



UNIVERSIDADE  
ESTADUAL DE LONDRINA



---

Alex Archela  
Jessica Fernanda Pereira Zamaia

## Laboratório 11- Redes Adaptadoras de Impedância.

Data de realização do experimento:  
2 de Agosto de 2014.  
Turma:  
1011  
Prof. Jaime

Londrina, 16 de Agosto de 2014.

---

# Sumário

<b>1</b>	<b>Introdução</b>	<b>2</b>
<b>2</b>	<b>Objetivos</b>	<b>3</b>
<b>3</b>	<b>Introdução Teórica</b>	<b>4</b>
3.1	Transformação de impedâncias . . . . .	4
3.2	Rede L . . . . .	5
3.3	Rede $\pi$ . . . . .	5
3.4	Rede T . . . . .	6
3.5	Rede duplo L . . . . .	7
<b>4</b>	<b>Metodologia Experimental</b>	<b>8</b>
4.1	Materiais . . . . .	8
4.2	Métodos . . . . .	8
<b>5</b>	<b>Resultados</b>	<b>10</b>
<b>6</b>	<b>Conclusões</b>	<b>17</b>

# 1 Introdução

Redes adaptadoras de impedância tem como objetivo principal a obtenção da máxima transferência de energia da fonte para a carga de um sistema. Esta condição evita a reflexão de energia da carga para a fonte fazendo com que as redes adaptativas se tornem um importante objeto de estudo. Neste trabalho serão desenvolvidas técnicas de adaptação para redes L,  $\pi$  e T.

## 2 Objetivos

O trabalho têm como ênfase a análise e sínteses de redes adaptadoras de impedância de banda estreita e banda larga. Serão projetada, analisadas e implementadas redes reativas na adaptação de impedância em um intervalo de frequência estreito e/ou relativamente largo.

### 3 Introdução Teórica

#### 3.1 Transformação de impedâncias

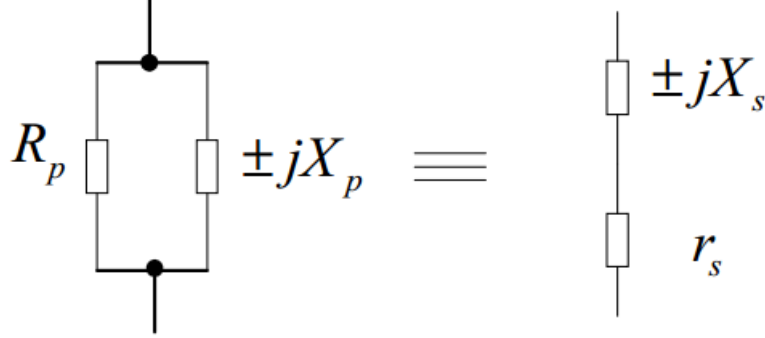


Figura 1: Equivalência de impedâncias paralelo-série para banda estreita.

Para projetarmos redes adaptadoras de impedância é impotente, previamente, lembrarmos alguns conceitos. Para os circuitos da Figura 1, temos que:

$$R_p = r_s(Q^2 + 1); \quad (1)$$

$$X_p = X_s\left(\frac{1}{Q^2} + 1\right); \quad (2)$$

onde

$$Q = \frac{R_p}{X_p} = \frac{X_s}{r_s} = \sqrt{\frac{R_p}{r_s} - 1}; \quad (3)$$

A idéia geral em uma rede adaptativa Z é forçar a  $Z_{Load}$  parecer-se com o complexo conjugado da  $Z_{source}$ .

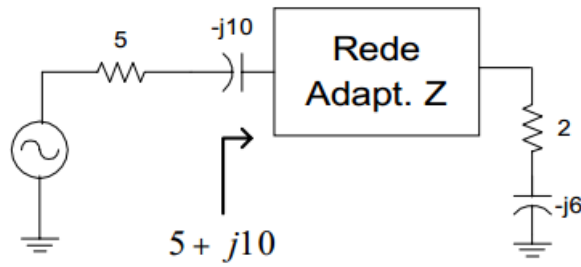


Figura 2: Exemplo de adaptação de impedância.

Vale lembrar que esse tipo de adaptação só é válida para uma única frequência. Para outras frequências o casamento de impedância torna-se progressivamente pior ou inexistente. No entanto, existem métodos que aumentam a largura de banda onde o casamento é quase perfeito. Entre eles estão a rele L, a rede  $\pi$  e a rede T.

### 3.2 Rede L

A rede L é a mais simples das redes e é largamente utilizada por isso. A rede L pode ser Passa-Baixas ou Passa-Altas, porém como neste trabalho o intuito da rede L é bloquear componentes DC, trabalharemos com a rede L Passa-Altas.

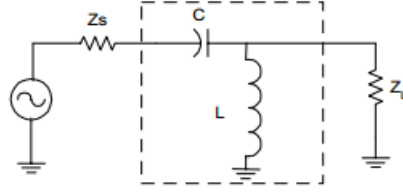


Figura 3: Rede L passa-altas.

Para o projeto de uma rede L, precisamos determinar seu valores de capacitância e indutância.

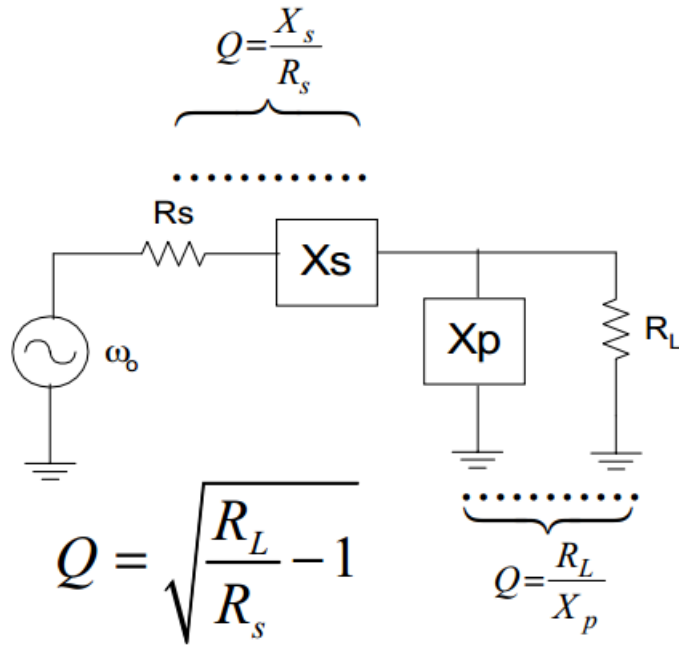


Figura 4: Parâmetros de projeto da rede L.

