



Guia Experimental e Roteiro para Relatório
Versão para simulação da
Exp. 06 : Resposta em Frequência de Circuitos RC e RLC

Elaboração: Profs. W.J. Salcedo e M. Lobo,
Revisão: E G./L.Y./MNPC/2020

No. USP	Nome	Nota	Bancada
11261281	Felipe Guaña Teti		
Data: 16/04/2020	Turmas:	Profs:	

Objetivos: Saber analisar a resposta em frequência de quadrupolos constituídos por circuitos passivos RC e RLC, utilizando métodos **de simulação computacional**.

Lista de materiais

- Osciloscópio digital (DSO-X 2002A, Agilent)
- Gerador de funções
- Multímetro digital portátil Yokogawa TY720
- Medidor RLC
- Resistores: 1 kΩ e 10 kΩ
- Capacitor: 100 nF
- Indutor: ~3,0 mH
- Planilha Excel e Software de cálculo

Obs: Esta experiência será feita através da simulação
dos circuitos elétricos propostos

- Onde diz “meça” uma variável (com voltímetro, osciloscópio, etc.) entenda que você deve obter o valor dessa variável a partir das simulações e dos recursos que o programa de simulação fornecer !
- Onde diz “dados experimentais” entenda que deve obter esses dados das simulações

1 RESPOSTA EM FREQUÊNCIA DE UM CIRCUITO RC:

1.1 Identificação e medição dos componentes passivos

Meça as resistências (R) e a capacitância (C) dos componentes da lista de materiais utilizando o multímetro portátil. Meça a indutância (L_s) e a resistência série do indutor (R_s) utilizando o medidor RLC na frequência de 1 kHz. Você pode também medir a capacitância (C_p) e resistência paralela parasitária (R_p) do capacitor com o medidor RLC na frequência de 1 kHz.

Tabela 1 – Valores dos componentes R, L e C

	Resistor 1	Resistor 2	Capacitor	Indutor (medido em 1kHz)	
Valor	R (kΩ)	R (kΩ)	C_p (nF)	L_s (mH)	R_s (Ω)
Nominal	1	10	100	3,0	8,0
Medido	--	--	--	--	--

1.2 Determinação da resposta em frequência do circuito RC

Monte o circuito mostrado na Figura 1, com os valores nominais dos componentes iguais a **R = 1 kΩ** e **C = 100 nF**, respectivamente. Programe o gerador de funções para fornecer uma **onda senoidal** de amplitude de **10 Vpp**. Meça os valores eficazes de entrada (V_E) e saída (tensão no capacitor V_s) com o osciloscópio.

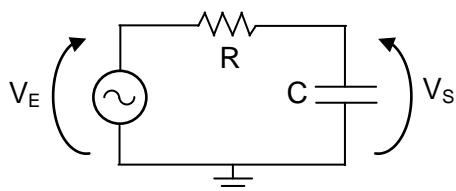


Figura 1- Circuito RC.

- a) Apresente as fórmulas para calcular o módulo do ganho linear $|G(j\omega)|$ e a fase $\varphi(j\omega)$ a partir dos parâmetros do circuito.

$$|G(j\omega)| = \frac{1}{\sqrt{1 + (\omega RC)^2}} = \frac{1}{\sqrt{1 + \left(\frac{\omega}{\omega_c}\right)^2}}$$

$$\varphi = -\arctan(\omega RC)$$

- b) Apresente a fórmula para obter $|G(j\omega)|$ (módulo do ganho linear) a partir das tensões experimentais.

$$|G(j\omega)|_{exp} = \frac{V_s}{V_e}$$

- c) Meça com o osciloscópio e anote na Tabela 2 os valores eficazes de V_E e de V_s , como também a defasagem entre esses sinais ($\Phi_{Vs} \rightarrow \Phi_{VE}$), para os valores de frequência f escolhidas.

