



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  $50\Omega$ , nesse caso sendo representada por uma antena. Para chegar a tal objetivo, deve-se ter um estudo sobre adaptação de impedâncias.

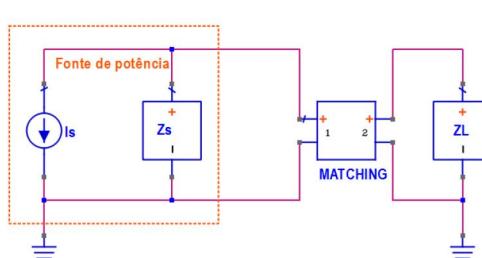
Para projetar tal circuito, primeiramente deve ser feita uma análise teórica e posteriormente simulações utilizando o software Qucs para demonstrar os resultados obtidos.

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

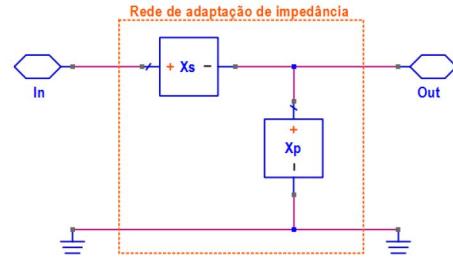
## 2 Valores Teóricos

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



(a) Circuito Analisado



### (b) Rede de Adaptação de Impedância

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

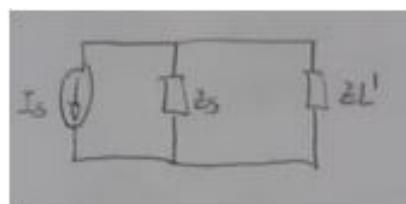
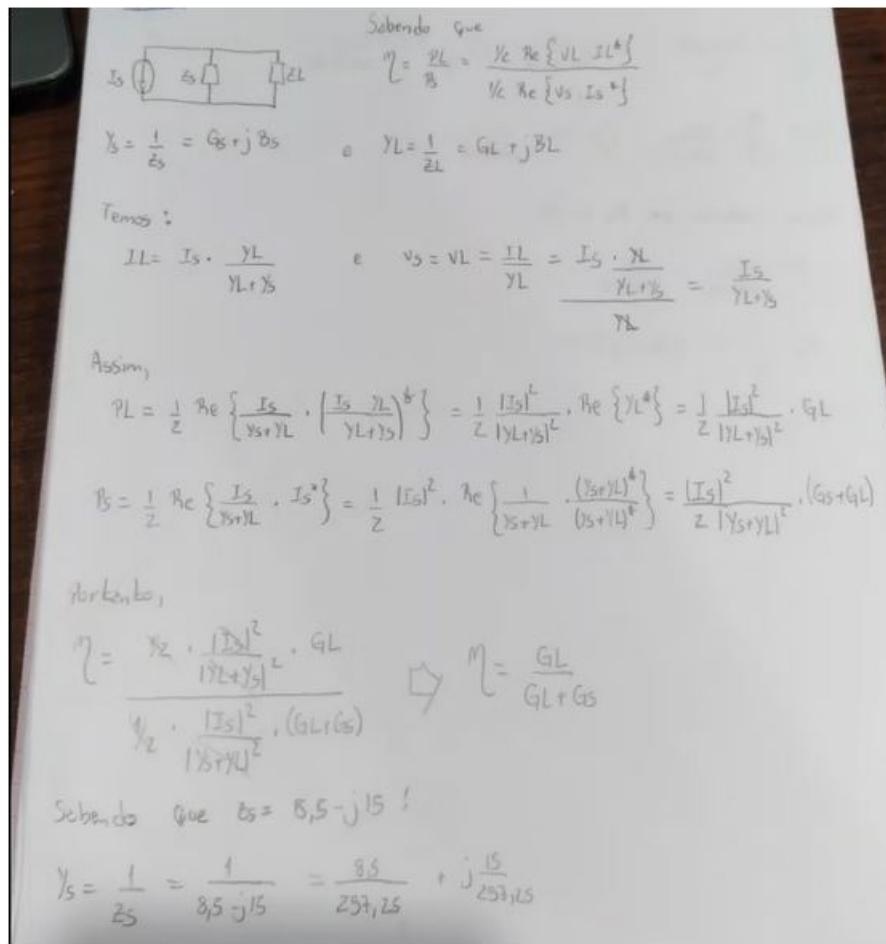


Figura 2: Circuito Teórico Analisado

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



(a) Parte 01

Encanando  $Z_L$ , devemos encontrar os valores de  $X_C$  e  $X_L$   
 $Z_L = X_C + \frac{50 \cdot X_L}{50 + X_L}$   
 $Z_L = \frac{1}{j\omega C} + \frac{50 \cdot j\omega L}{50 + j\omega L}$   
 $Z_L = -\frac{j}{\omega C} + \frac{50 \cdot j\omega L}{50 + j\omega L} = -\frac{j}{\omega C} + \frac{2500 \cdot j\omega L + 50 \cdot j\omega L^2}{2500 + \omega L^2}$   
 Sabendo que  $Z_L = 8,66 + j5,09$  e  $\omega = 2\pi f = 2\pi \cdot 5 \cdot 10^3$   
 $\Rightarrow 8,66 = \frac{50 \cdot \omega^2 L^2}{2500 + \omega^2 L^2} \Rightarrow 8,66 \cdot 2500 + 21650 = 50 \omega^2 L^2$   
 $41,34 \cdot \omega^2 L^2 = 21650 \Rightarrow L^2 = \frac{21650}{41,34 \cdot \omega^2} \Rightarrow L = \frac{1}{\omega} \cdot 22,8846$   
 $L = 7,284 \cdot 10^{-10} \Rightarrow L = 0,7284 \text{nH}$   
 $\Rightarrow S_1,09 \cdot \omega = -\frac{j}{\omega C} + j\frac{2500 \cdot \omega L}{2500 + \omega^2 L^2} = -\frac{j}{\omega C} + j8,32$   
 $\frac{1}{\omega C} = 13,83 \Rightarrow C = 2,30 \cdot 10^{-12} \Rightarrow C = 2,30 \text{pF}$

(b) Parte 02

Como se quer uma eficiência de 75%:  $\eta = 0,75$   
 $\frac{1}{\eta} = \frac{GL + GS}{GL} = 3 + \frac{8,5}{29,75, GL} \Rightarrow \frac{1}{\eta} - 1 = \frac{8,5}{29,75, GL}$   
 $GL = \frac{\eta}{1-\eta} \cdot \frac{8,5}{29,75} \Rightarrow GL = \frac{8,5}{29,75}$   
 Assim, sabendo que  $B_L = -B_s$   
 $Y_L = \frac{29,75}{29,75} - j\frac{15}{29,75}$   
 $Z_L = \frac{1}{Y_L} = 8,66 + j5,09$

(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

$$\begin{aligned} P_{AVS} &= \frac{1}{2} \operatorname{Re} \left\{ Y_L^* \cdot Z_L^* \right\} \Big|_{Z_L^* = Z_S^*} = \frac{1}{2} \operatorname{Re} \left\{ \frac{I_S}{Y_S + Y_L^*} \left( \frac{I_S \cdot Y_L^*}{Y_S + Y_L^*} \right)^* \right\} \\ &= \frac{1}{2} \cdot \frac{|I_S|^2}{|Y_S + Y_L^*|^2} \cdot \operatorname{Re} \left\{ Y_L^* \right\} \quad \text{Fazendo } Z_L^* = Z_S^* \\ &= \frac{1}{2} \cdot \frac{|I_S|^2}{|2Y_S|^2} \cdot \operatorname{Re} \left\{ Y_L^* \right\} \Rightarrow |I_S|^2 = \frac{1}{2} \cdot \frac{|I_S|^2}{|2Y_S|^2} \cdot \frac{8.15}{253.25} \\ &\frac{8.15}{253.25} \cdot 10^{-3} = |I_S|^2 \Rightarrow \boxed{I_S = 35.12 \text{ mA}} \end{aligned}$$