Fator de qualidade em redes L está definido (fixo) pela relação entre  $R_L$  e  $R_S$ . Não há liberdade de escolha para o índice de qualidade o que é um dos grandes problemas no projeto de redes de banda estreita. Para resolver este problema, surgem as redes de três elementos que permitem obter adaptação de  $Z$  de banda estreita com alto  $Q$ .

### 3.3 Rede $\pi$

A rede  $\pi$ , é a associação de 2 redes L (back-to-back) configuradas para casar fonte à carga através de um resistor virtual.

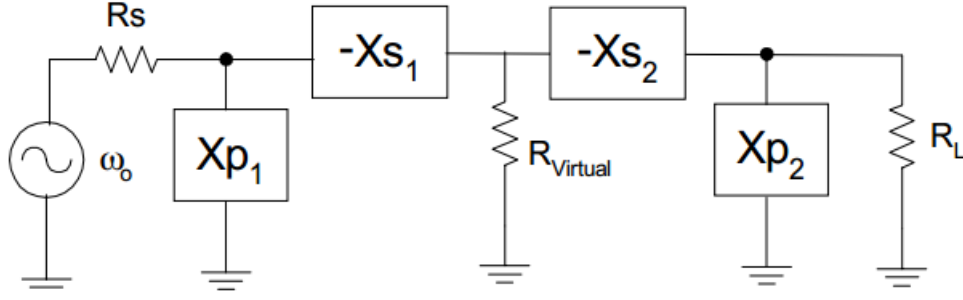


Figura 5: Parâmetros de projeto da rede  $\pi$ .

Na Figura 5,  $X_{s1}$  indica reatância de natureza oposta a  $X_{p1}$ , isto é, se  $X_{p1}$  representa uma reatância capacitiva, e  $X_{s1}$  indica uma reatância indutiva o mesmo acontece em relação a  $X_{s2}$  e  $X_{p2}$ .

O projeto da rede  $\pi$  é semelhante ao da rede L. A resistência virtuaal  $R_V \leq \min R_s; R_L$ , e deve ser definida em função do Q carregado desejável da rede:

$$Q_{rede\pi} = \sqrt{\frac{R_H}{R_V} - 1}; \quad (4)$$

onde  $R_H = \max R_s; R_L$ .

### 3.4 Rede T

O projeto da rede T segue as mesmas etapas do projeto de uma rede  $\pi$ . Neste tipo de rede, também deve-se adaptar a impedância da fonte à da carga via  $R_{Virtual}$ . A resistência virtual na rede T é:  $R_V \geq \max R_s; R_L$ .

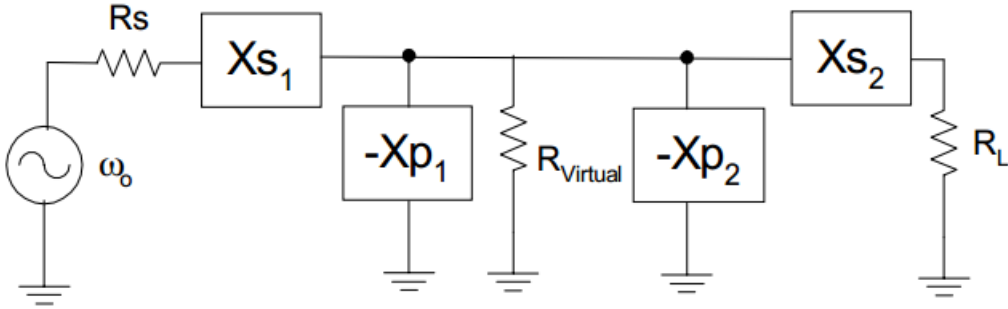


Figura 6: Parâmetros de projeto da rede T.

Este tipo de rede é utilizada para adaptar duas impedâncias de baixo valor associado à necessidade de acoplamento em banda estreita (alto Q).

Q carregado da rede T é determinado pela seção L de maior Q (isto ocorre na terminação da seção L que tiver o menor resistor série de terminação), isto é  $R_{Small} = \min R_s; R_L$ .

$$Q_{redeT} = \sqrt{\frac{R_V}{R_{Small}} - 1}; \quad (5)$$

### 3.5 Rede duplo L

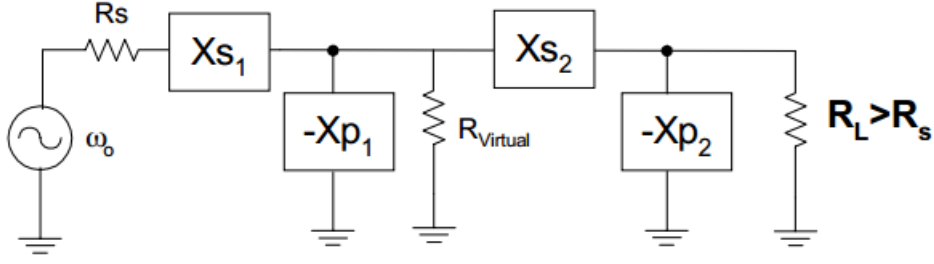


Figura 7: Parâmetros de projeto da rede duplo L.

Uma vez que em uma rede L, definido  $R_s$  e  $R_L$ , fica determinado o índice de qualidade carregado da rede. Para adaptação de  $Z$  em circuitos de Banda Larga, usa-se duas (ou mais) Redes L em cascata (ou série). Para esse tipo de rede adaptadora, a resistência virtual está sempre entre os valores das resistências de fonte e carga. O índice de qualidade desse tipo de rede é menor que os de uma rede L simples, rede L ou rede  $\pi$ . O valor de  $Q$  é dado por:

$$Q_{RedemltiploL} = \sqrt{\frac{R_V}{R_{min}} - 1} = \sqrt{\frac{R_{max}}{R_V} - 1}; \quad (6)$$

onde a máxima banda de passagem ( ou mínimo  $Q$ ) é obtida quando:

$$R_V = \sqrt{R_s R_L}; \quad (7)$$

Conforme a necessidade de BW seja maior, mais redes L devem ser cascadeadas.