Nota: para sinais com amplitude baixa recomenda-se utilizar o recurso “média” do osciloscópio (ACQUIRE), a fim de reduzir a flutuação da medição.

d) Calcule o módulo do ganho $|G(f)|$ a partir das tensões experimentais.

e) Indique o módulo do ganho $|G(f)|$ e a defasagem ϕ , calculados previamente (efetuados na preparação do experimento) utilizando-se os valores nominais dos componentes.

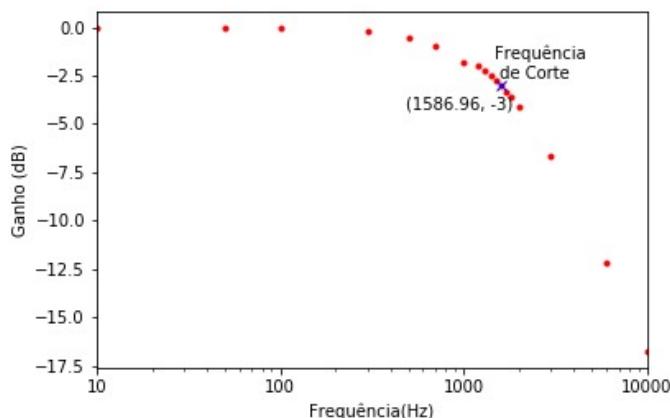
* Utilize a planilha eletrônica disponibilizada no Moodle para essa experiência para efetuar os cálculos, caso não tenha efetuado a preparação.

Tabela 2 - Resposta em frequência de um circuito RC.

Valores experimentais (simulados)				Cálculos a partir das tensões medidas
f (Hz)	V_E (CA V_{RMS})	V_S (CA V_{RMS})	Fase $\theta_{S \rightarrow E}$ $= \Phi_{VS,VE} (^\circ)$	Ganho $ G(f) $
10	3.5297	3.52959	0	0.999971
50	3.53113	3.52856	0	0.999272
100	3.53111	3.52085	-3.59961	0.997094
300	3.52677	3.44044	-10.704	0.975523
500	3.51796	3.3051	-17.5703	0.939493
700	3.51234	3.13726	-24.0492	0.893211
1 k	3.51035	2.85746	-32.8426	0.814009
1,2 k	3.51042	2.68056	-37.0241	0.798713
1,3 k	3.51062	2.59289	-39.2503	0.774638
1,4 k	3.511	2.50529	-41.3418	0.750907
1,5 k	3.51135	2.42025	-43.3025	0.727668
1,6 k	3.51157	2.33998	-45.1388	0.705034
1,7 k	3.5116	2.26274	-46.8582	0.683087
1,8 k	3.51245	2.1893	-48.4691	0.661881
2 k	3.51191	2.05112	-51.3738	0.62181
3 k	3.51209	1.52723	-61.0878	0.46566
6 k	3.51209	0.82854	-67.5711	0.247176
10 k	3.51169	0.505544	-63.1176	0.1451

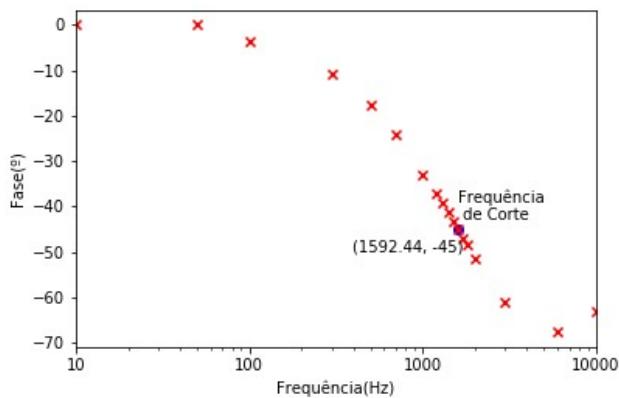
f) Anexe os gráficos de:

i. Módulo do ganho $|G(f)|$ (valores experimentais);



Foram marcados todos os pontos em vermelho. A frequência de corte, em azul, foi encontrada usando uma interpolação linear.

ii. Defasagem ($\phi_{vs,VE}$) em função da frequência f (valores experimentais).