Figura 4: Desenvolvimento para Encontrar o Valor de  $I_S$

Como pode ser observado, o valor encontrado foi:

$$I_S = 15.12mA$$

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

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

### 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

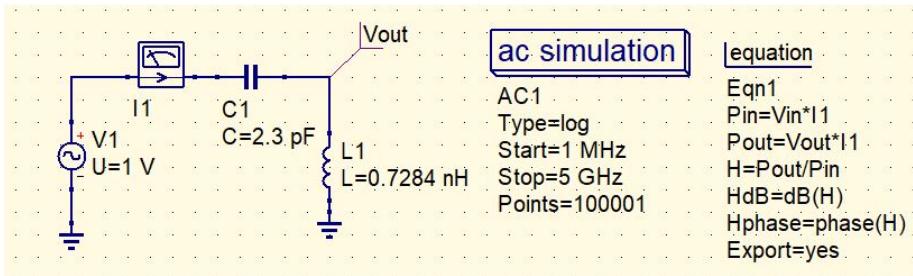


Figura 5: Circuito Desenvolvido para a Rede de Adaptação de Impedância

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

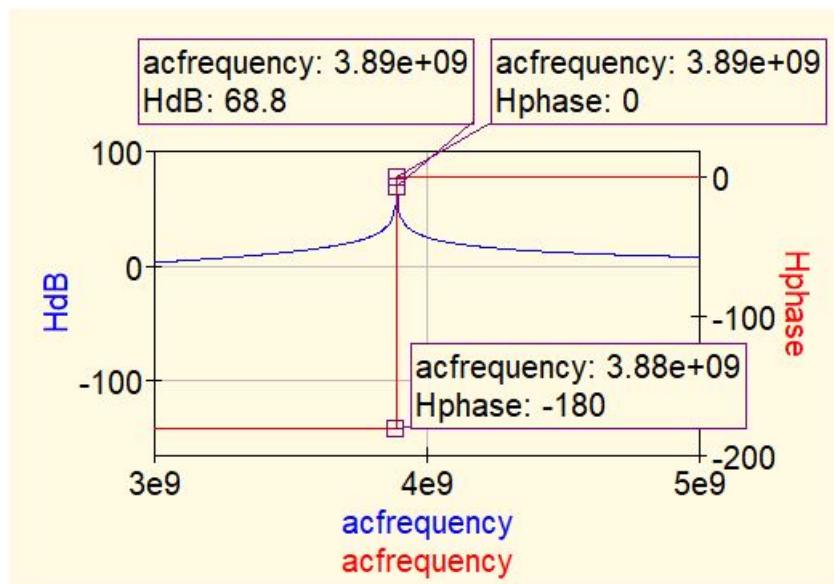


Figura 6: Diagrama de Bode da Rede de Adaptação de Impedância

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

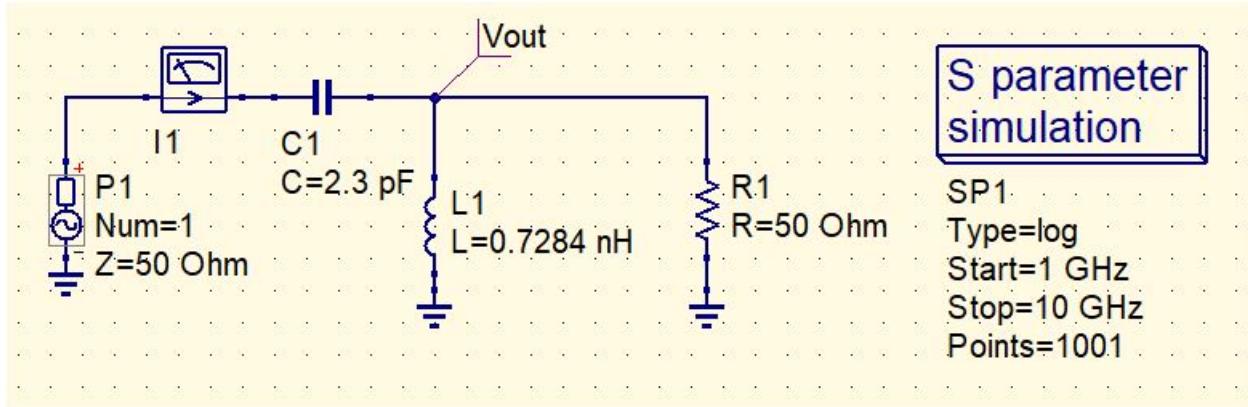


Figura 7: Circuito para Simulação S Parameter Simulation

Os resultados obtidos estão demonstrados na Figura 8

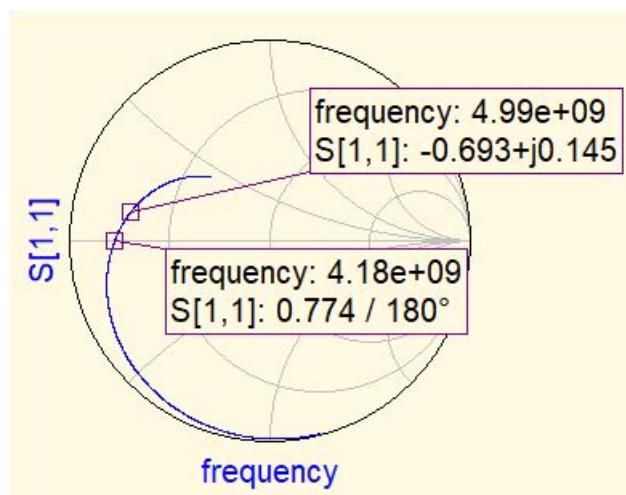


Figura 8: Resultados obtidos do S Parameter Simulation

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

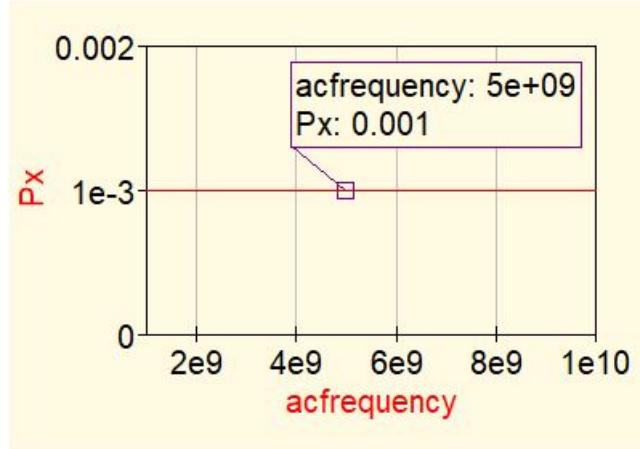


Figura 9: Potência Disponível  $P_{AVS}$  do Circuito Casado

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

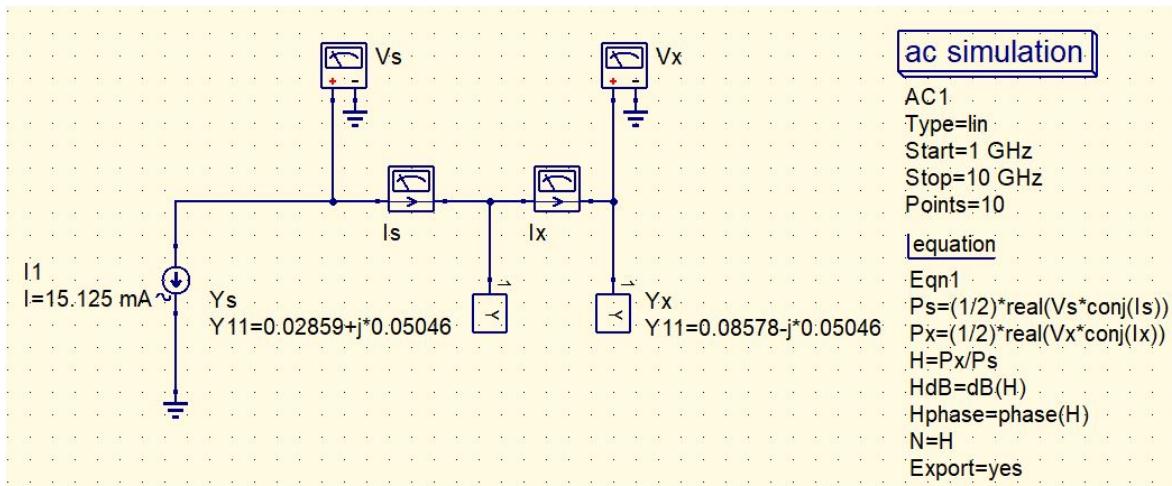


Figura 10: Circuito Simplificado

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:

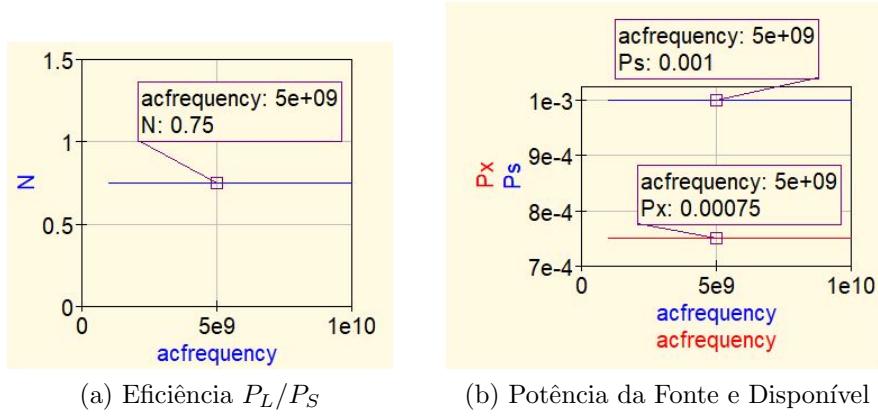


Figura 11: Resultados Obtidos da Eficiência e Potências da Fonte e Disponível

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  $\eta$ , os quais podem ser observados na Figura 12.