As etapas de projeto para redes WBand de  $n$  seções L são as mesmas que as anteriores: basta solucionar a equação para um específico  $Q$  carregado baixo de projeto, obtendo  $R_V$  e seguir os passos já discutidos para uma rede L simples.



## 4 Metodologia Experimental

### 4.1 Materiais

- Software PSpice;

### 4.2 Métodos

Inicialmente, a partir do circuito da figura abaixo, foi projetada uma rede adaptadora L de impedância com dois elementos tal que  $Z_{in}$  e  $\omega_0$  eram previamente especificados como  $50\Omega$  e  $4300 \text{ krd/s}$ . A impedância de saída foi definida como sendo de  $4,7 \Omega$ .

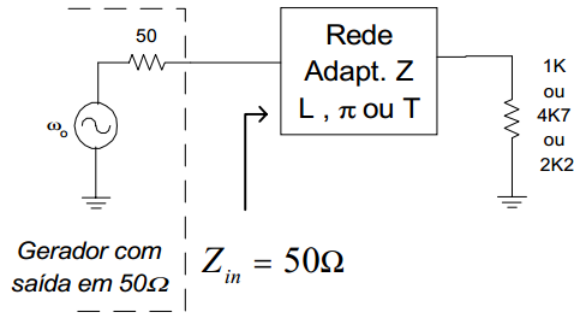


Figura 8: Rede adaptadora de impedância.

Para esse primeiro projeto, foi admitido que a rede tinha a função de bloquear a eventual componente DC da fonte. A rede adaptadora projetada é mostrada a seguir.

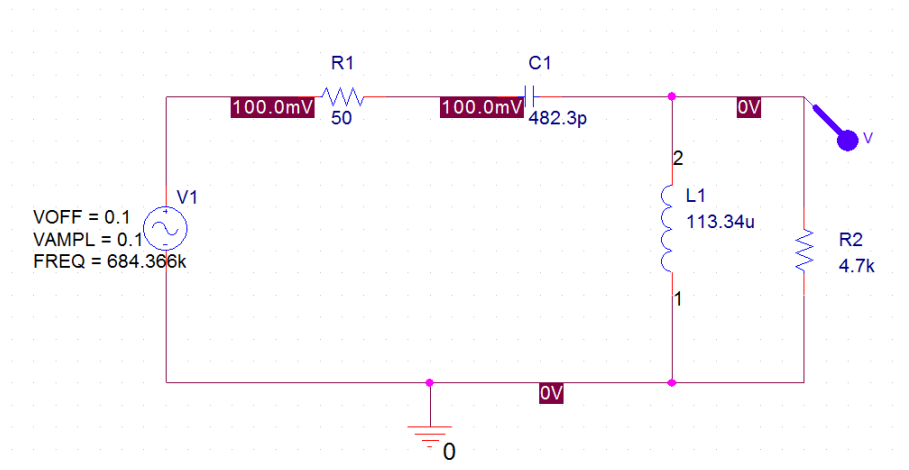


Figura 9: Rede adaptadora L de impedância.

Um sinal senoidal de frequência  $\omega_0$  e amplitude da ordem de centenas de milivolts de pico foi injetado na entrada do circuito. As formas de onda na entrada e na saída foram observadas. A frequência do sinal senoidal foi variada até obter o perfeito casamento de impedância entre fonte e carga. O índice de mérito do circuito completo foi medido e a banda de passagem da rede foi encontrada a partir da equação:

$$BW = \frac{A_{max}}{\sqrt{2}}; \quad (8)$$

Para um segundo projeto, uma rede adaptativa  $\pi$  com três elementos foi montada admitindo que não havia restrição para o bloqueio de eventuais componentes DC entre fonte e carga.

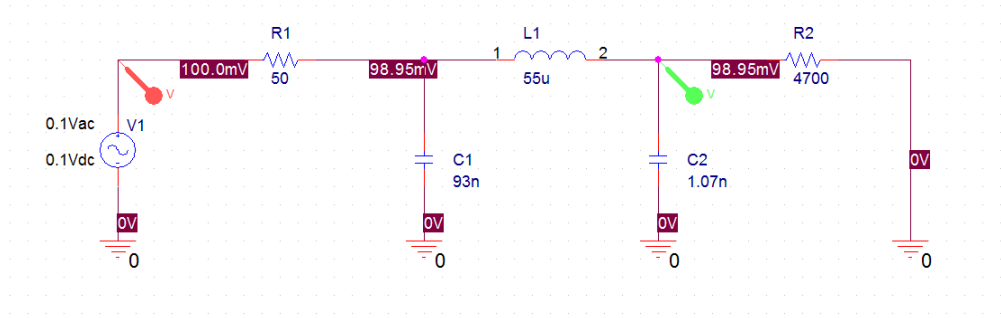


Figura 10: Rede adaptadora  $\pi$  de impedância.

Para esse novo projeto a frequência do sinal senoidal na entrada foi variado até se obter um perfeito casamento de impedância entre fonte e carga o índice de mérito da rede foi medido. Por fim, para esse projeto, o valor da banda de passagem foi encontrado utilizando a mesmo critério já mostrado anteriormente.

Por fim, uma rede adaptadora de banda larga foi projetada. A partir do problema de adaptação de impedância, foi calculada e implementada uma rede de banda larga de 2 seções L de tal forma a maximizar a banda de passagem. Nesta condição, foi calculado o índice de qualidade carregado do circuito.

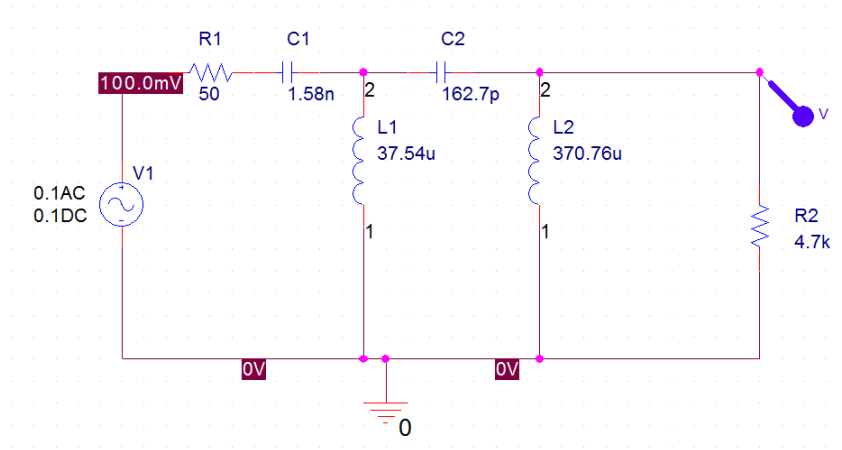


Figura 11: Rede adaptadora L de impedância.

