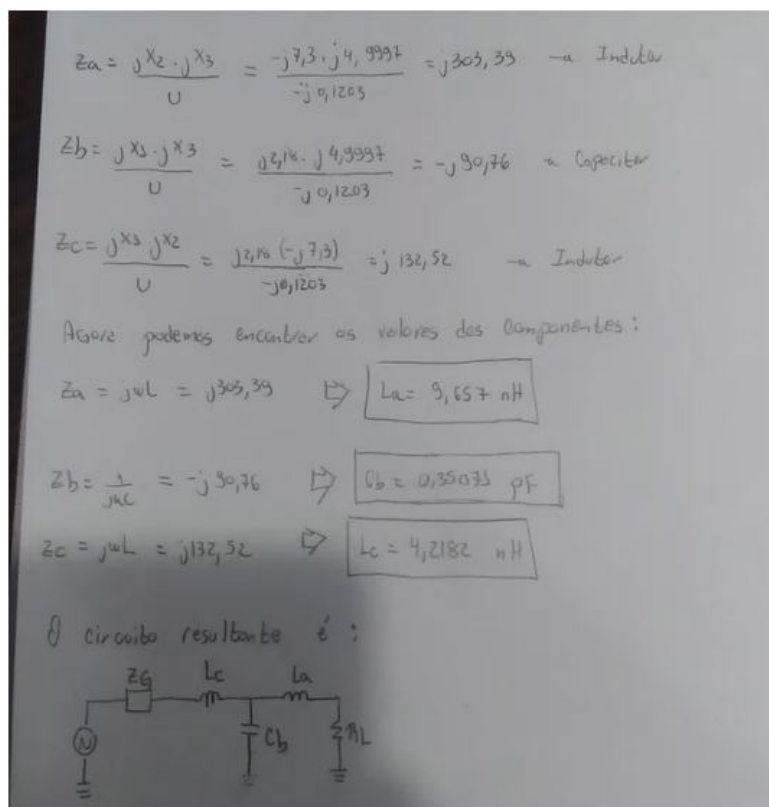


Figura 38: Desenvolvimento para a Transformação de uma Rede L para uma Rede T Parte 03

Para confirmar que o circuito em Rede T está funcionando, foi desenvolvido o circuito no software Qucs, que pode ser observado na Figura 39

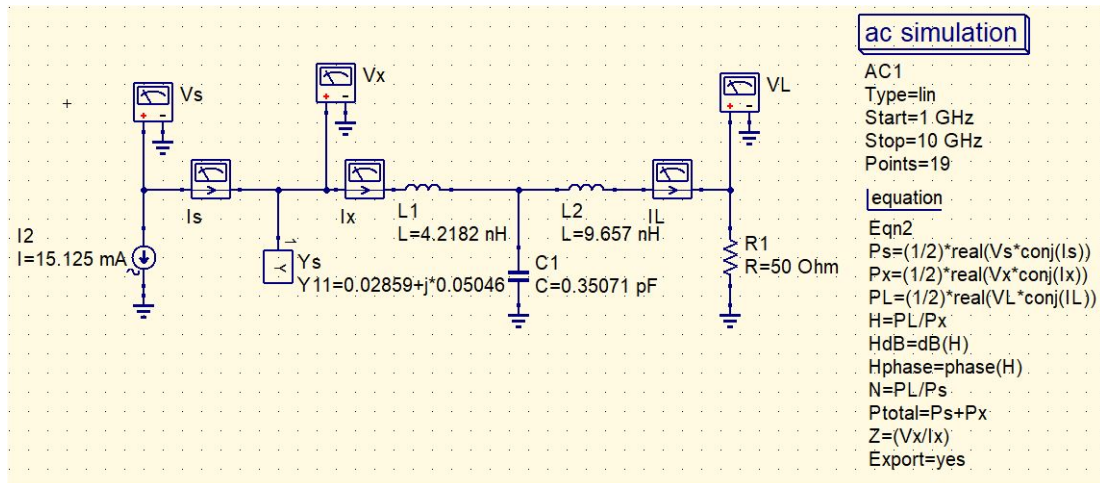


Figura 39: Circuito da Rede T

Após implementado, foram feitas as simulações da eficiência, potências da fonte, disponível e na carga. Os resultados podem ser observados nas Figura 40