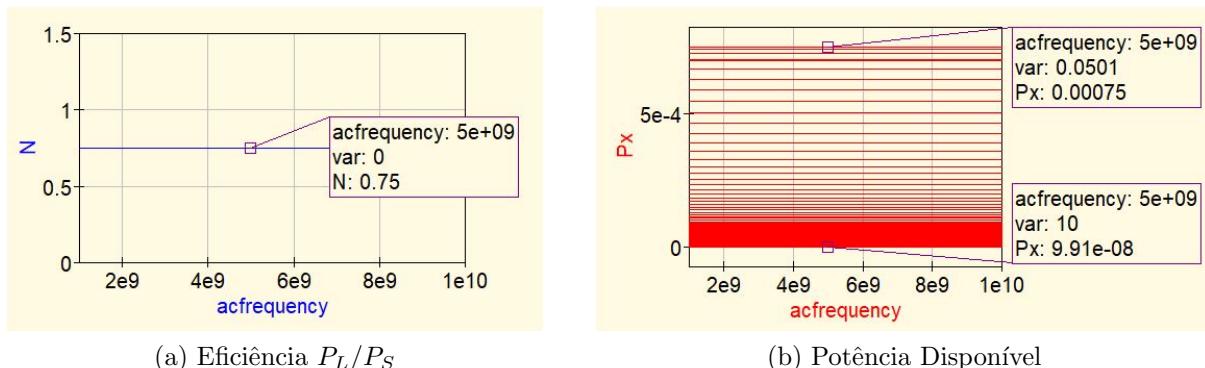


Figura 12: Resultados Obtidos da Eficiência e Potência Disponível Variando a Parte Imaginária de  $Z_X$

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

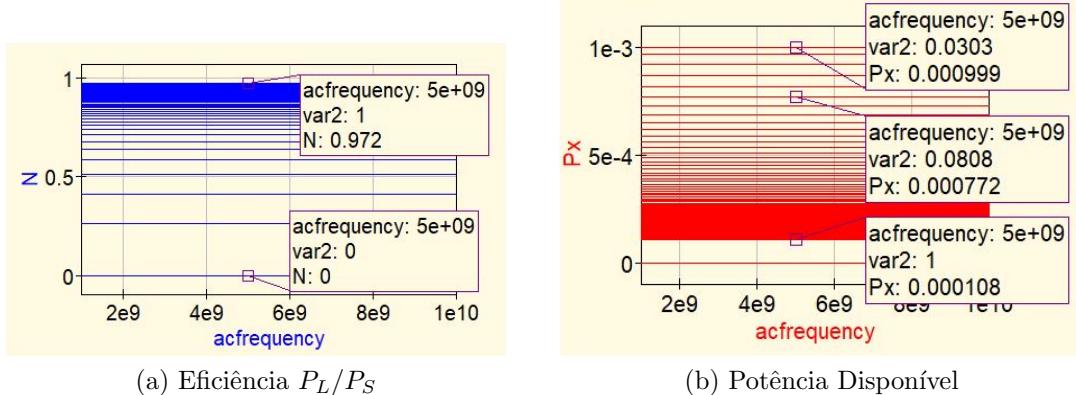


Figura 13: Resultados Obtidos da Eficiência e Potência Disponível Variando a Parte Real de  $Z_X$

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  $G_L$ ,  $\eta$  tende a 1.

Diferente do que aconteceu anteriormente,  $\eta$  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

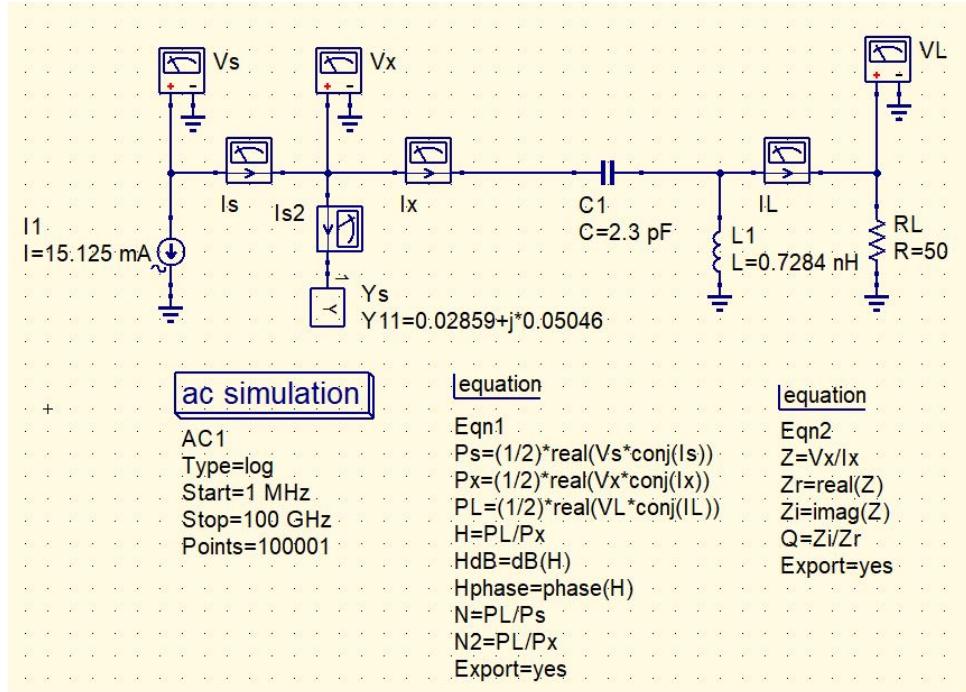


Figura 14: Circuito com Rede de Adaptação de Impedância

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

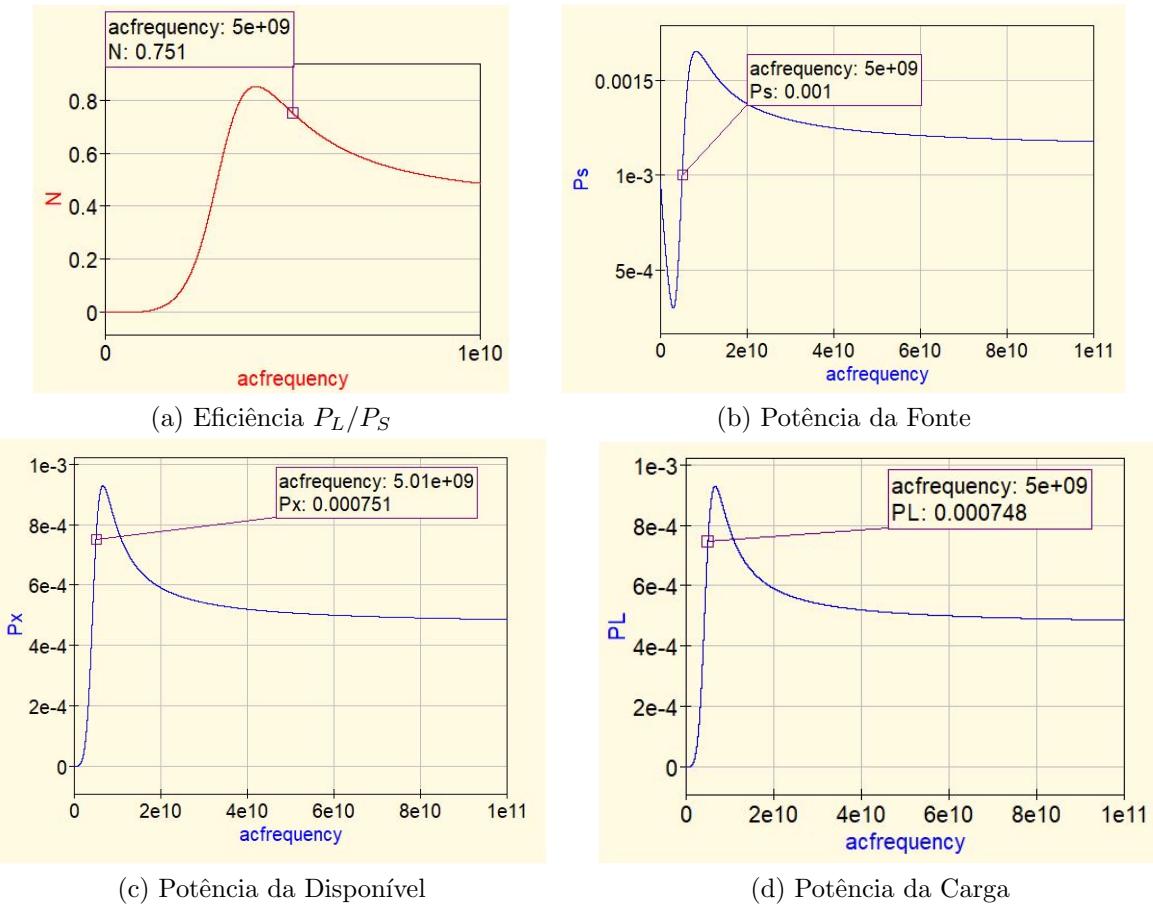


Figura 15: Resultados Obtidos da Eficiência, Potência Fonte, Disponível e na Carga