Foi obtida a BW da rede adotando o mesmo critério utilizado anteriormente na obtenção da BW da rede de banda estreita. E o incremento na BW com relação ao caso anterior foi comparado. Por fim, foi medido o índice de mérito da rede.

## 5 Resultados

Para o projeto da rele L, consideramos uma impedância de entrada de 50 ohms, uma impedância de saída de 4700 ohms e uma frequência deu 4300 k rad/s que equivale a 684,366 kHz.

$$\frac{\omega_0}{2\pi} = f = \frac{4300000}{2\pi} = 684,366kHz; \quad (9)$$

A partir desses dados conseguimos encontrar um valor de Q igual a 9,6436.

$$Q = \sqrt{\frac{R_L}{R_S} - 1} = \frac{\frac{4700}{50} - 1}{=} 9,6436; \quad (10)$$

Assim, a partir de Q estabelecemos os valores de L e C que são de 113,34 uH e 482,3 pF respectivamente.

$$Q = \frac{X_S}{R_S} = \frac{R_P}{X_P}; \quad (11)$$

$$Q = \frac{R_P}{X_P} = \frac{4700}{X_P} = 9,6436; \quad (12)$$

$$X_P = 487,36; \quad (13)$$

$$L = \frac{X_P}{\omega_0} \quad (14)$$

$$L = 113,34uH; \quad (15)$$

$$Q = \frac{X_S}{R_S} = \frac{X_S}{50} = 9,6436; \quad (16)$$

$$X_S = 482,18; \quad (17)$$

$$C = \frac{1}{\omega_0 X_S}; \quad (18)$$

$$C = 482,3pF; \quad (19)$$

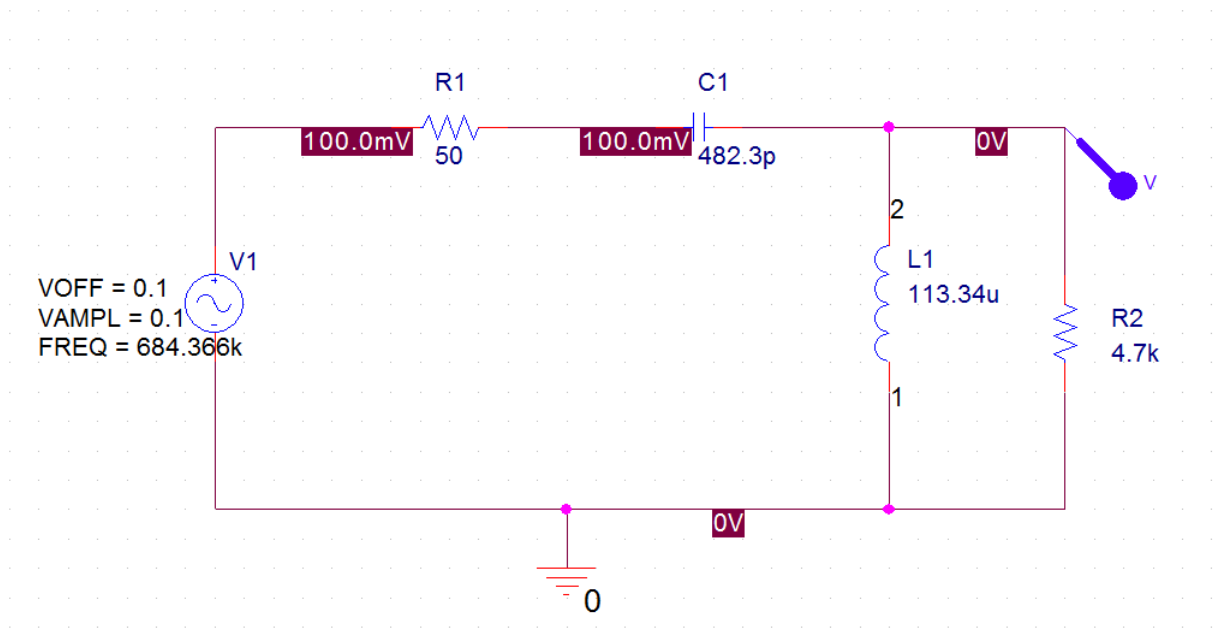


Figura 12: Rede L projetada.

Após projetado o circuito, os sinais de entrada na fonte, entre resistência de fonte e o capacitor e no resistor de carga foram visualizados.

