Relatório Experimento 01:

Bruno Messias

Março 2020

1 Introdução

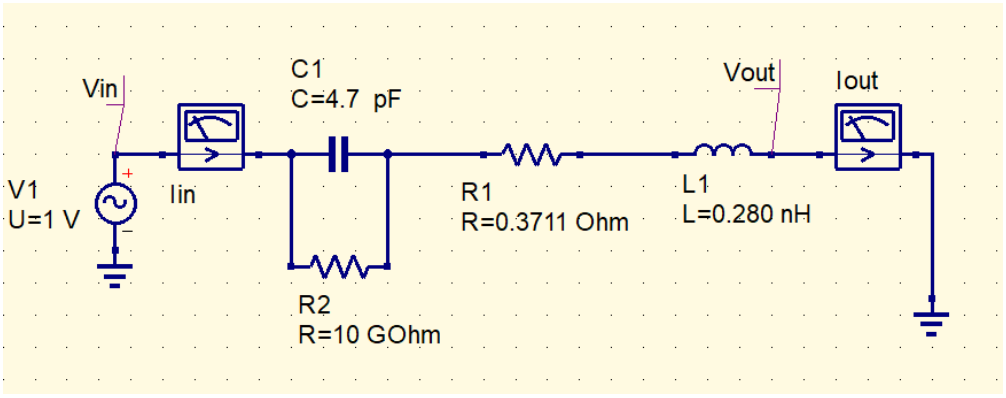
Este relatório é referente ao experimento 01 da matéria EEL7319(Circuitos Rf), sobre o tema dos Componetes passivos em RF, que possui o objetivo de avaliar o comportamento de componentes passivos em aplicações de RF usando modelos simplificados.

Definindo-se primeiramente alguns parâmetros desejados, como a frequência de auto-ressonância esperada e o modelo do capacitor a ser utilizado, escolhendo-se no catálogo disponibilizado no roteiro um modelo de capacitor.

Esse modelo foi implementado no software QUCS e assim retirar alguns parâmetros importantes para a análise AC, também realizou-se uma análise estatística do modelo utilizado, com o método Monte Carlo, para a consideração da tolerância prevista do fabricante. E finalmente, projetou-se um filtro passa-baixas utilizando o modelo do capacitor e verificar sua variação de ressonância em função da tolerância do capacitor.

2 Pré Lab

Durante o Prelab foi modelado o equivalente do capacitor real represendado a seguir:



Determinado - se teóricamente a frequência de auto-ressonância(fr), temos a função transferência do circuito:

$$H(j\omega) = \frac{R_2}{R_2.j\omega C + 1} + R_1 + j\omega L$$

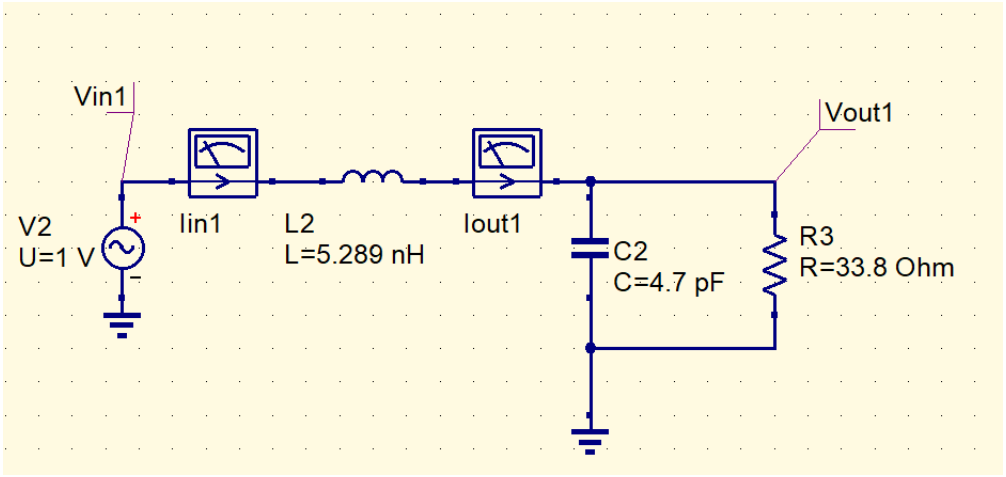
Para determinar fr, temos a derivada:

$$\frac{\partial H(j\omega)}{\partial \omega} = \frac{\partial}{\partial \omega} \frac{1}{j\omega C + \frac{1}{R_2}} + R_1 + j\omega L = 0$$

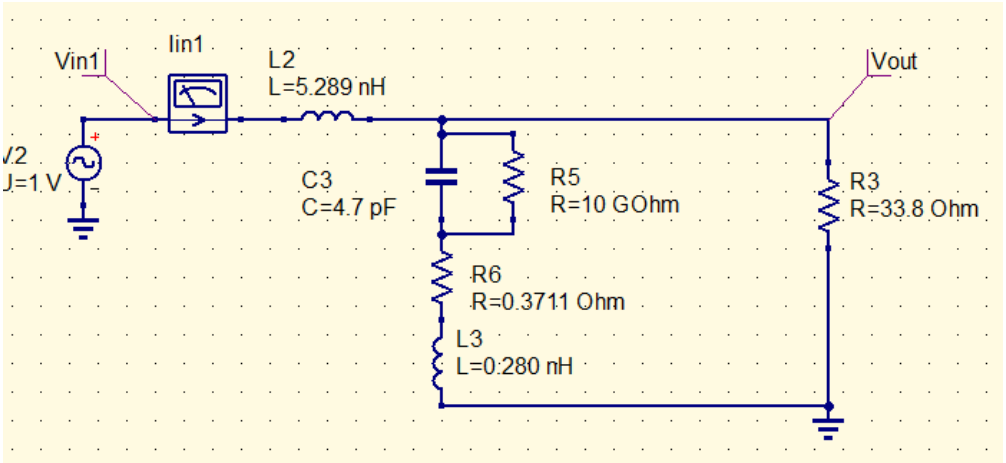
$$\frac{\partial H(j\omega)}{\partial \omega} = \frac{C}{\omega^2 C^2} + jL = 0$$

$$F_r = \frac{\sqrt{\frac{-j}{LC}}}{2\pi} = 4.39GHz$$

Também foi requisitado o projeto de um filtro Passa-Baixa, modelado a seguir:



E utilizando o modelo real temos:



3 Parte Experimental

Foi utilizado durante o experimento o software Qucs com o apoio da linguagem Python para análise de dados.

[153]:
```
#Importando bibliotecas para análise de dados
import numpy as np
import pandas as pd
import matplotlib.pyplot as plt
%matplotlib inline
```

3.1 Questão 2

Importação dos dados e processamento sobre a curva referente ao modelo do capacitor de 4.7 pF:

[154]:
```
df = pd.read_csv('dados/Grafico Potência.csv',sep=';')
#Organizando Dados
df1 = df[['r Pin']]
df2 = df[['i Pin']]
xx = df1.to_numpy()
yy = df2.to_numpy()
df['Pin'] = np.sqrt((xx**2)+(yy**2))
#Analisando forma de onda:
df = df[['acfrequency','Pin']]
#Visualização da organização de dados
df.head()
```

[154]:

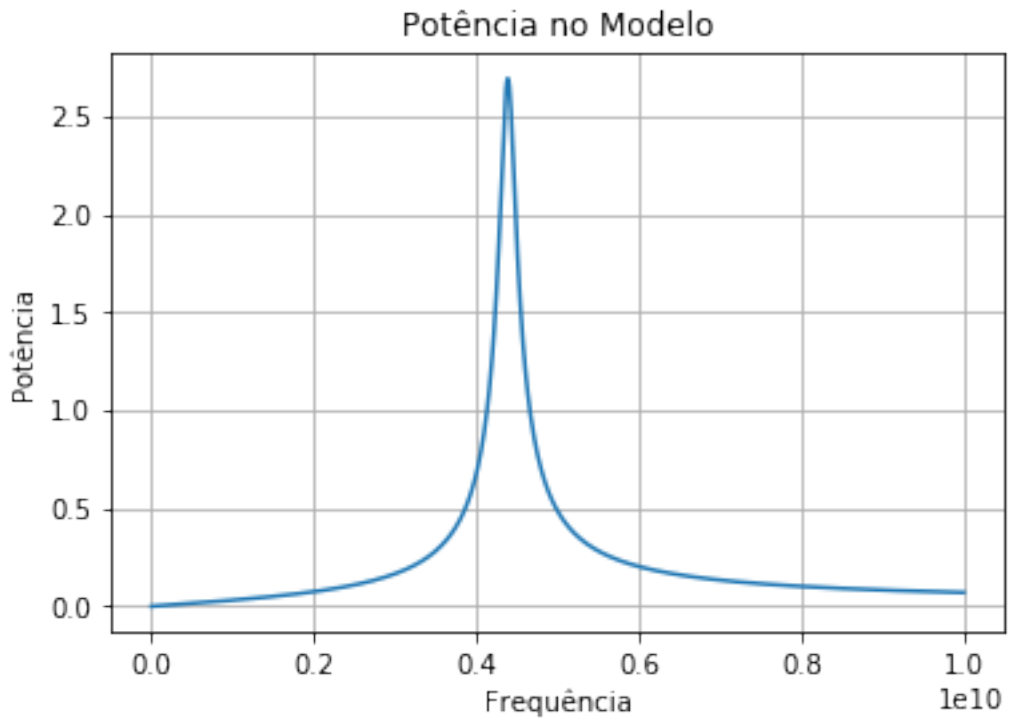
	acfrequency	Pin
0	1000000.0	0.00003
1	1002310.0	0.00003
2	1004620.0	0.00003
3	1006930.0	0.00003
4	1009250.0	0.00003

Análise gráfica da potência transferida no modelo pela frequência:

[155]:
```
dfx = df[['acfrequency']]
dfy = df[['Pin']]
freq = dfx.to_numpy()
pot = dfy.to_numpy()

fig = plt.figure()
ax = fig.add_subplot(1, 1, 1)
ax.grid(True)
ax.plot(freq,pot)
ax.set_xlabel('Frequência')
ax.set_ylabel('Potência')
ax.set_title('Potência no Modelo')
```

[155]:

```
Text(0.5, 1.0, 'Potência no Modelo')
```



Foi determinado a frequencia de auto-ressonância a partir da frequência onde possui a maior potência transferida. podemos observar que foi encontrado em Fr = 4.385310 GHz, que condiz com o teórico calculado no Pré lab de 4.39GHz.