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

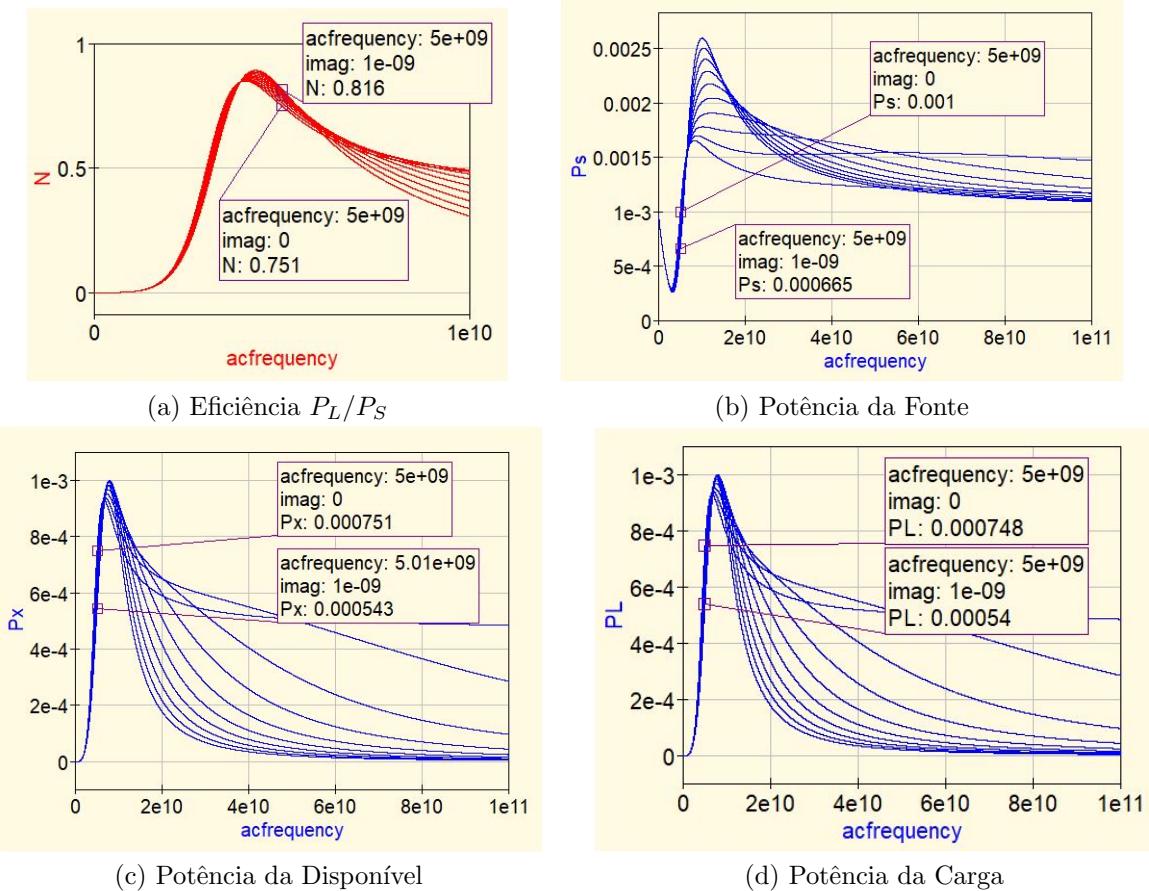


Figura 16: Resultados Obtidos da Eficiência, Potência Fonte, Disponível e na Carga Variando o Valor do Indutor Introduzido em Série com a Carga

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

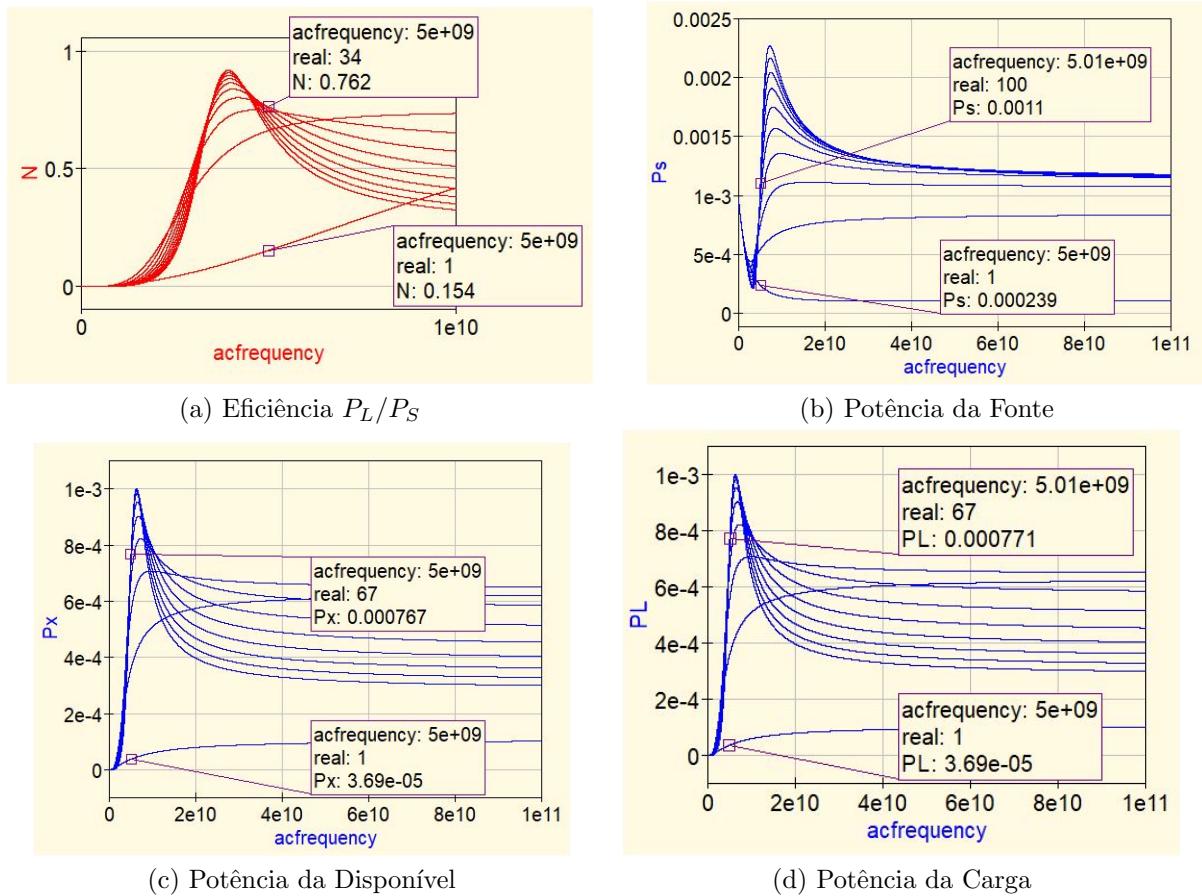


Figura 17: Resultados Obtidos da Eficiência, Potência Fonte, Disponível e na Carga Variando o Valor do Resistor  $R_L$

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 chegassesem 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