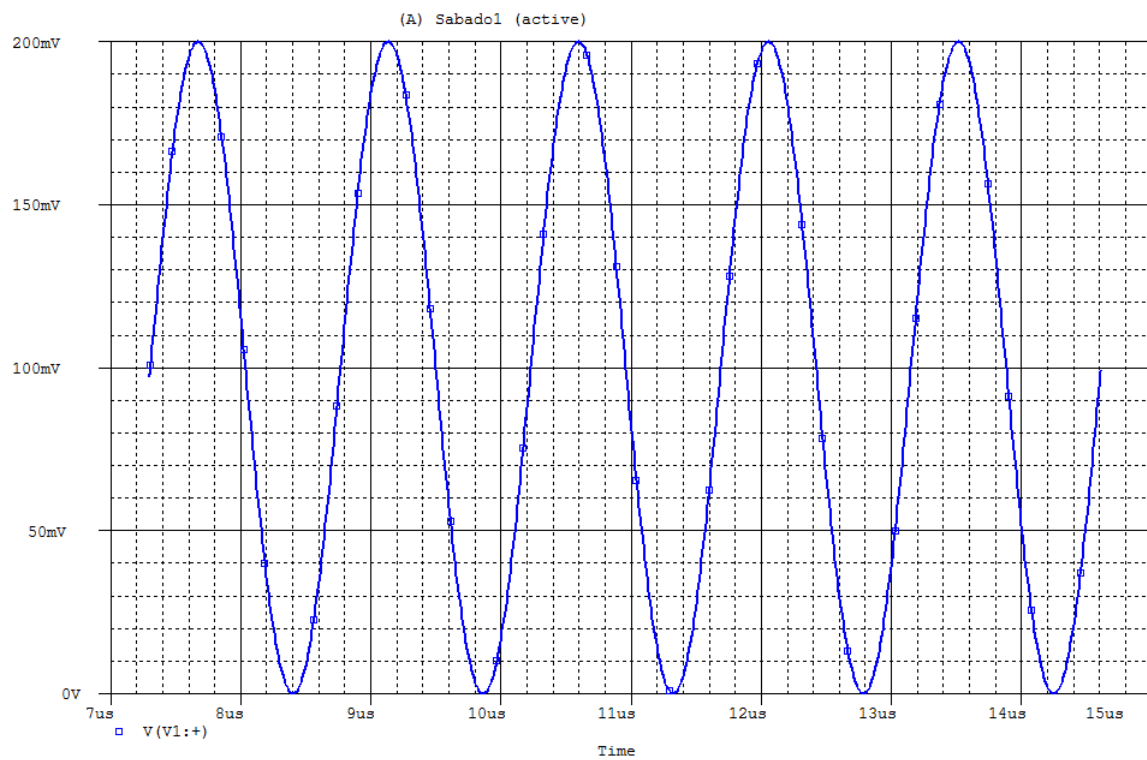


Figura 13: Sinal de entrada na fonte.

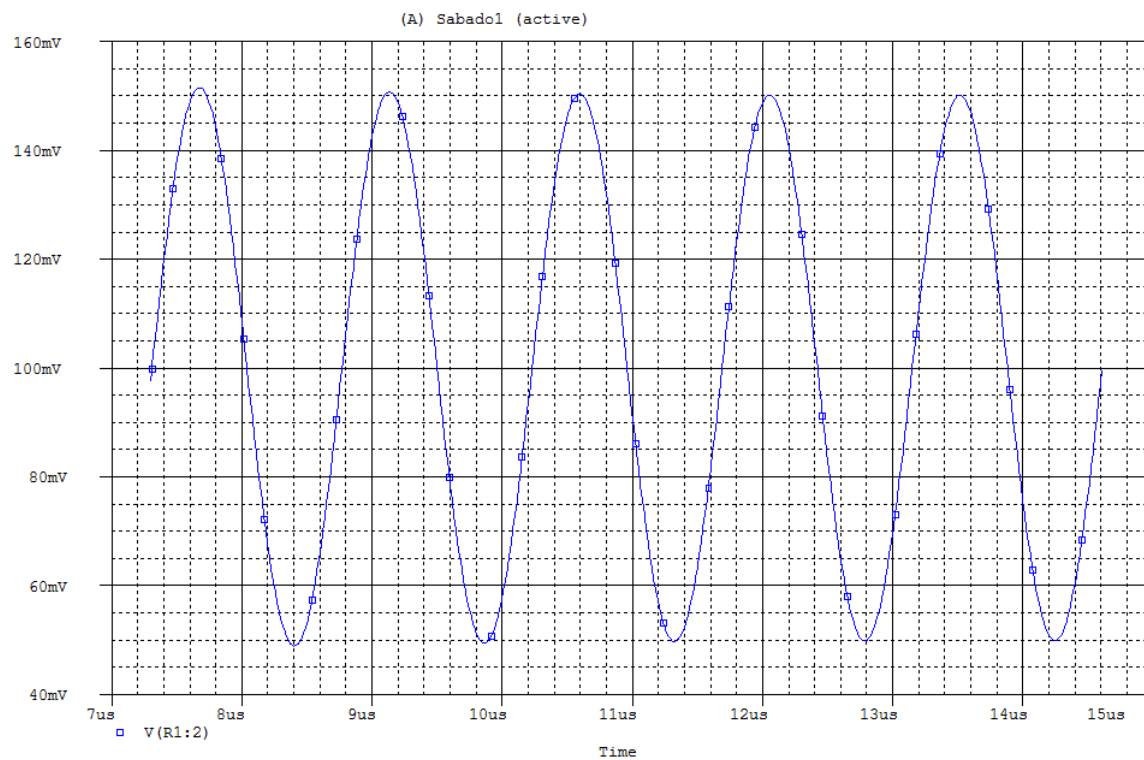


Figura 14: Sinal entre resistor de entrada e capacitor.