[156]:
```
sort = df.sort_values(by = 'Pin',ascending=False)
sortf = sort.iloc[0]
#Extraindo fr
fr = float(sortf[['acfrequency']].to_numpy())
#Extraindo a potencia de relação
prel = float(sortf[['Pin']].to_numpy())
sort = sort[['acfrequency','Pin']]
sort.iloc[0]
```

[156]:
```
acfrequency    4.385310e+09
Pin            2.694236e+00
Name: 3642, dtype: float64
```

Como segundo métdo vamos utilizar a análise das impedância, para validar o valor encontrado anteriormente e determinandr o fator Q e a tangente de perdas:

[157]:
```
data = pd.read_csv('dados/zmodelo.csv',sep=';')
#Visualização da organização de dados
data.head()
```

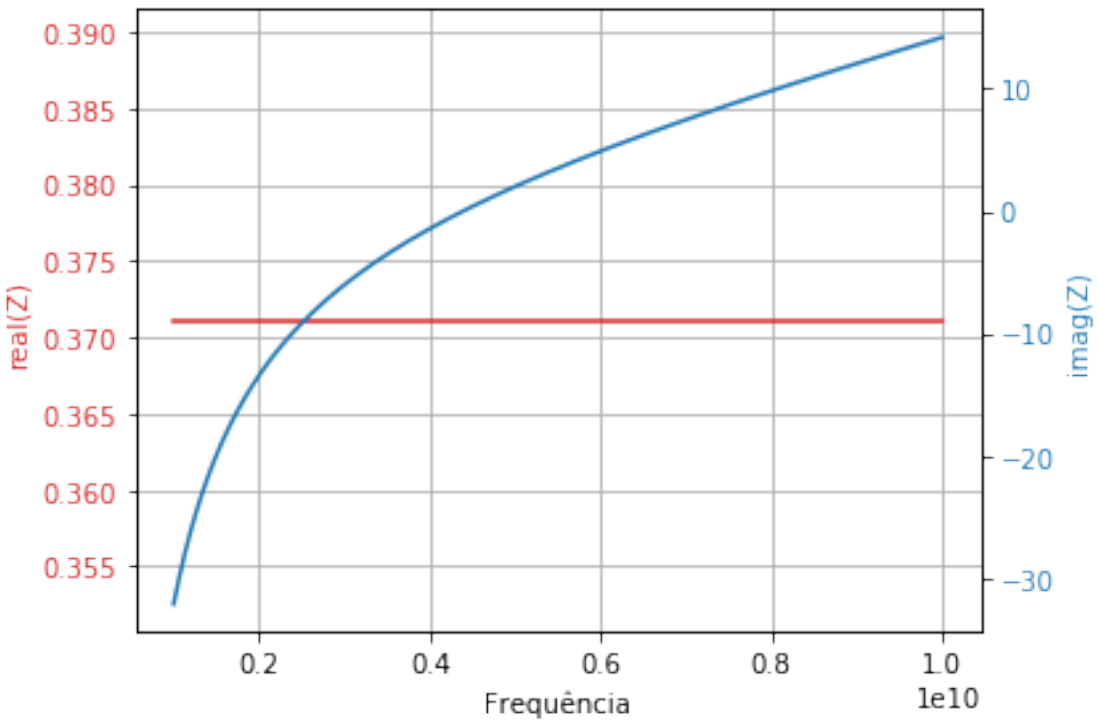
[157]:

	acfrequency	r Zin	i Zin
0	1.000000e+09	0.3711	-32.1035
1	1.002310e+09	0.3711	-32.0215
2	1.004620e+09	0.3711	-31.9398
3	1.006930e+09	0.3711	-31.8582
4	1.009250e+09	0.3711	-31.7767

Análise Gráfica da impedância:

[158]:
```
freq1 = data[['acfrequency']]
yr = data[['r Zin']]
yi= data[['i Zin']]
freq = freq1.to_numpy()
real = yr.to_numpy()
imag = yi.to_numpy()

fig = plt.figure()
fig, ax1 = plt.subplots()
ax.grid(True)

color = 'tab:red'
ax1.set_xlabel('Frequência')
ax1.set_ylabel('real(Z)', color=color)
ax1.plot(freq, real, color=color)
ax1.tick_params(axis='y', labelcolor=color)

ax2 = ax1.twinx()

color = 'tab:blue'
ax2.set_ylabel('imag(Z)', color=color)
ax2.plot(freq, imag, color=color)
ax2.tick_params(axis='y', labelcolor=color)
ax1.grid(True)
fig.tight_layout()
plt.show()
```

```
<Figure size 432x288 with 0 Axes>
```

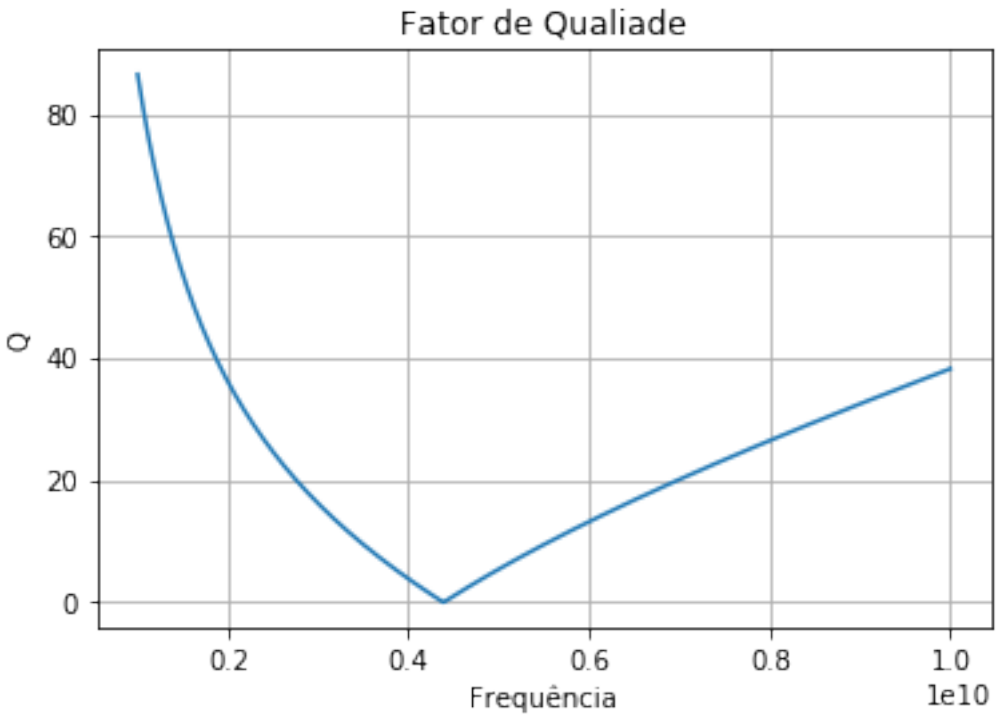


A seguir utilizaremos a seguinte equação para determinar o fator de qualidade(Q):

$$Q = \frac{imag\{Z\}}{real\{Z\}}$$

[159]:
```
q = abs(imag)/abs(real)

fig = plt.figure()
ax = fig.add_subplot(1, 1, 1)
ax.grid(True)
ax.plot(freq,q)
ax.set_xlabel('Frequência')
ax.set_ylabel('Q')
ax.set_title('Fator de Qualiade')
```

[159]:
```
Text(0.5, 1.0, 'Fator de Qualiade')
```



Encontrando a frequência de auto-ressonância com mais precisão, comprovando que o valor de fr encontrado pela outra equação é válido.