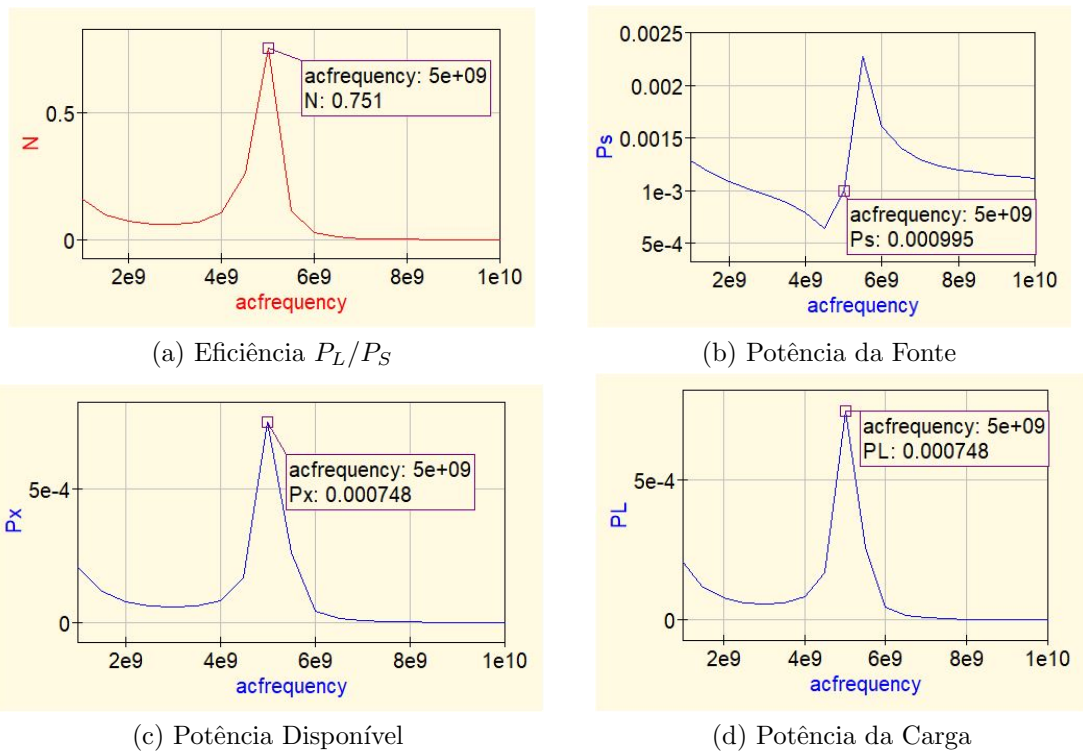


Figura 40: Resultados das Simulações da Eficiência, Potências da Fonte, Disponível e na Carga

Como pode ser observado, os resultados obtidos são próximos dos analisados anteriormente para frequência de 5GHz.

Além disso, para verificar se a rede de adaptação de impedâncias está correta, foi obtido o parâmetro S, que pode ser observado na Figura 41

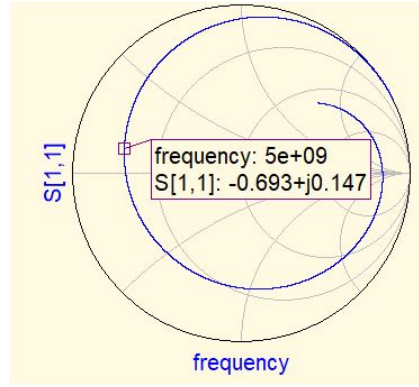


Figura 41: Resultado Obtido do S Parameter Simulation para Rede T Desenvolvida

Partindo da seguinte equação:

$$Z = \frac{S_{11}Z_0 + Z_0}{1 - S_{11}}$$

Obtendo o seguinte resultado, a partir do valor obtido da Figura 41:

$$Z = \frac{(-0.693 + j0.147) * 50 + 50}{1 - (-0.693 + j0.147)} = 8.6247 + j5.09$$

Como pode ser observado, a impedância obtida é bem próxima da calculada teoricamente, visto que, anteriormente, $Z = 8.66 + j5.09$.

5 Conclusão

Nesse experimento podemos aprender a desenvolver um circuito de adaptação de impedâncias e sua importância.

Primeiramente conseguimos entender sobre os conceitos teóricos envolvidos, além de aprofundar esse conhecimento com a ajuda do software Qucs.

O experimento nos permitiu entender gradualmente sobre o casamento de impedâncias, no qual inicialmente observamos o comportamento da rede representada apenas por uma impedância, depois passamos a simular com componentes ideais, para assim substituir por componentes reais, nesse caso, da fabricante TDK.

Percebemos dessa gradual modificação a interferência que obtemos na análise da eficiência, potência da fonte, disponível e na carga. Além disso, tivemos que observar o comportamento desses parâmetros variando tanto a parte real como a parte imaginária.

A parte final do experimento pode ser considerada a mais importante pelo fato que nunca conseguiremos utilizar componentes ideais, assim, partindo de componentes comerciais, pode-se desenvolver meios de diminuir as interferências que essas imperfeições causam no circuito.

Vale ressaltar que a técnica proposta é apenas um método desenvolvido para tornar o circuito robusto à essas imperfeições.