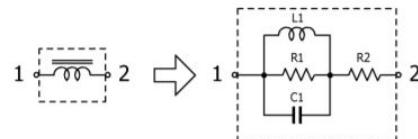


Figura 18: Diagrama do Circuito do Indutor TDK

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

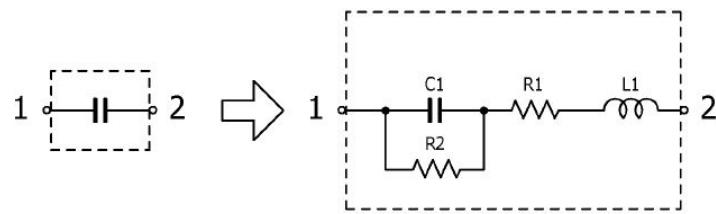


Figura 19: Diagrama do Circuito do Capacitor TDK

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

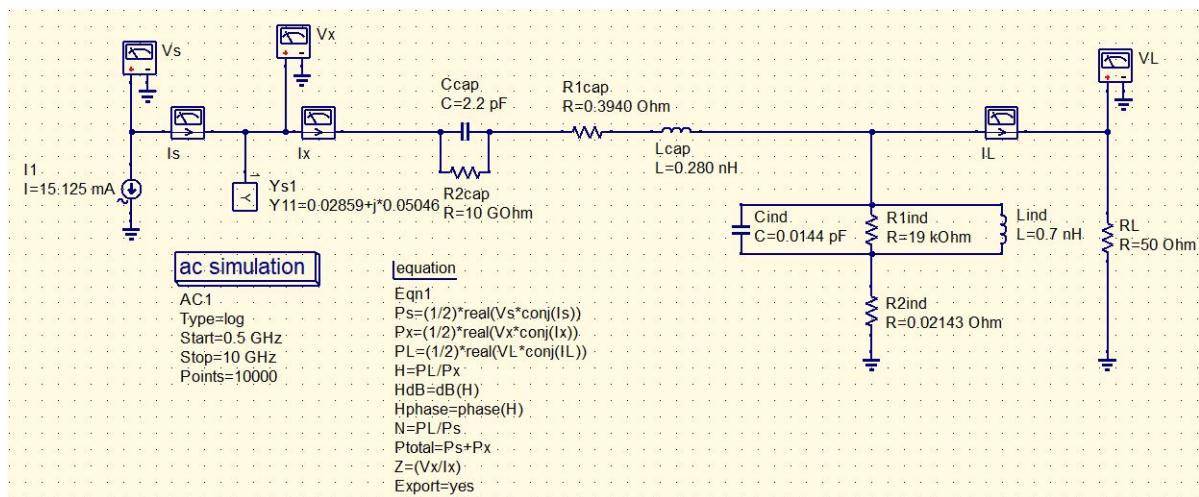


Figura 20: Circuito com Componentes do Fabricante TDK

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

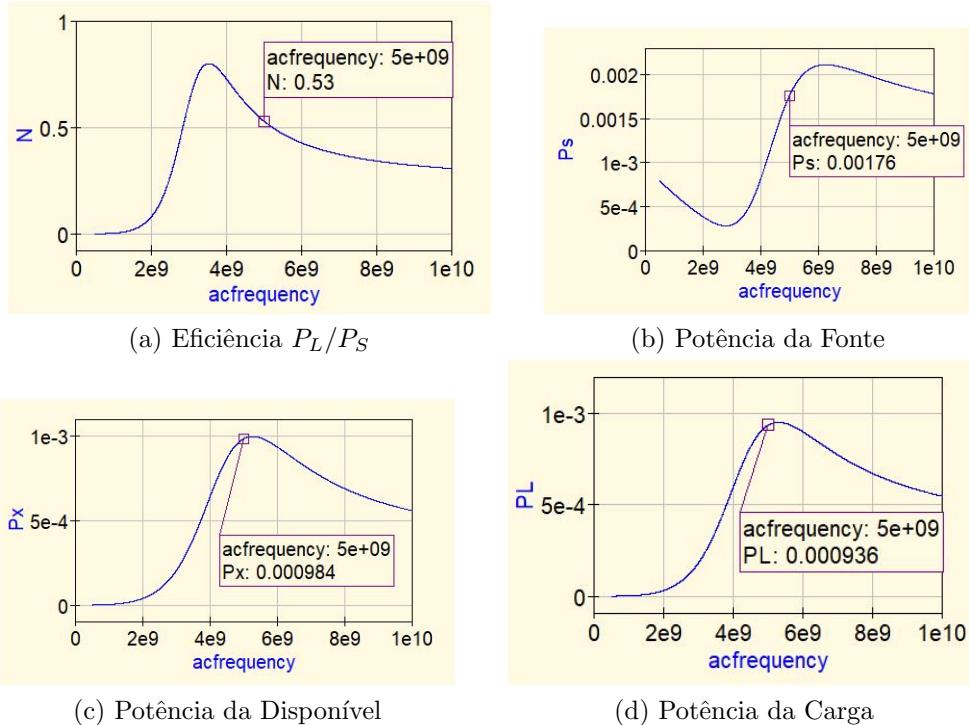


Figura 21: Resultados Obtidos da Eficiência, Potência Fonte, Disponível e na Carga Utilizando Componentes Reais

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

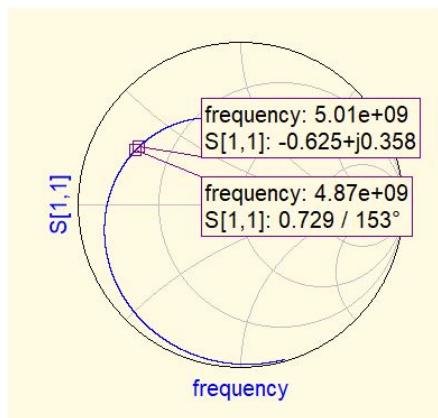


Figura 22: Resultado Obtido do S Parameter Simulation para Rede de Adaptação de Impedâncias+Carga

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

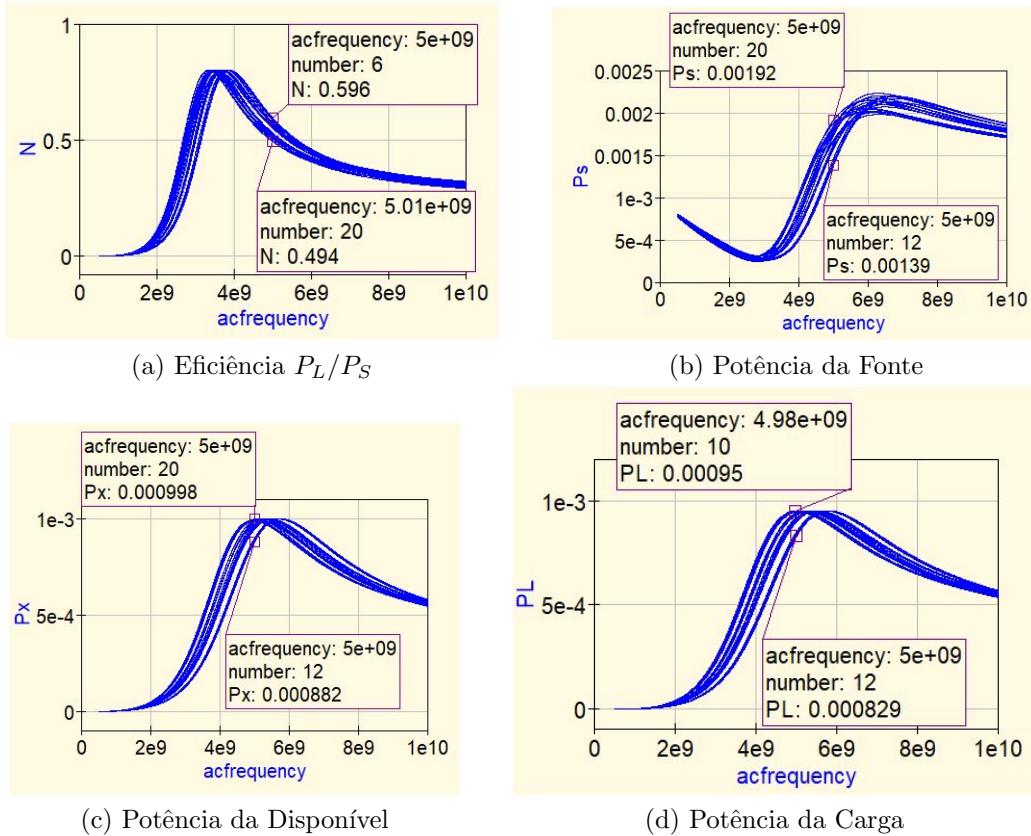


Figura 23: Resultados Obtidos da Eficiência, Potência Fonte, Disponível e na Carga Utilizando Componentes Reais Incluindo a Tolerância e Simulando em Monte Carlo em Função da Frequência

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

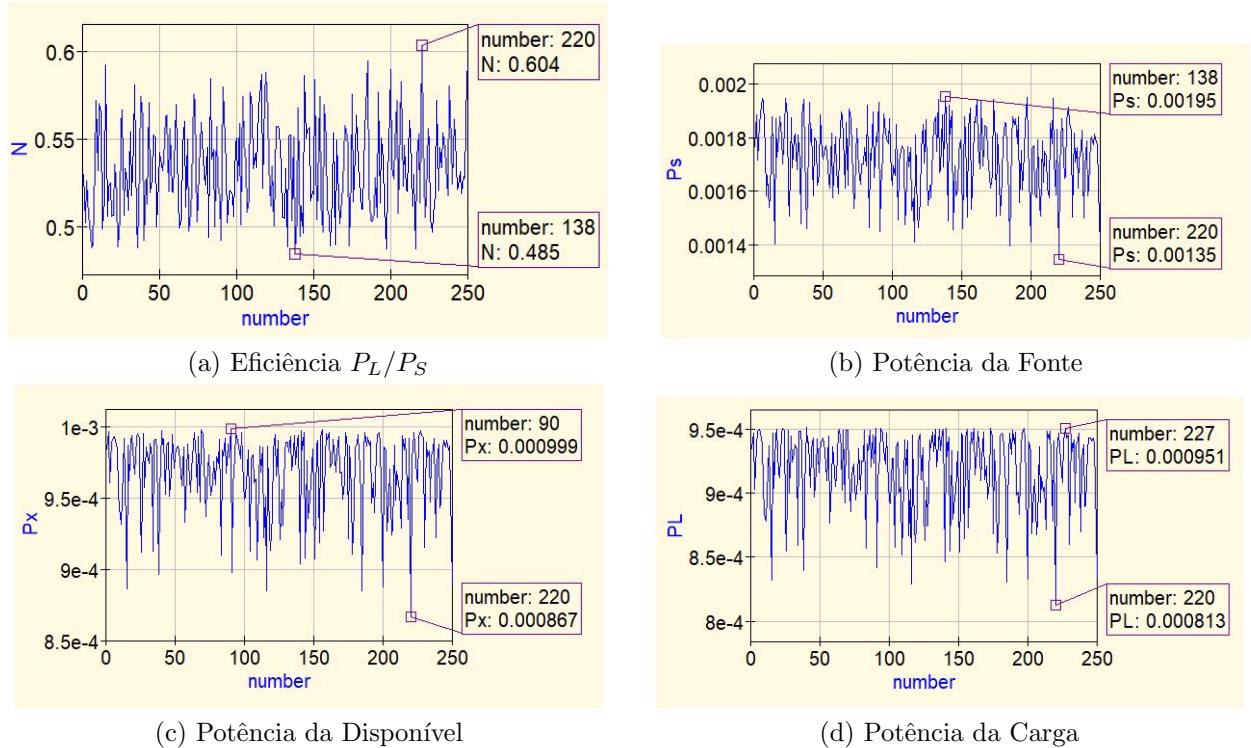


Figura 24: Resultados Obtidos da Eficiência, Potência Fonte, Disponível e na Carga Utilizando Componentes Reais Incluindo a Tolerância e Simulando em Monte Carlo na Frequência de 5GHz