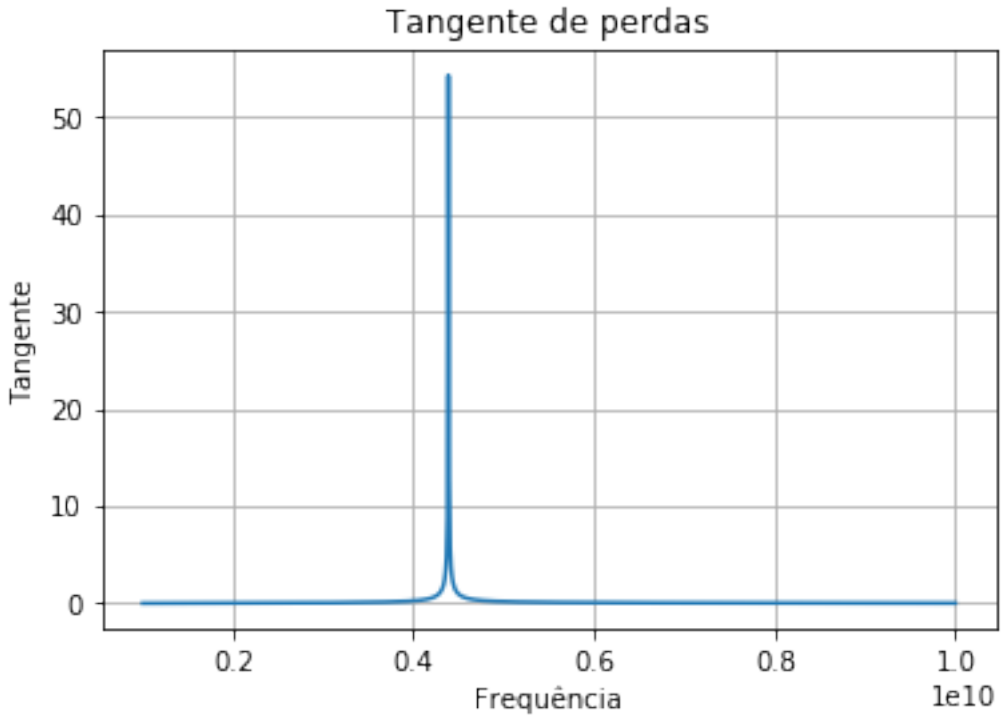
[160]:
```
data['Q'] = abs(imag)/abs(real)
sortdata = data.sort_values(by = 'Q',ascending=True)
sortdata =  sortdata[['acfrequency','Q']]
sortf1 = sortdata.iloc[0]
#Extraindo Q
Qinit = float(sortf1[['Q']].to_numpy())
sortdata.iloc[0]
```

[160]:
```
acfrequency    4.385310e+09
Q              1.840808e-02
Name: 642, dtype: float64
```

E a seguir sua tangente de perdas:

[161]:
```
tang = 1/q

fig = plt.figure()
ax = fig.add_subplot(1, 1, 1)
ax.grid(True)
ax.plot(freq,tang)
ax.set_xlabel('Frequência')
ax.set_ylabel('Tangente')
ax.set_title('Tangente de perdas')
```

[161]:
```
Text(0.5, 1.0, 'Tangente de perdas')
```



3.2 Questão 3

Na terceira parte do experimento vamos analizar o efeito da tolerância de +- 0.25 pF no capacitor utilizando a simulção Monte Carlo. Primeiramente a importação sobre os dados da curva obtido desta simulação:

[162]:
```
#Importando dados da curva:
dft = pd.read_csv('dados/tolerancia.csv',sep=';')
df1 = dft[['r Pin']]
df2 = dft[['i Pin']]
xx = df1.to_numpy()
```

```
yy = df2.to_numpy()
dft['Pin'] = np.sqrt((xx**2)+(yy**2))
dft = dft[['acfrequency','Pin']]
dft.head()
```

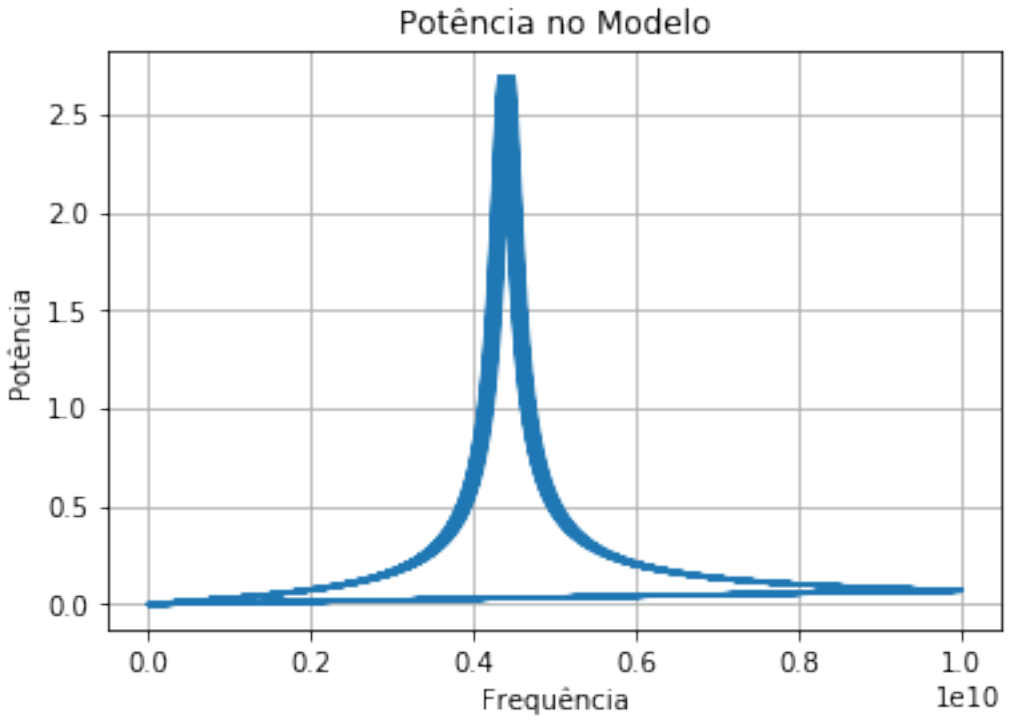
[162]:

	acfrequency	Pin
0	1000000.0	0.00003
1	1002310.0	0.00003
2	1004620.0	0.00003
3	1006930.0	0.00003
4	1009250.0	0.00003

Análise gráfica gerada pelos dados obtidos:

[163]:
```
dfx = dft[['acfrequency']]
dfy = dft[['Pin']]
freq = dfx.to_numpy()
pot = dfy.to_numpy()

fig = plt.figure()
ax = fig.add_subplot(1, 1, 1)
ax.plot(freq,pot)
ax.grid(True)
ax.set_xlabel('Frequência')
ax.set_ylabel('Potência')
ax.set_title('Potência no Modelo')
```

[163]:
```
Text(0.5, 1.0, 'Potência no Modelo')
```



Observamos a seguir que há uma pequena mudança na frequencia de auto-ressonância, para 4.42GHz:

[164]:
```
sortt = dft.sort_values(by = 'Pin',ascending=False)
sortf1 = sortt.iloc[0]
sortt = sortt[['acfrequency','Pin']]
pmax1 = float(sortf1[['Pin']].to_numpy())
sortt.iloc[0]
```

[164]:
```
acfrequency    4.415700e+09
Pin            2.694692e+00
Name: 15648, dtype: float64
```

A seguir a análise pelo método das impedâncias:

[165]:
```
data1 = pd.read_csv('dados/zmonte.csv',sep=';')
#Visualização da organização de dados
data1.head()
```

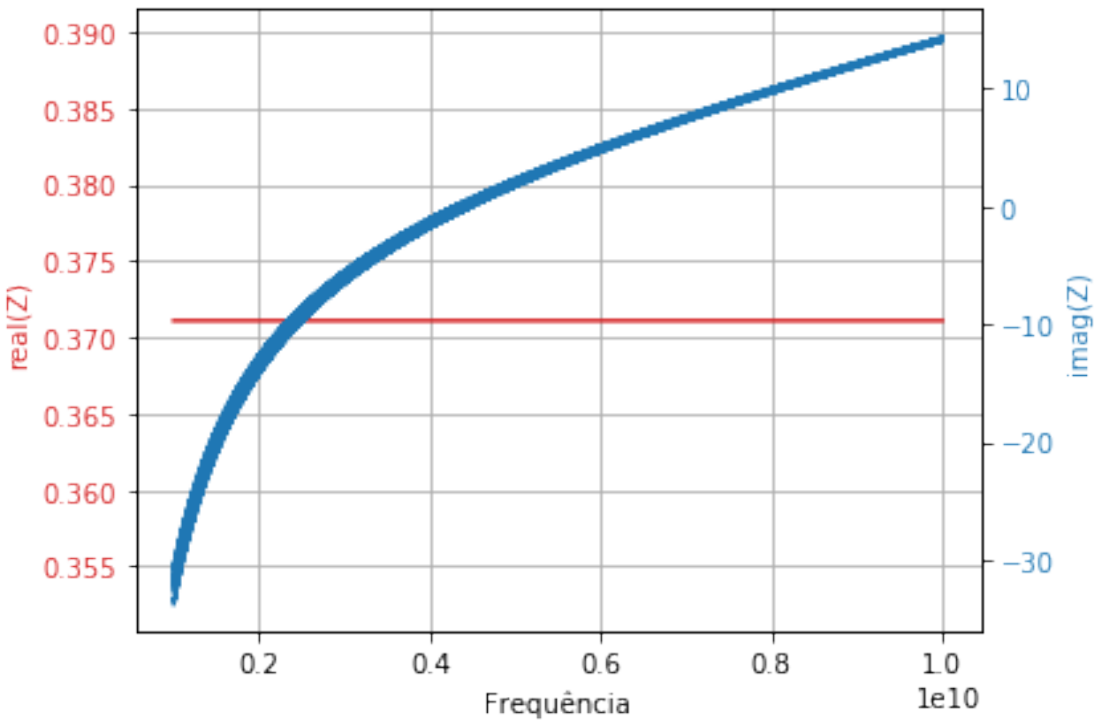
[165]:

	acfrequency	number	r Zin	i Zin
0	1.000000e+09	1	0.3711	-32.1035
1	1.002310e+09	1	0.3711	-32.0215
2	1.004620e+09	1	0.3711	-31.9398
3	1.006930e+09	1	0.3711	-31.8582
4	1.009250e+09	1	0.3711	-31.7767