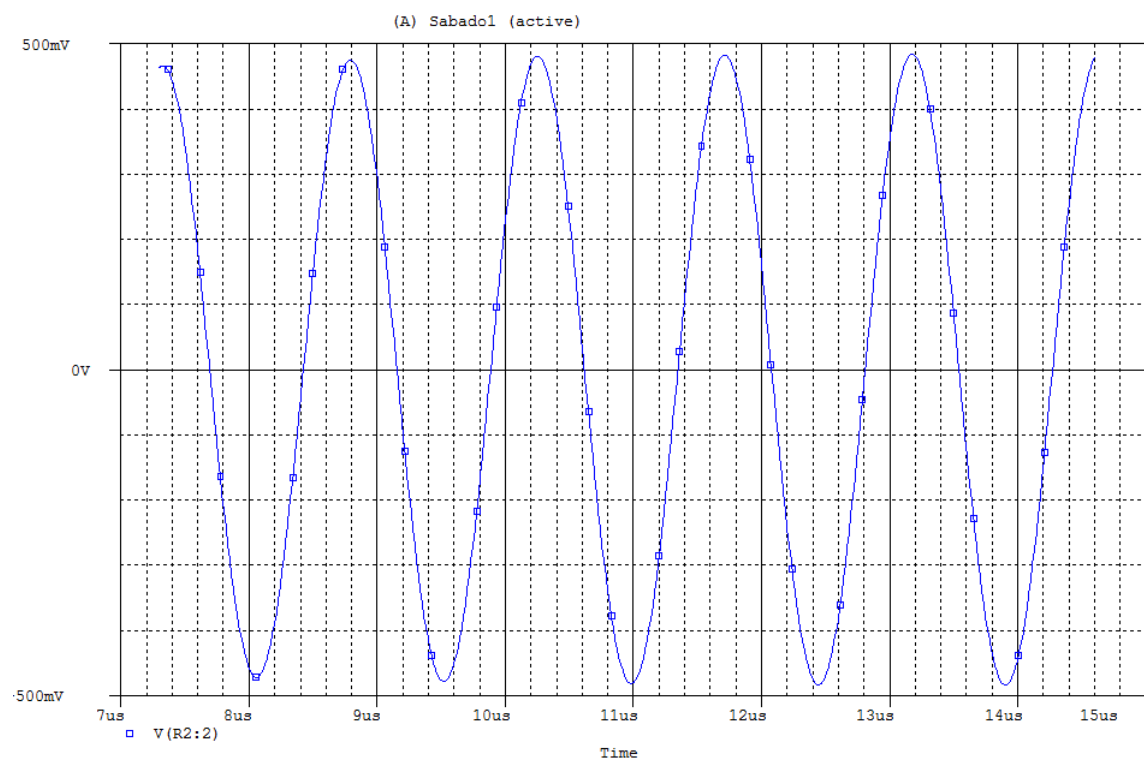


Figura 15: Sinal de saída sobre o resistor de carga.

O casamento de impedância foi obtido. E a frequência para esse casamento foi muito próxima

a esperada em projeto que é de 684,366 kHz. O valor encontrado foi de 6,83,912 kHz.

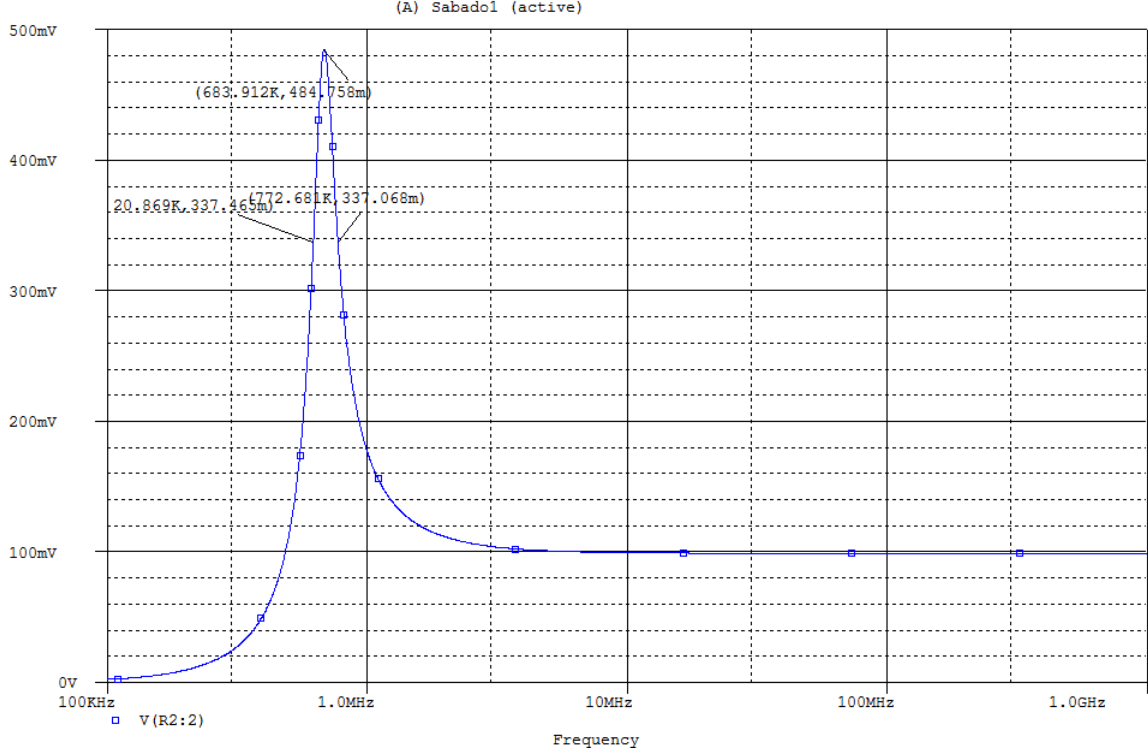


Figura 16: Casamento de impedância entre fonte e carga.

O Q encontrado a partir da equação especificada foi 4,6 e a faixa de frequência de operação estimada é de 751,812 kHz.

Para o projeto da rede  $\pi$ , os valores de capacitores e indutores encontrados foram de 93 nF, 1,071 nF e 55,014 uH respectivamente.

Para determinar esses valores uma resistência virtuais de 10 ohms foi pre estabelecida, assim:

$$Q_{rede\pi} = \sqrt{\frac{R_H}{R_V} - 1} = \sqrt{\frac{4700}{10} - 1} = 21,6564; \quad (20)$$

$$X_{p2} = \frac{R_P}{Q_P} = \frac{4700}{21,6564} = 217,02; \quad (21)$$

$$C_2 = \frac{1}{\Omega_0 217,02} = 1,071nF; \quad (22)$$

$$X_{s2} = Q \cdot R_{srie} = 21,6564 \cdot 10 = 216,564; \quad (23)$$

$$Q_{RedeLsource} = \sqrt{\frac{R_S}{R_V} - 1} = \sqrt{\frac{50}{10} - 1} = 2; \quad (24)$$

$$X_{p1} = \frac{R_S}{Q_{RedeLsource}} = \frac{50}{2} = 25; \quad (25)$$

$$C_1 = \frac{1}{\Omega_0 25} = 93nF; \quad (26)$$

$$X_{s1} = Q_{RedeLsource} \cdot R_{srie} = 2 \cdot 10 = 20; \quad (27)$$

Somando  $X_{p2}$  com  $X_{s1}$  temos um valor equivalente de 236,564.