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

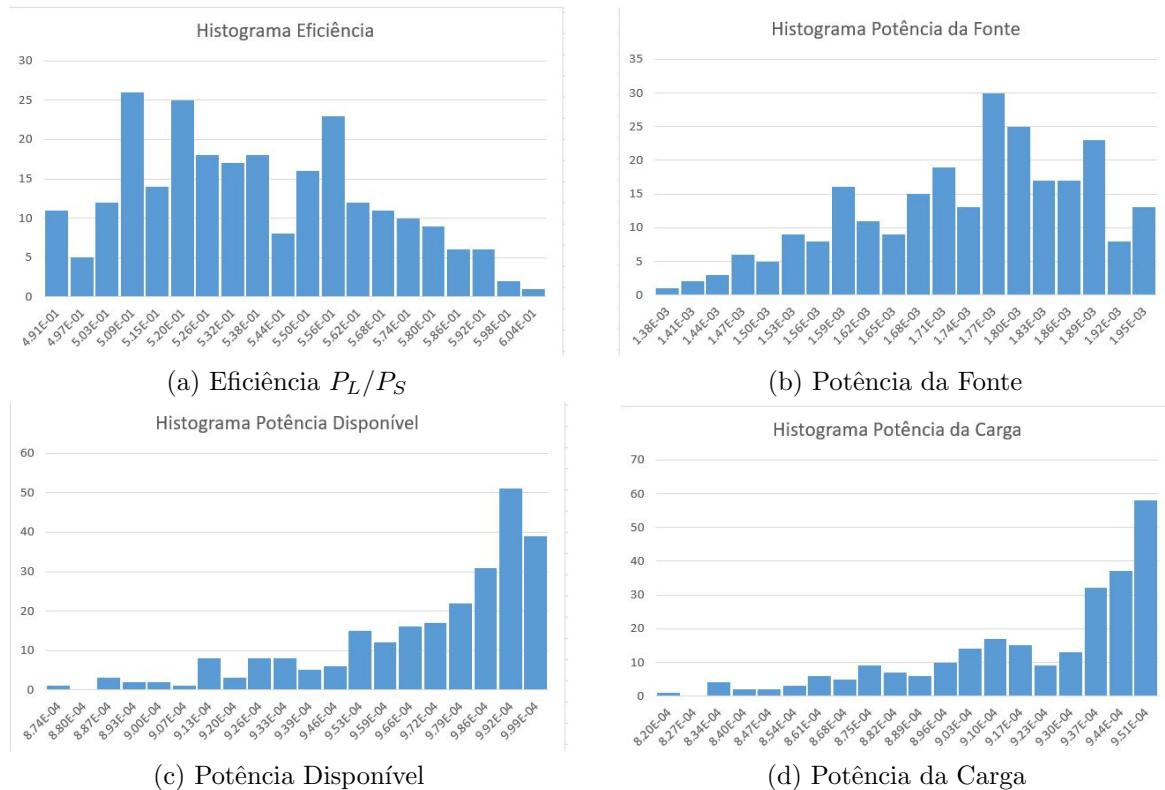


Figura 25: Histograma da Eficiência, Potência Fonte, Disponível e na Carga Utilizando Componentes Reais Incluindo a Tolerância e Simulando em Monte Carlo na Frequência de 5GHz

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

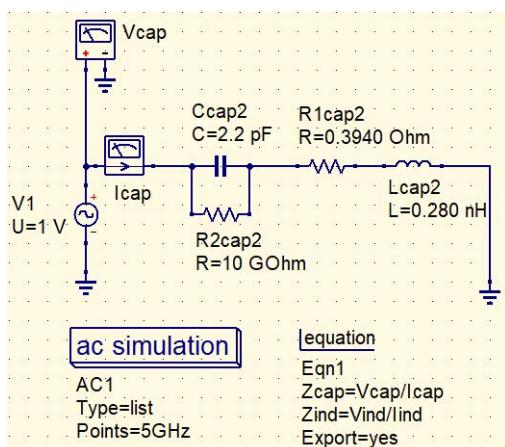
O ultimo passo do experimento é propor uma técnica para deixar o projeto robusto às imperfeições dos componentes, garantindo o atendimento às especificações.

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:

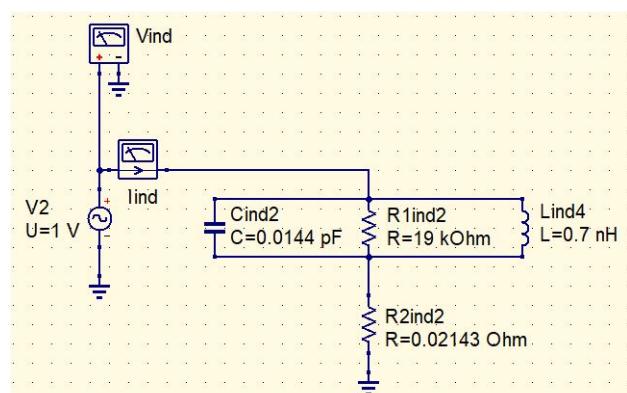
$$Z_{cap} = \frac{1}{jwC} \quad Z_{ind} = jwL$$

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

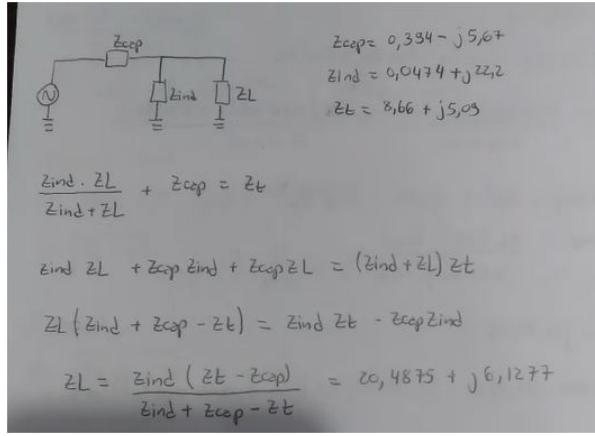


Figura 27: Desenvolvimento para Encontrar  $Z_L$

Assim encontramos que a parte do  $Z_L = 20.4875 + j6.1277$ .  
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  $50\Omega$ , 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

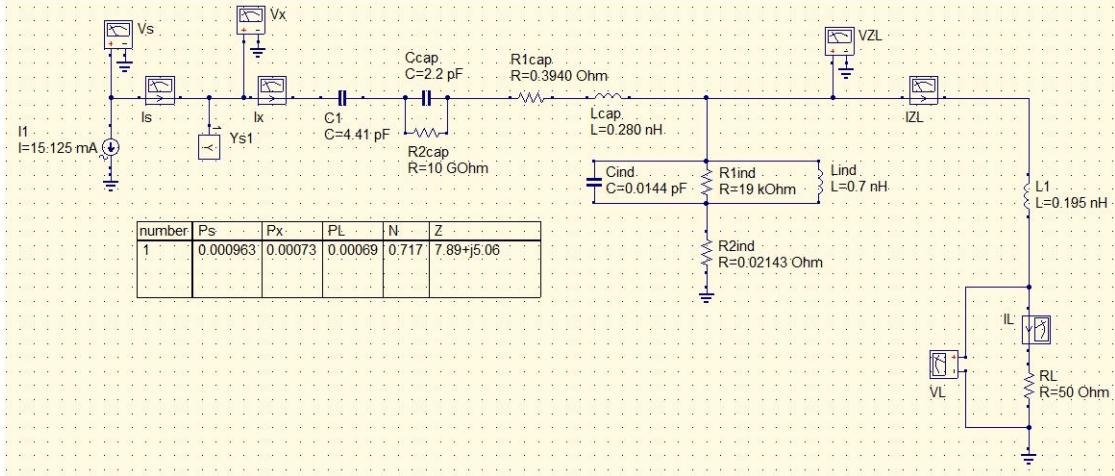
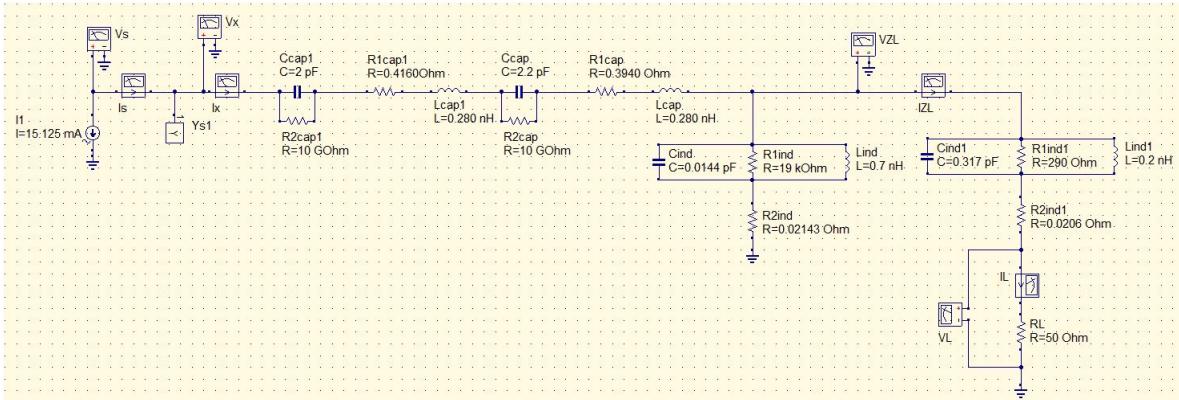