[166]:
```
#Filtragem de pontos, para retirar dados discrepantes da simulção Monte Carlo
data_pandas = data1.sort_values(by='i Zin')
tamanho = len(data_pandas)
primeiro_quatil = data_pandas.quantile(q=0.25, axis=0, numeric_only=True,␣
 ↪interpolation='linear')
primeiro_quatil = primeiro_quatil[['i Zin']].to_numpy()
terceiro_quartil = data_pandas.quantile(q=0.75, axis=0, numeric_only=True,␣
 ↪interpolation='linear')
inicio = round(int(tamanho / primeiro_quatil))
final = int(tamanho - abs(inicio))
linha_inicio = data_pandas.loc[abs(inicio)]
linha_inicio = linha_inicio[['i Zin']].to_numpy()
linha_final = data_pandas.loc[final]
linha_final = linha_final[['i Zin']].to_numpy()
menor = (int(linha_final - linha_inicio) * 1.5) - inicio
maior = (int(linha_final - linha_inicio) * 1.5) + final
data_pandas[(data_pandas['i Zin'] < menor)]
data_pandas[(data_pandas['i Zin'] > maior)]
#Retirando dados para o gráfico
freq1 = data_pandas[['acfrequency']]
yr = data_pandas[['r Zin']]
yi= data_pandas[['i Zin']]
freq = freq1.to_numpy()
```

```
real = yr.to_numpy()
imag = yi.to_numpy()

fig = plt.figure()
fig, ax1 = plt.subplots()
ax.grid(True)

color = 'tab:red'
ax1.set_xlabel('Frequência')
ax1.set_ylabel('real(Z)', color=color)
ax1.plot(freq, real, color=color)
ax1.tick_params(axis='y', labelcolor=color)

ax2 = ax1.twinx()

color = 'tab:blue'
ax2.set_ylabel('imag(Z)', color=color)
ax2.plot(freq, imag, color=color)
ax2.tick_params(axis='y', labelcolor=color)
ax1.grid(True)
fig.tight_layout()
plt.show()
```

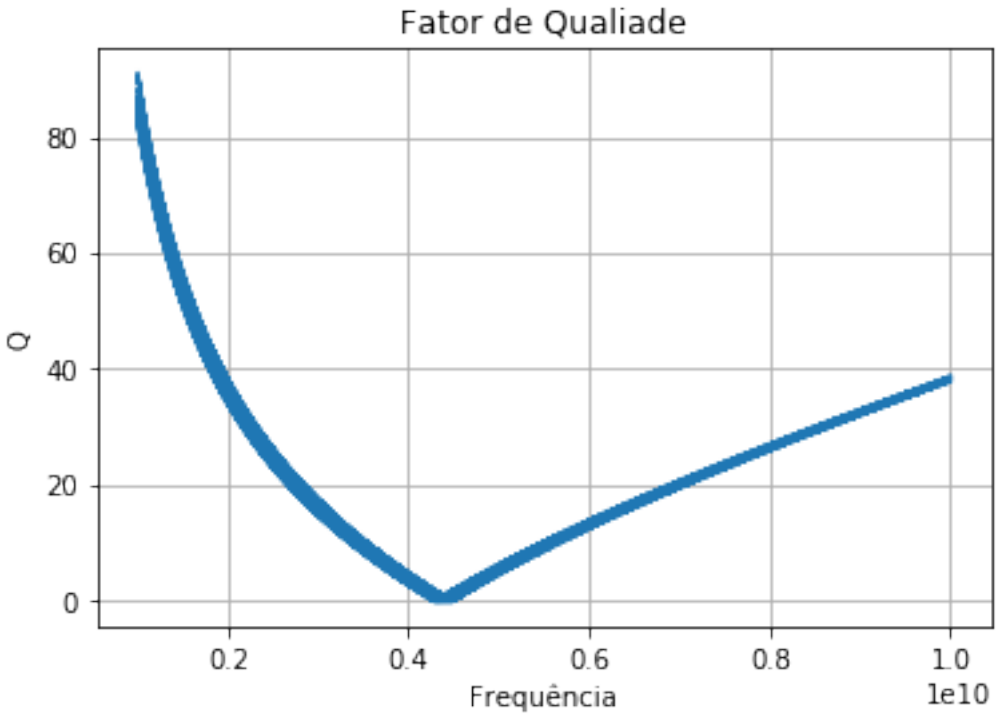
```
<Figure size 432x288 with 0 Axes>
```



Determinando o gráfico do fator Q

[167]:
```
q1 = abs(imag)/abs(real)

fig = plt.figure()
ax = fig.add_subplot(1, 1, 1)
ax.grid(True)
ax.plot(freq,q1)
ax.set_xlabel('Frequência')
ax.set_ylabel('Q')
ax.set_title('Fator de Qualiade')
```

[167]:
```
Text(0.5, 1.0, 'Fator de Qualiade')
```



Temos a frequêcia de de auto-ressonância em 4.48 GHz considerando essa abordagem:

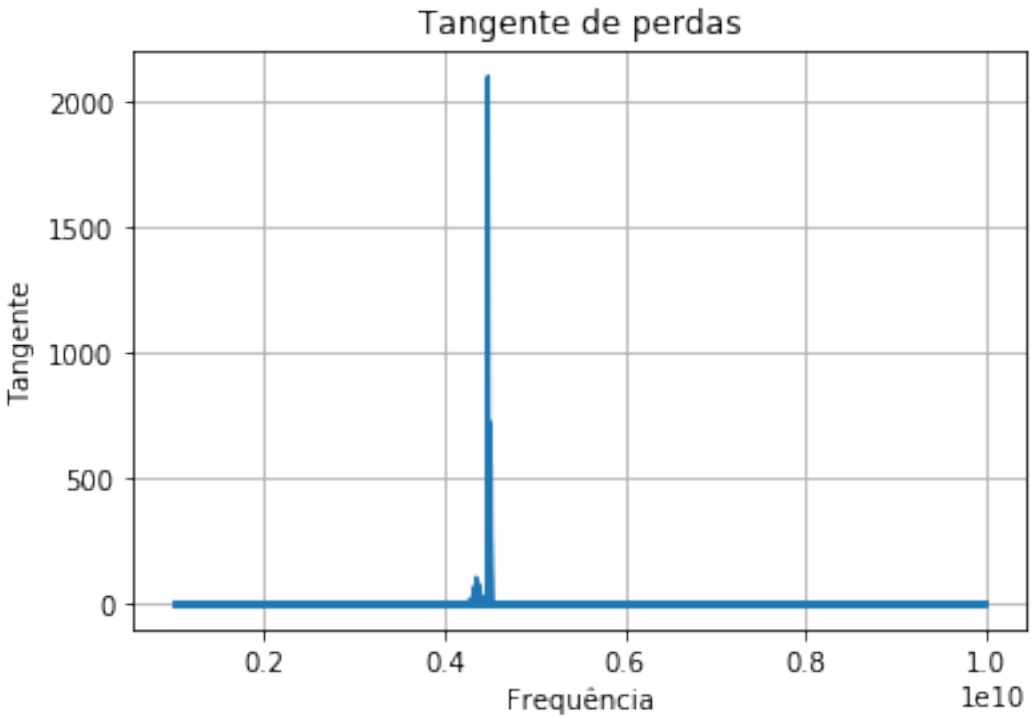
[168]:
```
data_pandas['Q'] = q1
sortdata1 = data_pandas.sort_values(by = 'Q',ascending=True)
sortdata1 =  sortdata1[['acfrequency','Q']]
sortdata1.iloc[0]
```

[168]:
```
acfrequency    4.477130e+09
Q              1.035123e-03
Name: 18669, dtype: float64
```

E determinando a Tangente de Perdas:

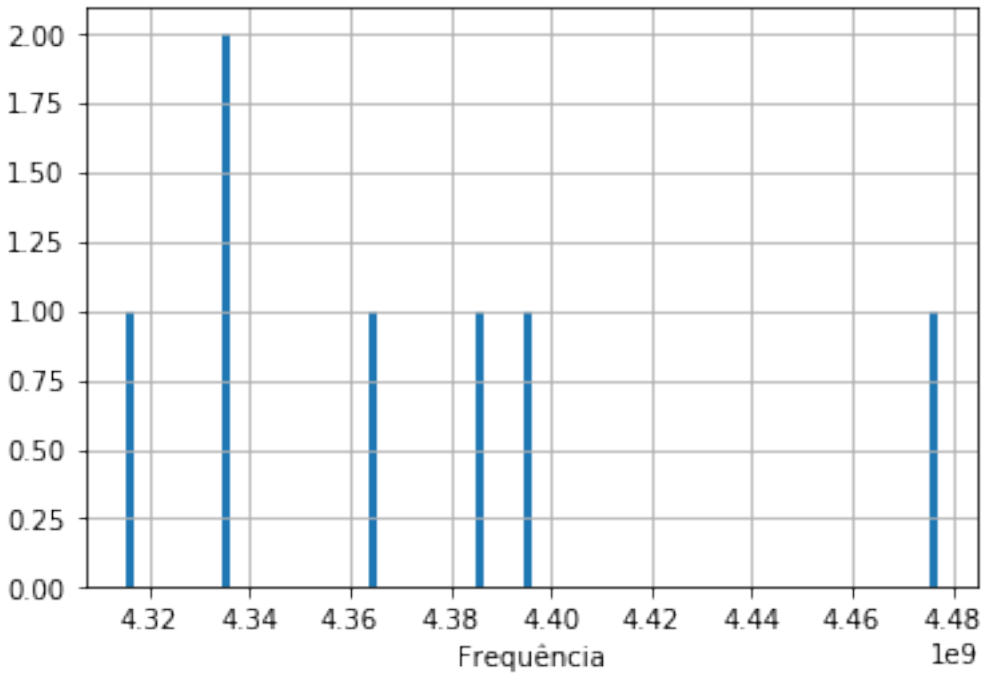
[169]:
```
data2 = pd.read_csv('dados/tangente.csv',sep=';')
df1 = data2[['r tang']]
df2 = data2[['i tang']]
xx = df1.to_numpy()
yy = df2.to_numpy()
data2['Tng'] = np.sqrt((xx**2)+(yy**2))
data2 = data2[['acfrequency','Tng']]

freq1 = data2[['acfrequency']]
y = data2[['Tng']]
freq = freq1.to_numpy()
tg = y.to_numpy()


fig = plt.figure()
ax = fig.add_subplot(1, 1, 1)
ax.grid(True)
ax.plot(freq1,tg)
ax.set_xlabel('Frequência')
ax.set_ylabel('Tangente')
ax.set_title('Tangente de perdas')
```

[169]:
```
Text(0.5, 1.0, 'Tangente de perdas')
```



Histograma da freqência de auto-ressonância, para o ponto de inflexão.