$$L = \frac{236,564}{\Omega_0} = 55,014 \mu H; \quad (28)$$

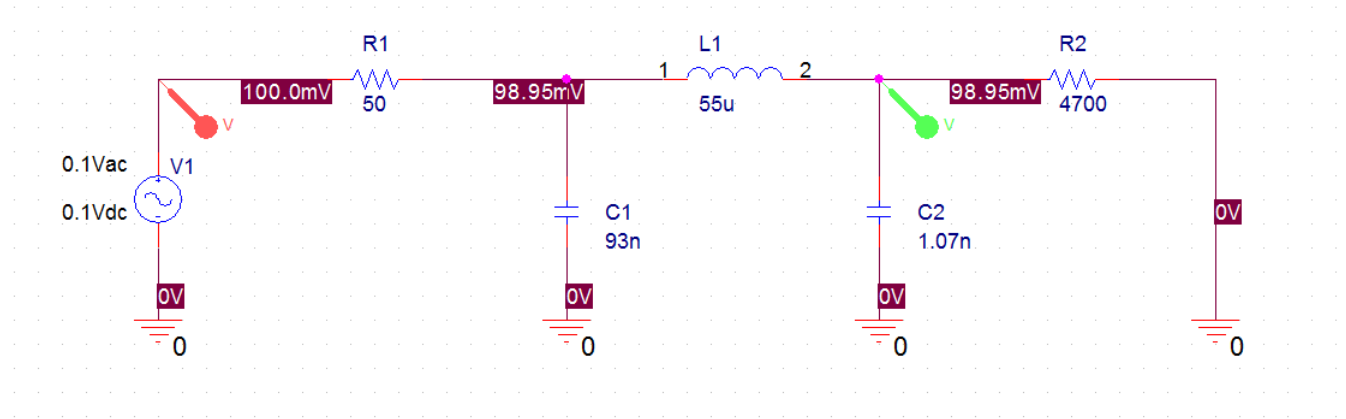


Figura 17: Rede  $\pi$  projetada.

Após o projeto da rede, os seguintes resultados foram obtidos.

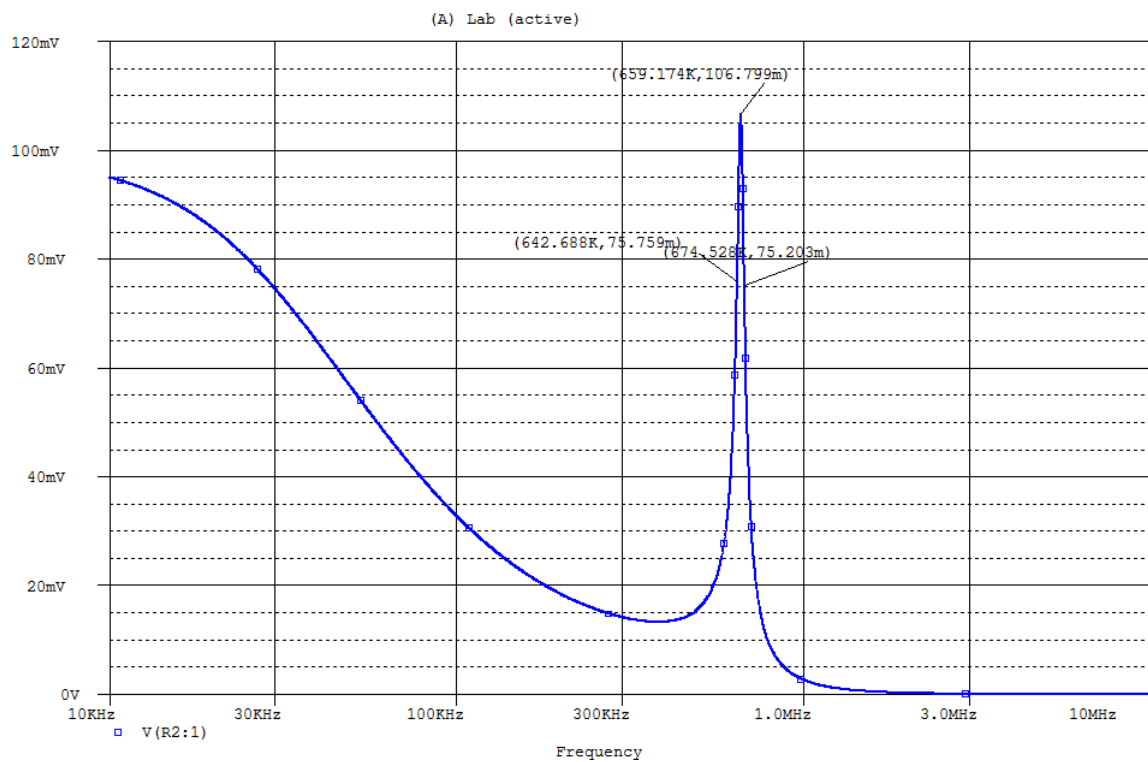


Figura 18: Resultados para rede  $\pi$ .

A frequência para o casamento de impedância obtida foi de 659,174 kHz, novamente bem próxima ao esperado que era de 684,366 kHz. O Q encontrado é de 18,93 e a banda de operação é de 34,89 kHz.

Por último, foi projetada uma rede com duplo L.

Os valores de capacitores e indutores encontrados para essa rede foram de 1,58 nF, 162,7 pF, 37,54 uH e 370,76 uH respectivamente.

Para o projeto iniciamos por determinar o valor da resistência virtual da rede.

$$R_V = \sqrt{R_S R_L} = \sqrt{50 \cdot 4700} = 484,767; \quad (29)$$

$$Q = \sqrt{\frac{R_V}{R_{min}}} - 1 = \sqrt{\frac{484,767}{50}} - 1 = 2,948; \quad (30)$$