Figura 29: Resultado para um Capacitor Ideal Adicionado em Série com a Rede de Adaptação de Impedância

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

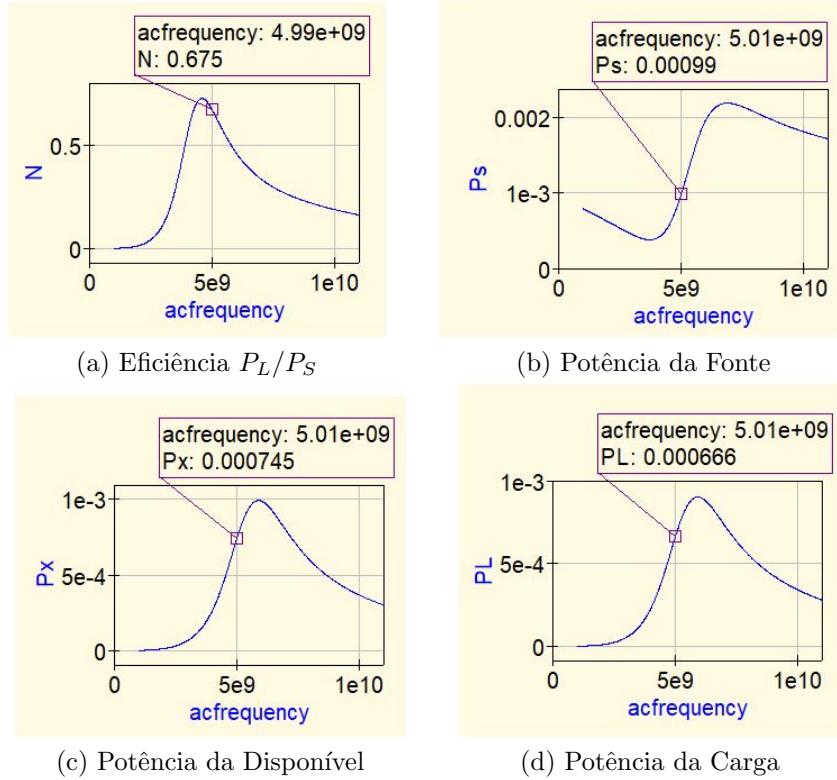


Figura 31: Resultados Obtidos da Eficiência, Potência Fonte, Disponível e na Carga Utilizando Componentes Reais Após os Aprimoramentos com Componentes Reais

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:

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

Caso  $\gamma = \frac{1}{2}$  e  $V_S = V_{rede} = V_L$

$$V_S = \left( I_S + Y_{rede} + \frac{1}{Z_L} \right) \cdot I_S \Rightarrow V_S = \frac{I_S}{Y_S + Y_{rede} + Y_L}$$

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

Sabendo que a potência na carga é dada por:

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

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

A Potência Total

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

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

(a) Desenvolvimento Parte 01

A eficiência é dada por

$$\eta = \frac{P_L}{P_S} = \frac{|I_S|^2}{\frac{1}{2} |I_S|^2 \cdot \frac{(G_S + G_{rede} + G_L)}{|Y_S + Y_{rede} + Y_L|^2}}$$

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

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

(b) Desenvolvimento Parte 02

Figura 32: Desenvolvimento para Encontrar a Expressão de  $\eta$

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 :

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

Podemos obter :

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

Dado :  $\eta = \frac{Y_L}{Y_{Rede}}$  ;

$$\eta = \frac{\frac{|I_S|^2}{z |Y_S + Y_{Rede} + Y_L|^2} \cdot \operatorname{Re} \{ Y_L^* \}}{\frac{|I_S|^2}{z |Y_S + Y_{Rede} + Y_L|^2} \cdot \operatorname{Re} \{ (Y_{Rede} + Y_L)^* \}} \Rightarrow \boxed{\eta = \frac{G_L}{G_{Rede} + G_L} = \frac{G_L}{G_S} \quad |_{Y_{Rede} + Y_L = Y_S^*}}$$

Figura 33: Desenvolvimento para Encontrar a Expressão de  $\eta$

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

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

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  $y_x = y_{rede} + y_L \Rightarrow y_x = Gx + jBx$

Divido

$$\eta_L = \frac{GL}{G_S + G_{rede} + GL} \Rightarrow GL = \eta_L (G_S + G_{rede} + GL)$$

$$GL - \eta_L GL = \eta_L (G_S + G_{rede})$$

Assim,

$$GL = \frac{\eta_L}{1 - \eta_L} \cdot (G_S + G_{rede})$$

Alema disso,

$$\eta_L = \frac{GL}{G_{rede} + GL} \Rightarrow \eta_L G_{rede} = GL - \eta_L GL = (1 - \eta_L) GL$$

$$G_{rede} = \frac{1 - \eta_L}{\eta_L} \cdot GL$$

Portanto,

$$GL = \underbrace{\frac{\eta_L}{1 - \eta_L} G_S}_{K} + \frac{\eta_L}{1 - \eta_L} \left( \frac{1 - \eta_L}{\eta_L} \right) GL = K + \frac{\eta_L - \eta_L \eta_L}{\eta_L - \eta_L \eta_L} GL$$

$$GL + \frac{\eta_L \eta_L - \eta_L}{\eta_L - \eta_L \eta_L} GL = K \Rightarrow K = GL \left( \frac{\eta_L - \eta_L \eta_L + \eta_L \eta_L - \eta_L}{\eta_L - \eta_L \eta_L} \right)$$

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

$$\frac{\eta_L}{1 - \eta_L} G_S = \frac{\eta_L - \eta_L}{\eta_L - \eta_L \eta_L} GL$$

$$GL = \frac{\eta_L G_S (\eta_L - \eta_L \eta_L)}{(1 - \eta_L)(\eta_L - \eta_L)} = \frac{\eta_L \eta_L G_S (1 - \eta_L)}{(1 - \eta_L)(\eta_L - \eta_L)}$$

$$GL = \frac{\eta_L \eta_L}{\eta_L - \eta_L} G_S$$

Pelo enunciado 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,

$$y_L = \frac{\eta_L \eta_L}{\eta_L - \eta_L} G_S - (j B_S + B_{rede})$$

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

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

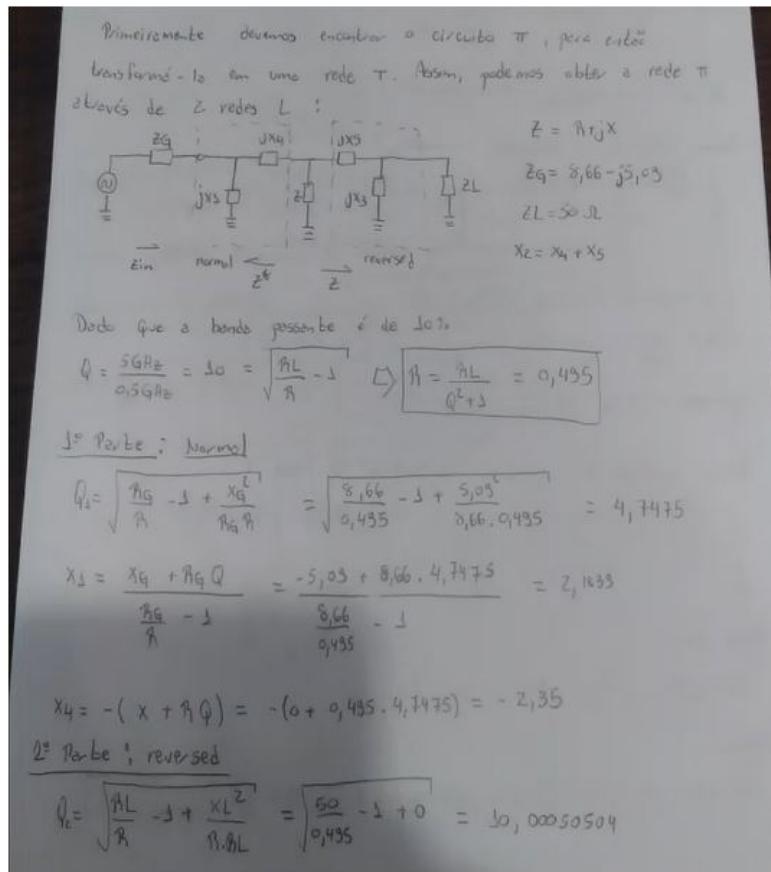


Figura 36: Desenvolvimento para a Transformação de uma Rede L para uma Rede T Parte 01