[170]:
```
#Retirando dados com os limites obtidos
mask1 = data_pandas['Q'] <= Qinit
sortx = data_pandas.loc[mask1]
freqs = sortx['acfrequency']
freqx = sortx['acfrequency'].to_numpy()

plt.hist(freqx, bins = 100)
plt.xlabel('Frequência')
plt.grid(True)
```



Análise estatística dos dados nos histogramas:

[171]:
```
freqs.describe()
```

[171]:
```
count    7.000000e+00
mean     4.372633e+09
std      5.442284e+07
min      4.315190e+09
25%      4.335110e+09
50%      4.365160e+09
75%      4.390365e+09
max      4.477130e+09
Name: acfrequency, dtype: float64
```

Observando seu dados estatísticos, vemos uma variação de 4.31GHz a 4.48GHz com um desvio padrão de 54.42 MHz em torno de sua mediana de 4.37GHz, que inclui a freqência determinada

anteriormente, sem a inclusão da tolerância. Observamos que ao incluir a tolerância temos uma maior densidade de frequências perto de de 4.34GHz

3.3 Questão 4

Nesta ultima parte do experimento analisaremos o filtro passa-baixa proposto anteriormente e os efitos de incluir a tolerância sobre ele, num primeiro momento sobre o filtro com o capacitor ideal:

[172]:
```
dfz = pd.read_csv('dados/filtrosemtol.csv',sep=';')
df1 = dfz[['r Ganho']]
df2 = dfz[['i Ganho']]
xx = df1.to_numpy()
yy = df2.to_numpy()
dfz['Ganho'] = np.sqrt((xx**2)+(yy**2))
dfz = dfz[['acfrequency','Ganho']]
dfz.head()
```

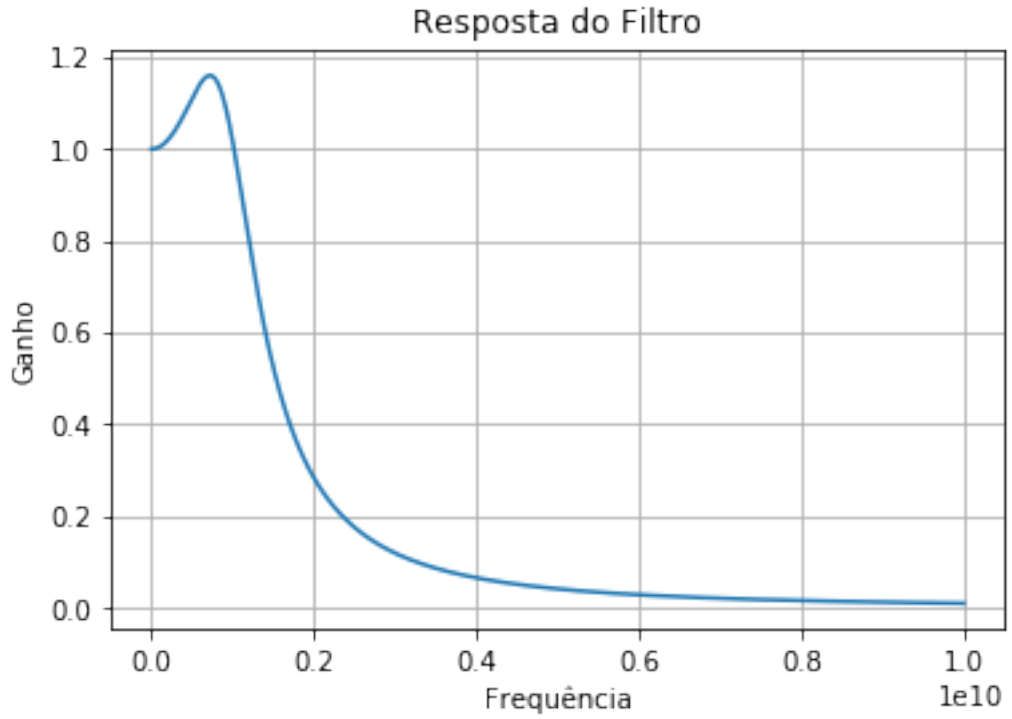
[172]:

	acfrequency	Ganho
0	1000000.0	1.0
1	1002310.0	1.0
2	1004620.0	1.0
3	1006930.0	1.0
4	1009250.0	1.0

A seguir a resposta do filtro sem considerar a tolerância, para melhor visualização:

[173]:
```
dfx1 = dfz[['acfrequency']]
dfy1 = dfz[['Ganho']]
freq1 = dfx1.to_numpy()
ganho = dfy1.to_numpy()

fig = plt.figure()
ax = fig.add_subplot(1, 1, 1)
ax.plot(freq1,ganho)
ax.grid(True)
ax.set_xlabel('Frequência')
ax.set_ylabel('Ganho')
ax.set_title('Resposta do Filtro')
```

[173]:
```
Text(0.5, 1.0, 'Resposta do Filtro')
```



A seguir a análise pelo métododas impedâncias, considerando o modelo do capacitor, sem o efeito das tolerâncias, descrito na questão 3:

[174]:
```
data2 = pd.read_csv('dados/filtromodelo.csv',sep=';')
#Visualização da organização de dados
data2.head()
```

[174]:

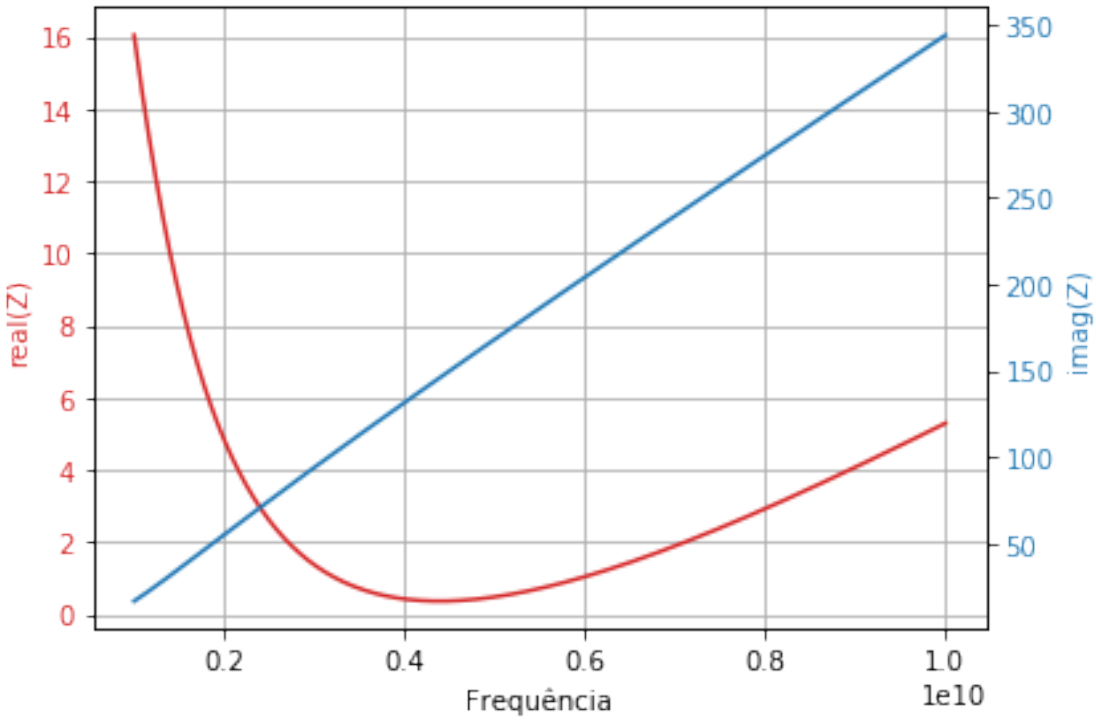
	acfrequency	r Z	i Z
0	1.000000e+09	16.0415	16.5478
1	1.002310e+09	15.9990	16.6271
2	1.004620e+09	15.9564	16.7067
3	1.006930e+09	15.9138	16.7866
4	1.009250e+09	15.8713	16.8668

Análise Gráfica dos dados:

[175]:
```
freq1 = data2[['acfrequency']]
yr = data2[['r Z']]
yi= data2[['i Z']]
freq = freq1.to_numpy()
real = yr.to_numpy()
imag = yi.to_numpy()

fig = plt.figure()
fig, ax1 = plt.subplots()
```

```
ax.grid(True)

color = 'tab:red'
ax1.set_xlabel('Frequência')
ax1.set_ylabel('real(Z)', color=color)
ax1.plot(freq, real, color=color)
ax1.tick_params(axis='y', labelcolor=color)

ax2 = ax1.twinx()

color = 'tab:blue'
ax2.set_ylabel('imag(Z)', color=color)
ax2.plot(freq, imag, color=color)
ax2.tick_params(axis='y', labelcolor=color)
ax1.grid(True)
fig.tight_layout()
plt.show()
```

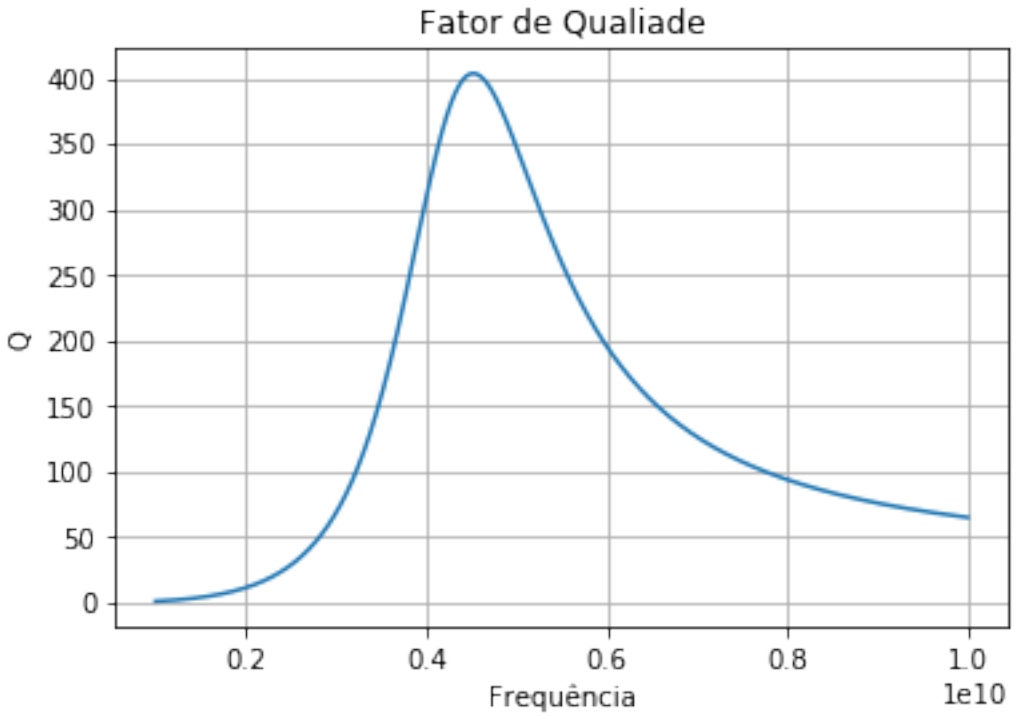
```
<Figure size 432x288 with 0 Axes>
```



Determinando o fator Q:

[176]:
```
q = abs(imag)/abs(real)

fig = plt.figure()
ax = fig.add_subplot(1, 1, 1)
ax.grid(True)
ax.plot(freq,q)
ax.set_xlabel('Frequência')
ax.set_ylabel('Q')
ax.set_title('Fator de Qualiade')
```

[176]:
```
Text(0.5, 1.0, 'Fator de Qualiade')
```



A seguir a determinação da frequência de auto-ressonância, de 4.52 GHz:

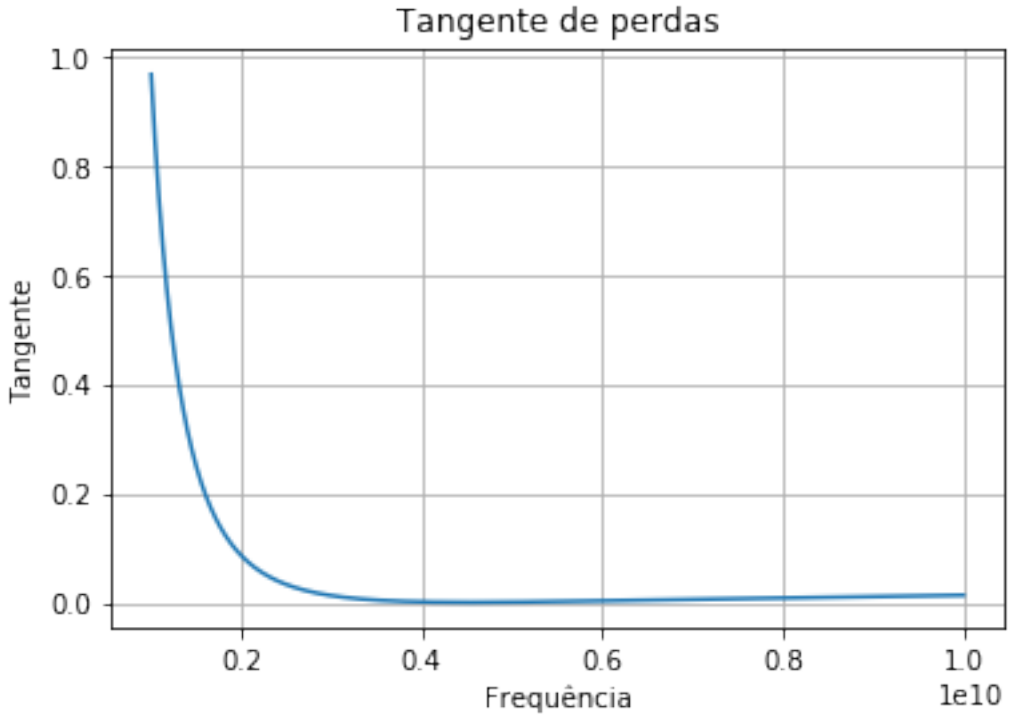
[177]:
```
data2['Q'] = q
sortdata = data2.sort_values(by = 'Q',ascending=False)
sortdata =  sortdata[['acfrequency','Q']]
sortf1 = sortdata.iloc[0]
#Extraindo Q
Qinit1 = float(sortf1[['Q']].to_numpy())
sortdata.iloc[0]
```

[177]:
```
acfrequency    4.518560e+09
Q              4.037613e+02
Name: 655, dtype: float64
```

A seguir sua tangente de perdas:

[178]:
```
tang = 1/q

fig = plt.figure()
ax = fig.add_subplot(1, 1, 1)
ax.grid(True)
ax.plot(freq,tang)
ax.set_xlabel('Frequência')
ax.set_ylabel('Tangente')
ax.set_title('Tangente de perdas')
```

[178]:
```
Text(0.5, 1.0, 'Tangente de perdas')
```



Vamos analizar o filtro utilizando o modelo real e considerando a tolerância de +- 0.25pF no capacitor:

[179]:
```
data3 = pd.read_csv('dados/zfiltro.csv',sep=';')
#Visualização da organização de dados
data3.head()
```

[179]:

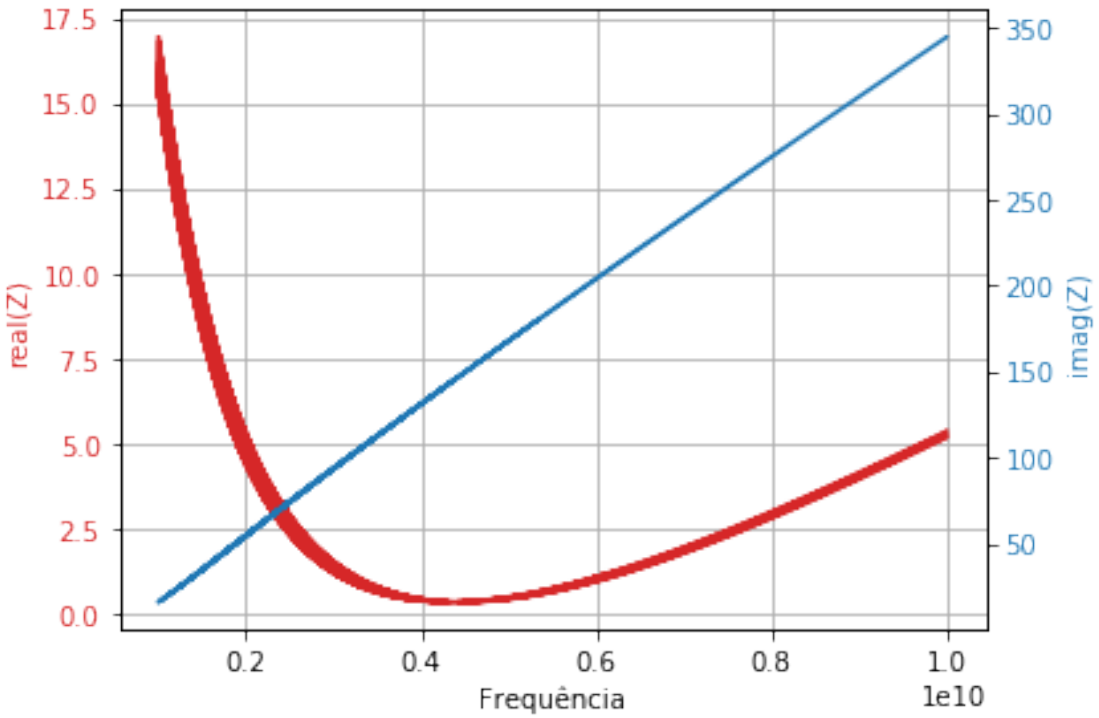
	acfrequency	number	r Z	i Z
0	1.000000e+09	1	16.0415	16.5478
1	1.002310e+09	1	15.9990	16.6271
2	1.004620e+09	1	15.9564	16.7067
3	1.006930e+09	1	15.9138	16.7866
4	1.009250e+09	1	15.8713	16.8668