Foram marcados todos os pontos em vermelho. A frequência de corte, em azul, foi encontrada usando uma interpolação linear.

g) Compare as curvas experimentais com as teóricas (traçadas na “preparação”). O modelo teórico foi adequado? Justifique sua resposta.

Sim, foi adequado. As curvas são bem parecidas, apesar de um leve crescimento na fase em altas frequências.

h) Determine a faixa de passagem¹ e a frequência de corte (f_c) a partir das curvas experimentais. Indique-as nos dois gráficos acima.

Dos gráficos:

$$f_c = 1592.44 \text{ Hz}$$

$$0 \leq f \leq f_c = 1592.44 \text{ Hz}$$

¹ Faixa de passagem é a faixa de frequências onde o ganho está dentro do intervalo de 3 dB em relação ao valor máximo (patamar).

- i) Calcule a frequência de corte teórica (f_c) do circuito, utilizando os valores experimentais dos componentes (Tabela 1). (Apresente seu cálculo).

$$f_c = \frac{1}{2\pi RC} \Rightarrow f_c = \frac{1}{2\pi 1000.100.10^{-9}} \Rightarrow f_c = 1591.55$$

- j) Compare o resultado obtido no item h (valor experimental) com o do item i (valor teórico) (indique o erro relativo!). Justifique eventuais discrepâncias.

$$\varepsilon = \left| \frac{\Delta f_c}{f_{c1}} \right| \Rightarrow \varepsilon = \frac{1592.44 - 1591.55}{1592.44} \Rightarrow \varepsilon = 0.56 \cdot 10^{-3}$$

Além do valor experimental ter sido uma interpolação linear, um dos fatores é a incerteza dos equipamentos de medição

- k) Quais seriam as possíveis aplicações para o circuito RC analisado neste experimento? Explique.

Esse é um típico circuito passa-baixas. Ou seja, ele é usado para filtrar sinais com baixas frequências de um conjunto.

2 RESPOSTA EM FREQUÊNCIA DE UM CIRCUITO RLC PARALELO:

Monte o circuito da Figura 2, com $R = 10 \text{ k}\Omega$ e os componentes L e C fornecidos. Note que R_s e L_s estão representando o modelo do indutor real utilizado na montagem. Programe o gerador de funções para fornecer uma **onda senoidal** com amplitude de **10 Vpp**.

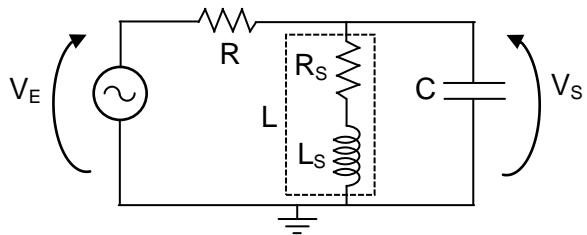


Figura 2- Circuito RLC.

2.1 Determinação de resposta em frequência do circuito RLC

- a) Indique o número das expressões da *Introdução Teórica* devem ser usadas para calcular $|G(j\omega)|$ e φ a partir dos parâmetros do circuito da Figura 2.

$$|G(j\omega)| = \left[\frac{1 + \left(\frac{R_s}{\omega L} \right)^2}{1 + \left(\frac{R_s}{\omega L} \right)^2 \left(1 + \frac{2R}{R_s} + (\omega RC)^2 \right) + \left(\frac{R}{\omega L} \right)^2 \left(1 - \left(\frac{\omega}{\omega_0} \right)^2 \right)^2} \right]^{1/2}$$

$$\varphi = \arctan \left[\frac{R \left(1 - \frac{\omega^2}{\omega_0^2} \left(1 + \frac{R_s^2}{\omega^2 L^2} \right) \right)}{\omega L \left(1 + \frac{R_s(R_s + R)}{\omega^2 L^2} \right)} \right]$$

Onde: $\omega_0 = 1/\sqrt{LC}$

- b) Meça com o osciloscópio os valores eficazes das tensões de entrada e saída do circuito (V_E e V_S), bem como a defasagem entre esses sinais ($\varphi_{VS,VE}$) para as diferentes frequências, e preencha a Tabela 3.