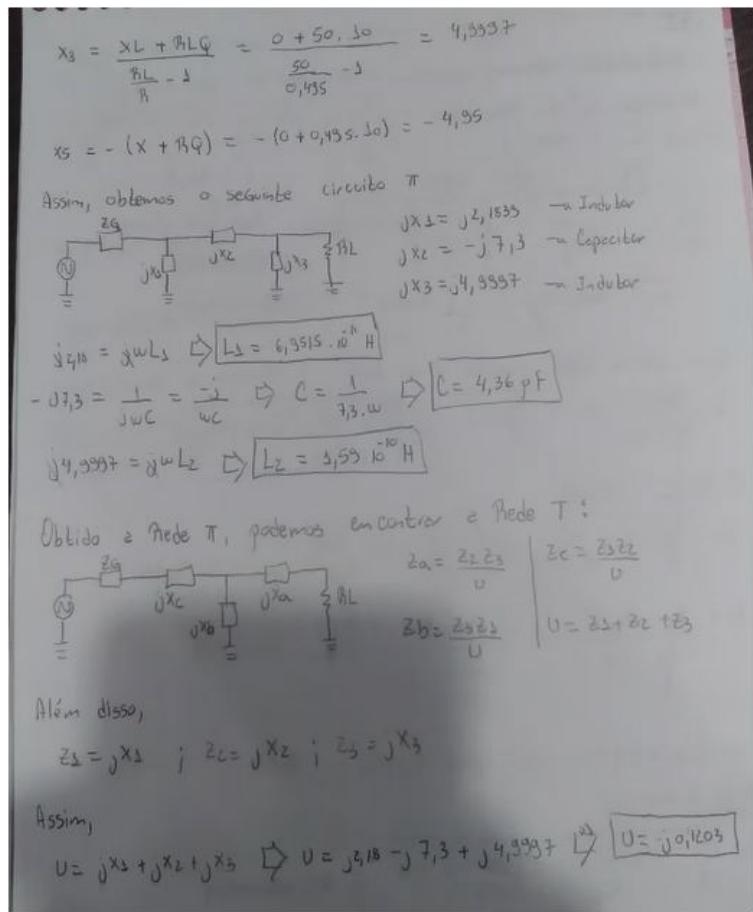


Figura 37: Desenvolvimento para a Transformação de uma Rede L para uma Rede T Parte 02

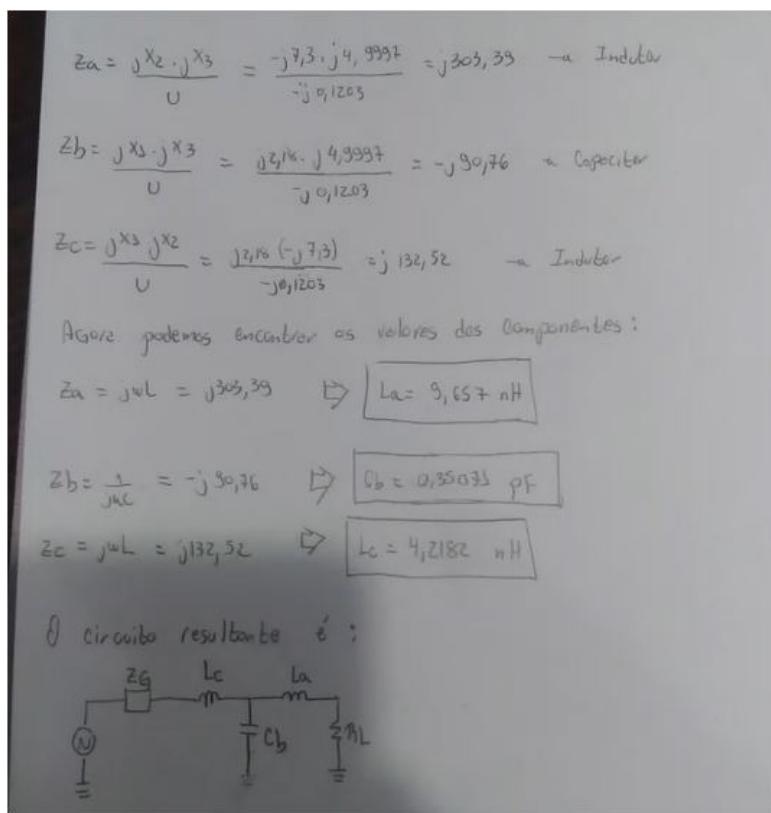


Figura 38: Desenvolvimento para a Transformação de uma Rede L para uma Rede T Parte 03

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

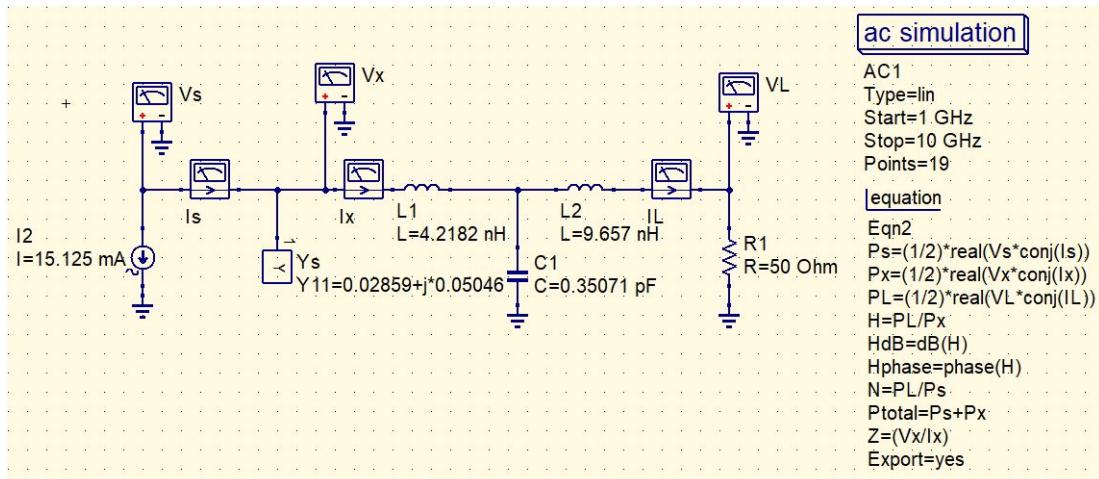


Figura 39: Circuito da Rede T

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

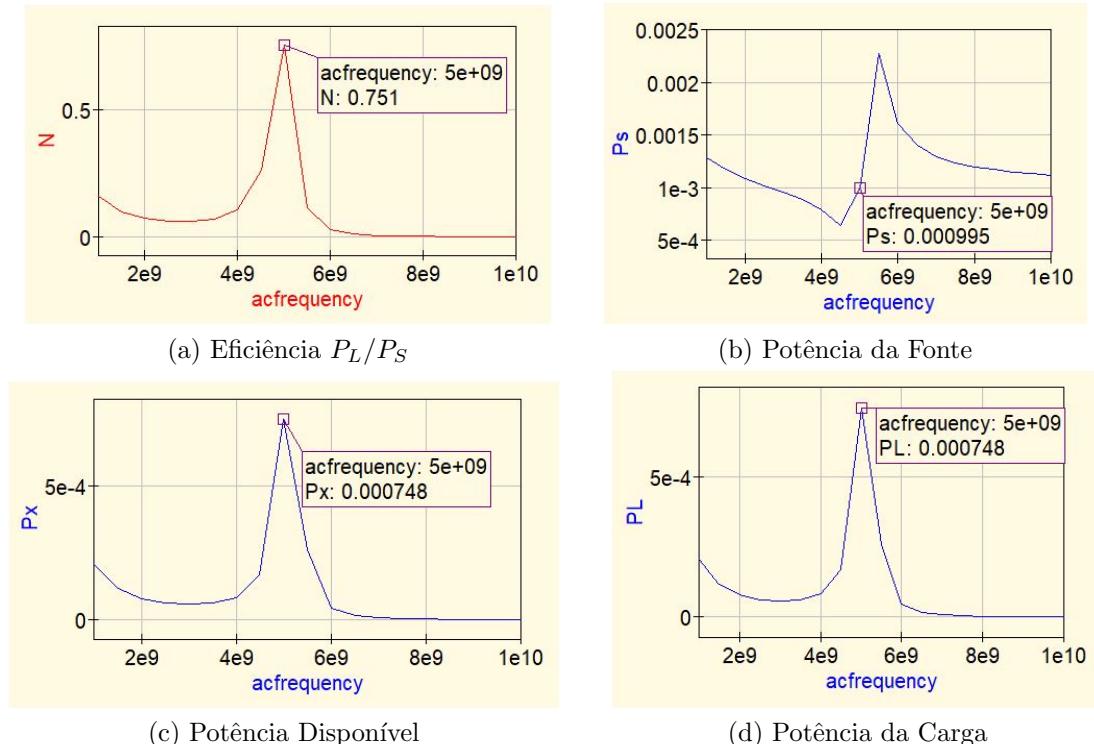


Figura 40: Resultados das Simulações da Eficiência, Potências da Fonte, Disponível e na Carga

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

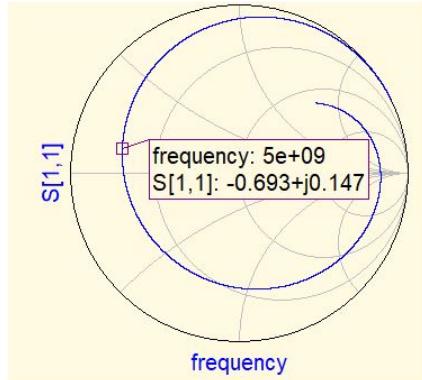


Figura 41: Resultado Obtido do S Parameter Simuation para Rede T Desenvolvida

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 ideias, 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.