Análise gráfica do filtro:

[180]:
```
#Filtragem de pontos, para retirar dados discrepantes da simulção Monte Carlo
data_pandas = data3.sort_values(by='i Z')
tamanho = len(data_pandas)
primeiro_quatil = data_pandas.quantile(q=0.25, axis=0, numeric_only=True,␣
 ↪interpolation='linear')
primeiro_quatil = primeiro_quatil[['i Z']].to_numpy()
terceiro_quartil = data_pandas.quantile(q=0.75, axis=0, numeric_only=True,␣
 ↪interpolation='linear')
inicio = round(int(tamanho / primeiro_quatil))
final = int(tamanho - abs(inicio))
linha_inicio = data_pandas.loc[abs(inicio)]
linha_inicio = linha_inicio[['i Z']].to_numpy()
linha_final = data_pandas.loc[final]
linha_final = linha_final[['i Z']].to_numpy()
menor = (int(linha_final - linha_inicio) * 1.5) - inicio
maior = (int(linha_final - linha_inicio) * 1.5) + final
data_pandas[(data_pandas['i Z'] < menor)]
data_pandas[(data_pandas['i Z'] > maior)]

#Retirando dados para o gráfico

freq1 = data_pandas[['acfrequency']]
yr = data_pandas[['r Z']]
yi= data_pandas[['i Z']]
freq = freq1.to_numpy()
real = yr.to_numpy()
imag = yi.to_numpy()

fig = plt.figure()
fig, ax1 = plt.subplots()
ax.grid(True)

color = 'tab:red'
ax1.set_xlabel('Frequência')
ax1.set_ylabel('real(Z)', color=color)
ax1.plot(freq, real, color=color)
ax1.tick_params(axis='y', labelcolor=color)

ax2 = ax1.twinx()

color = 'tab:blue'
ax2.set_ylabel('imag(Z)', color=color)
ax2.plot(freq, imag, color=color)
ax2.tick_params(axis='y', labelcolor=color)
ax1.grid(True)
fig.tight_layout()
```

```
plt.show()
```

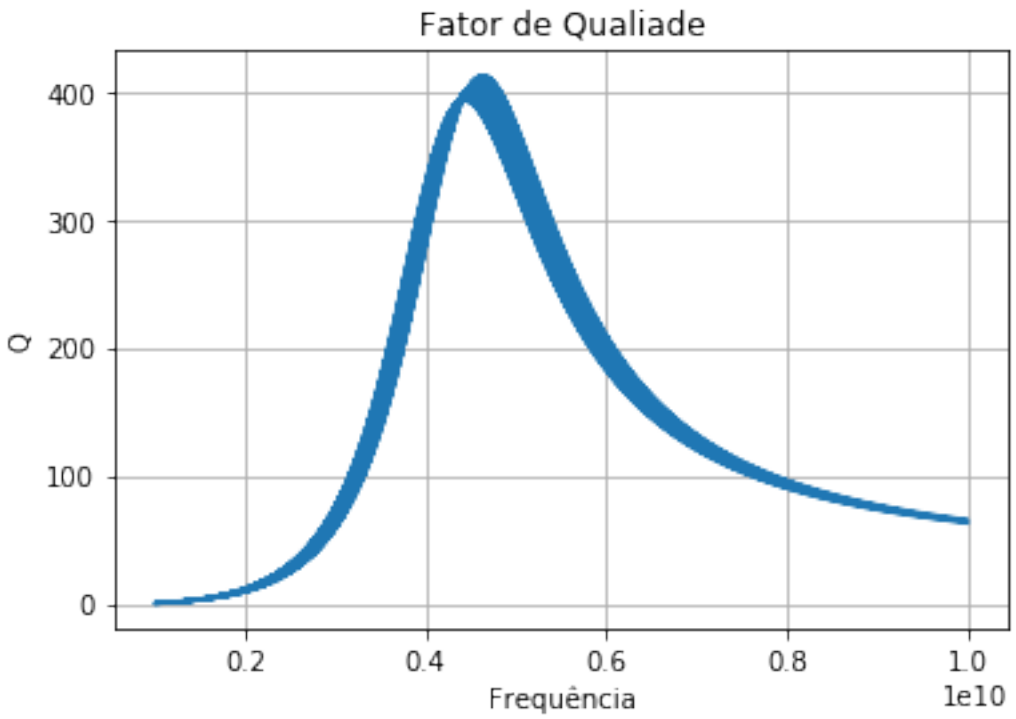
```
<Figure size 432x288 with 0 Axes>
```



par Determinado o Fator Q:

[181]:
```
q = abs(imag)/abs(real)

fig = plt.figure()
ax = fig.add_subplot(1, 1, 1)
ax.grid(True)
ax.plot(freq,q)
ax.set_xlabel('Frequência')
ax.set_ylabel('Q')
ax.set_title('Fator de Qualiade')
```

[181]:
```
Text(0.5, 1.0, 'Fator de Qualiade')
```



A seguir a determinação de Fr, de 4.63GHz :

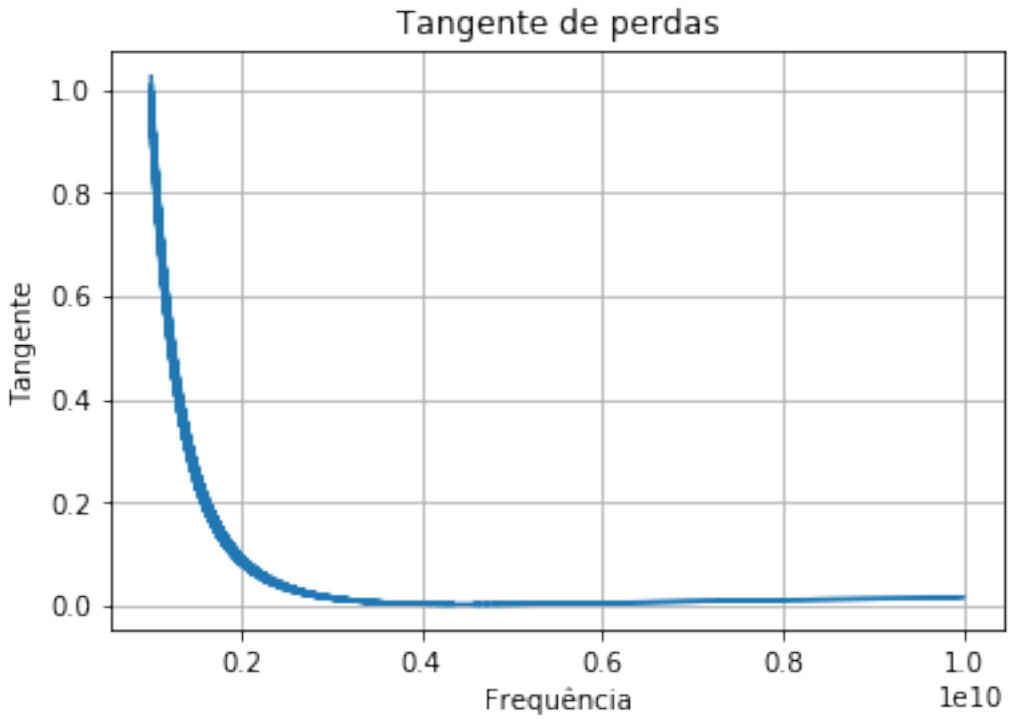
[182]:
```
data_pandas['Q'] = q
sortdata = data_pandas.sort_values(by = 'Q',ascending=False)
sortdata =  sortdata[['acfrequency','Q']]
sortf1 = sortdata.iloc[0]
#Extraindo Q
Qmax1 = float(sortf1[['Q']].to_numpy())
sortdata.iloc[0]
```

[182]:
```
acfrequency    4.634470e+09
Q              4.139452e+02
Name: 34700, dtype: float64
```

A seguir sua tangente de perdas:

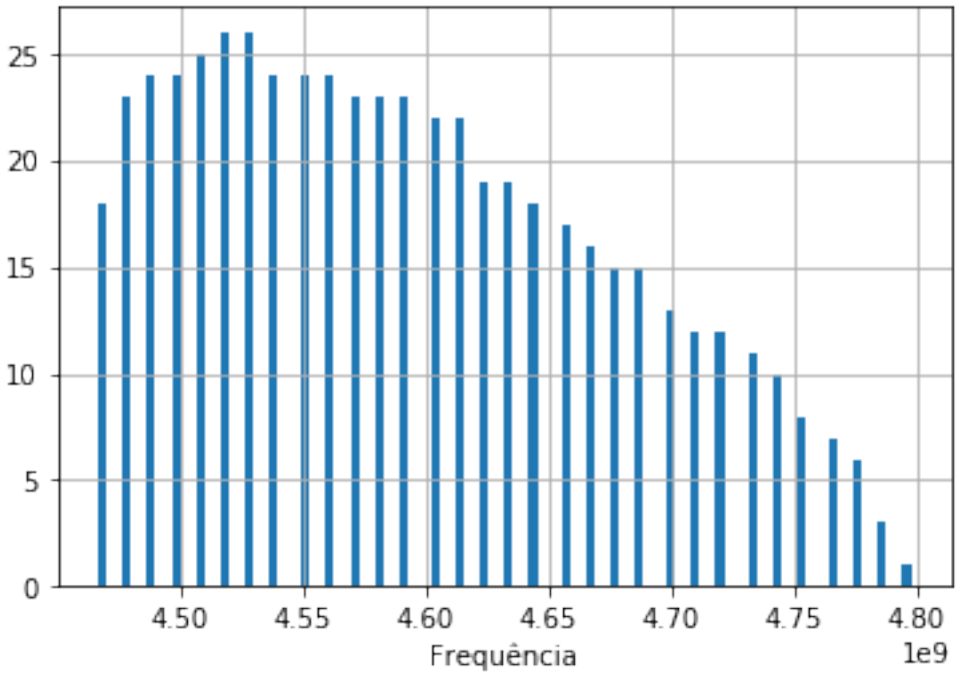
[183]:
```
tang = 1/q

fig = plt.figure()
ax = fig.add_subplot(1, 1, 1)
ax.grid(True)
ax.plot(freq,tang)
ax.set_xlabel('Frequência')
ax.set_ylabel('Tangente')
ax.set_title('Tangente de perdas')
```

[183]:
```
Text(0.5, 1.0, 'Tangente de perdas')
```



Temos a seguir o histograma da frequência sobre estes dados, considerando a tolerança do capacitor:

[184]:
```
mask1 = data_pandas['Q'] <= Qinit1
sortx = data_pandas.loc[~mask1]
freqs = sortx['acfrequency']
freqx = sortx['acfrequency'].to_numpy()

plt.hist(freqx, bins = 100)
plt.xlabel('Frequência')
plt.grid(True)
```



Análise estatística dos dados nos histogramas:

[185]:
```
freqs.describe()
```

[185]:
```
count    5.530000e+02
mean     4.593390e+09
std      8.378125e+07
min      4.466840e+09
25%      4.518560e+09
50%      4.581420e+09
75%      4.655860e+09
max      4.797330e+09
Name: acfrequency, dtype: float64
```

Podemos observar uma varição de 4.46 GHz á 4.80GHz ao incluir a tolerância do capacitor, um desvio padrão d 83.87MHz em torno de sua media de 5.59 GHz, observamos que a maioria das frequências estão sobre o ponto de 4.52GHz que era a frequência de auto-ressonância determinada anteriormente sem incuir a tolerância.

4 Questões

4.1 Questão 1:

O ESR (Equivalent Series Resistance), é a resistência equivalente em série representado no modelo como R1, sua utilização é a modelagem da dissipação da energia do capacitor real. Já o ESL(Equivalent Series Inductance), a indutância equivalente em série, representado como R2 no

modelo, modelando a interferência magnética interferindo na forma de resposta do capacitor ideal como o aumento da componente indutiva ao aumentar a frequência.

Ambas representas não idealidades do capacitor e participam do modelo para uma análise mais fiel ao real.

A tangente de perdas representa a defasagem entre a tensão e a corrente num capacitor por conta da presença do ESR, sendo um fator relacionado na dissipação de energia do capacitor, proporcional a parte real da impedância.

4.2 Questão 2:

Cada componente que participa do modelo representa, de forma simples, as não idealidades do capacitor, R1 represnta o ESR, R2 representa o EPR(Equivalent Parallel Resistance) e o indutor as característica de indução, o ESL.

Todos estes componentes representam as características de construção do capacitor.

4.3 Questão 3:

Para o cálculo do fator de qualidade, como foi feito anteriormente na segunda parte do experimento, não foi uma medição ideal para a medida exata na frequência de auto-ressonância, seria necessário deslocar esste valor de frequência de auto-ressonância adicionando um outro componente reativo, como foi feito na 4 parte do experimento, ao projetar o filtro passa-baixa, foi adicionando um indutor e por conta dessa adição, foi possível medir o fator de qualidade por meio da divisão da parte imaginária e real, como foi demonstrado anteriomente.

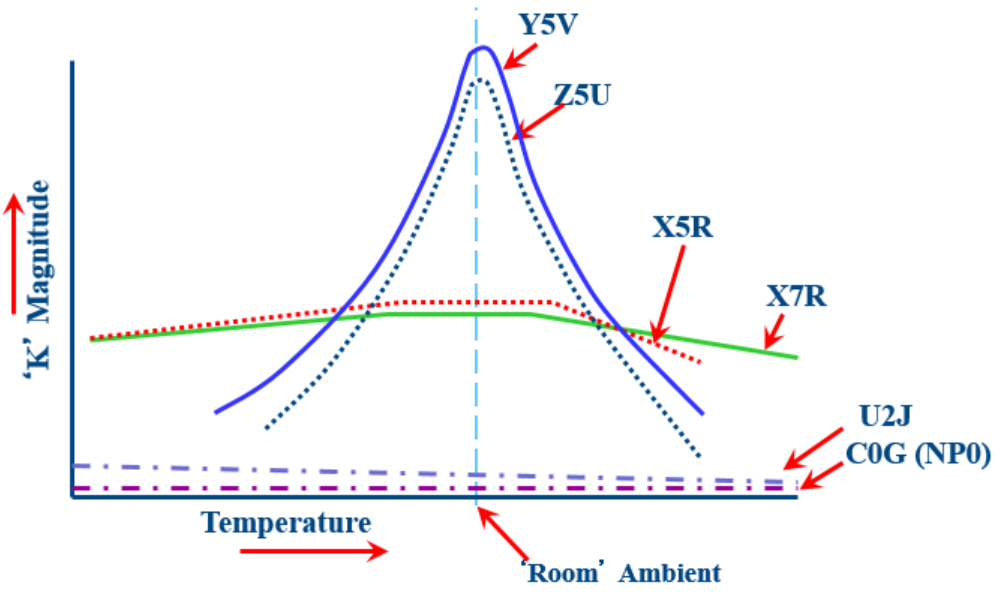
4.4 Questão 4:

O dielétrico COG, é altamente estável, não sendo muito afetado por temperatura, tensão aplicado ou envelhecimento, eles são feitos usando uma formulção de Zirconato de Cálcio, um material paraelétrico, que fornece sua estabilidade.

Já o X7R, possui um comportamento piezoelétrico, que gera ruído no sistema, e varia com a variação de temperatura, feitos típicamente de Titanato de Bário, um material ferroelétrico, de onde provém sua instabilidade na capacitância, no entanto ele possui certas vantagens como: alta eficência volumétrica para aplicações de suavização, by-pass, acoplamento e desacoplamento.

Por conta de seus materiais na fabricação, outra diferença, no modelo equivalente, a resistência ESR do X7R é 10x maior que seus equivalentes construidos com dielétrico COG, portanto sua dissipação de energia é maior e sua eficiência menor.

A seguir, gráficos comparando a temperatura e o envelhecimento dos capacitores:



EIA Code	PME - Precious Metal Electrodes BME- Base Metal Electrodes	Typical Aging (% / Decade Hrs)	Typical "Referee Time" (Hrs)
C0G	PME/BME	0	N/A
X7R	BME	2.0	1,000
X5R	BME	5.0	48

Fonte: https://ec.kemet.com/blog/mlcc-dielectric-differences/

4.5 Questão 5:

Eu recomendaria o uso deste capacitor para frequência abaixo da freqûencia de auto-ressonância, pelo menos abaixo de 4.32 GHz, que foi encontrado como seu limite mínimo considerando a tolerância do capacitor no modelo, apartir desta frequência o capacitor não se comporta mais como um capacitor, pois suas componentes indutivas são bem maiores, afetando seu uso no circuito.

4.6 Questão 6:

Não ocorreria uma grande variação, como já foi comentado anteriormente, isso se deve ao fato que os dielétricos COG, possuem uma variação de $0 \pm 30 ppm/°C$, eles são reconhecdos como capacitores de "temperature-compensating", por conta de sua baixa variação com a temperatura em comparação com outros dielétricos, por exemplo o XR7 varia por volta de $\pm 15\%$ no intervalo de -55°C a 125°C.

5 Conclusão

Ao finalizar este laboratório, observamos que o projeto de circuito para a utilização de altas frequência(RF) deve-se levar em conta muitas propriedades e parâmetros dos componentes, pois seu comportamento varia pelo aumento da frequêcia, como foi observado no capacitor, que no momento que o aumento da frequêcia de testes passou de sua frequência de auto-ressonância ele já possuia características mais indutivas.

Pelo experimento, observou-se a limitação para a obtenção do fator de qualidade na frequência de auto-ressonância apenas no modelo original, no entando ao utilizar no filtro projetado, podemos observar seu fator de qualidade máximo, utilizando as mesmas equações.

6 Referências

STEER, Michael. Microwave and RF Design (Third Edition, 2019). NC State University, 2019

Here's What Makes MLCC Dielectrics Different. Disponível em: <https://ec.kemet.com/blog/mlcc-dielectric-differences/>. Acesso em: 19 mar. 2020.

Understanding ESR and ESL in Capacitors. Disponível em: <https://circuitdigest.com/tutorial/understanding-esr-and-esl-in-capacitors>. Acesso em: 19 mar. 2020.

X7R, X5R, C0G...: A Concise Guide to Ceramic Capacitor Types. Disponívem em: <https://www.allaboutcircuits.com/technical-articles/x7r-x5r-c0g...-a-concise-guide-to-ceramic-capacitor-types/>. Acesso em: 19 mar. 2020.