$$Q = \frac{R_V}{R_{p1}}; \quad (31)$$

$$X_{p1} = 161,43; \quad (32)$$

$$X_{s1} = Q \cdot 50 = 147,4; \quad (33)$$

$$X_{s2} = Q \cdot R_V = 1429,09; \quad (34)$$

$$X_{p2} = \frac{4700}{Q} = 1594,3; \quad (35)$$

$$C = \frac{1}{\Omega_0 \cdot X}; \quad (36)$$

$$L = \frac{X}{\Omega_0}; \quad (37)$$

$$C_1 = 1,58 \text{ nF}; \quad (38)$$

$$C_2 = 162,7 \text{ pF}; \quad (39)$$

$$L_1 = 37,54 \text{ uH}; \quad (40)$$

$$L_2 = 370,76 \text{ uH}; \quad (41)$$

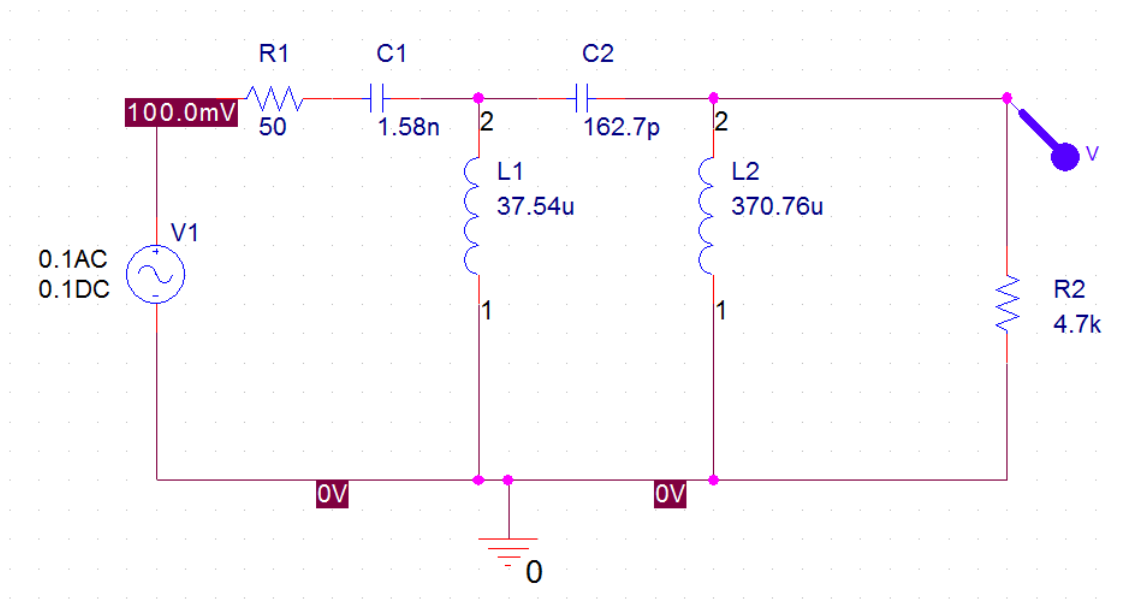


Figura 19: Rede duplo L projetada.



Os resultados obtidos a partir desse ultimo projeto de rede adaptadora estão explícitos a seguir:

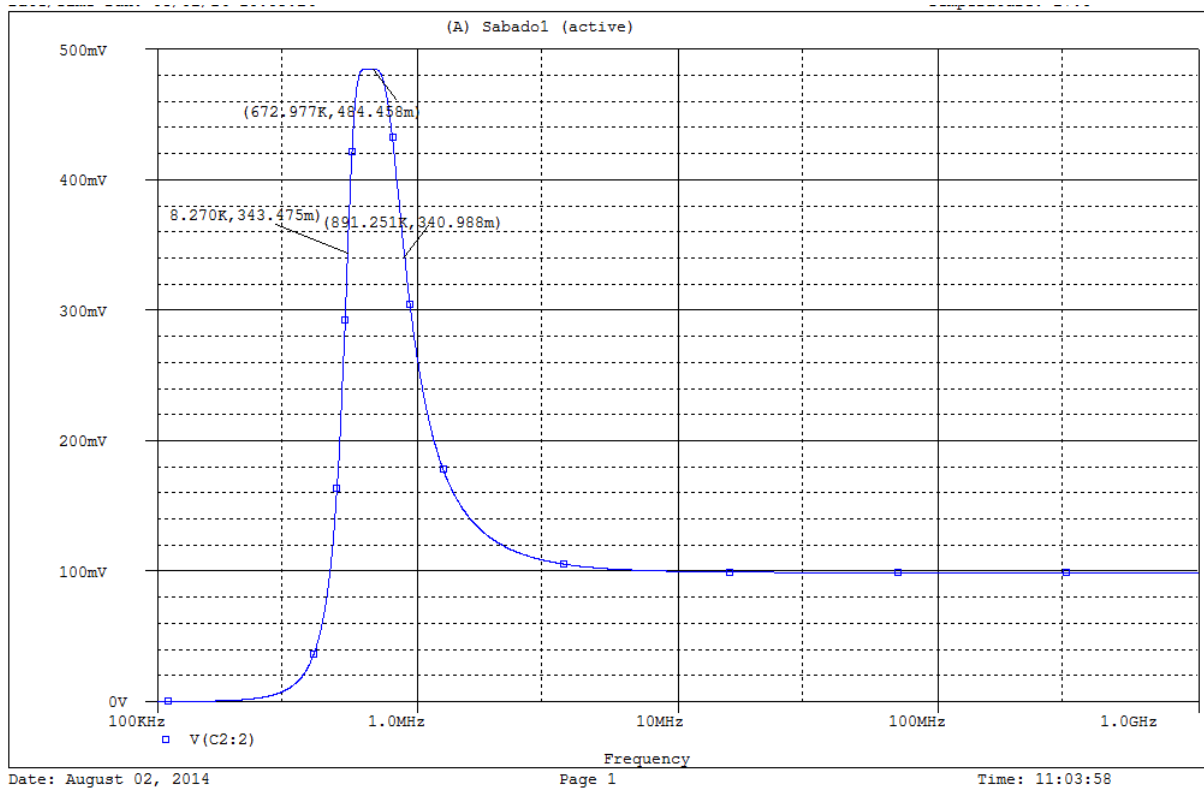


Figura 20: Resultados rede duplo L.

Podemos observar que a faixa de frequência estabelecida é de 352,981 kHz. Vemos também que a rede possui um Q de 2,8 e opera na frequência de 672,977 kHz, uma frequência muito próxima a fornecida teóricamente que é de 684,366 kHz.

## 6 Conclusões

Com as análises feitas, podemos concluir que não houve problemas nas simulações, sendo os resultados obtidos todos dentro do esperado. Podemos concluir também que as redes adaptadores podem ser cada vez mais desenvolvidas conforme as necessidades do projetista. Assim, quanto maior for o BW desejado, por exemplo, menor será o Q da rede e, para isso, basta adicionarmos várias redes L em série, ou paralelo sobre a rede.

## Referências

- [1] 3ELE002 – Circuitos de Comunicação – Unid.6 – Amplificadores de RF – Prof. DR. Talvik. Abro
- [2] Roteiro de experiência 1 Adaptação de Impedâncias