- c) Calcule o módulo do ganho $|G(f)|$ experimental a partir das tensões experimentais.

- d) Indique o módulo do ganho $|G(f)|$ e a defasagem φ , calculados previamente através das fórmulas teóricas indicadas no item 2.1.a (utilize a planilha disponibilizada) utilizando-se os valores nominais dos componentes.

Tabela 3 – Resposta em frequência da de circuito RLC

Valores experimentais (simulados)				Cálculos a partir das tensões medidas
f (Hz)	V _E (CH1) (CA V _{RMS})	V _S (CH2) (CA V _{RMS})	Fase θ _{2 → 1} = φ _{VS,VE} (°)	Ganho G(f)
1,0 k	3.52267	0.00716621	93.354	0.00203431
3 k	3.51123	0.021883	85.213	0.00623227
5 k	3.5137	0.0463624	96.8827	0.0131948
7 k	3.51442	0.109977	43.1436	0.031293
8 k	3.51546	0.219843	20.8539	0.0625361
8,5 k	3.5126	0.392018	10.6412	0.111603
8,8 k	3.51214	0.644878	4.7877	0.183614
9 k	3.51235	0.887022	1.08929	0.252544
9,2 k	3.51302	0.876727	-2.53371	0.249565
9,3 k	3.5159	0.766663	-4.16877	0.218056
9,4 k	3.51328	0.640949	-5.98401	0.182436
9,6 k	3.51292	0.474551	-9.53726	0.135087
10 k	3.51412	0.299304	-16.8976	0.0851717
11 k	3.51375	0.153539	-33.5173	0.0436967
12 k	3.51408	0.10506	-48.9742	0.0298968
15 k	3.51435	0.0565711	-85.7383	0.0160972
20 k	3.51425	0.0337776	-130	0.00961162

e) Utilizando a planilha eletrônica, **anexe** os seguintes gráficos a partir dos dados experimentais:

- i. O gráfico de |G(f)|;
- ii. O gráfico da fase (φ_{VS,VE}) em função da frequência, f.

f) Determine as frequências de corte inferior (f_{c1}) e superior (f_{c2}), a frequência de ressonância (f_R), a faixa de passagem e o índice de mérito (Q) do circuito a partir da curva experimental de |G(f)| (indique-os também no gráfico).

$$Q = \frac{f_r}{f_{c1} - f_{c2}} \Rightarrow Q = \frac{9000}{9443 - 8771} \Rightarrow Q = 13.39$$

g) Calcule a frequência de ressonância a partir dos parâmetros do circuito e compare com o valor obtido graficamente. Apresente seus cálculos (da frequência e do erro relativo).

$$f_c = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \Rightarrow f_c = 9188\text{Hz}$$

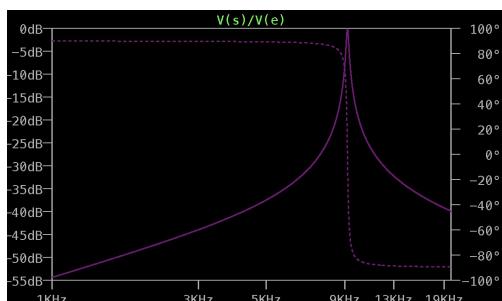
$$\varepsilon = \left| \frac{\Delta f_r}{f_{exp}} \right| \Rightarrow \varepsilon = \frac{9188 - 9000}{9000} \Rightarrow \varepsilon = 0.02$$

h) Analise o comportamento da defasagem entre o sinal de saída e o da entrada na faixa de passagem e na frequência de ressonância.

Há uma baixa defasagem na faixa de passagem.

Na frequência de ressonância a defasagem é nula.

i) Analisando o comportamento da defasagem do circuito (principalmente em baixa frequência), descreva como seria a curva experimental da defasagem caso a resistência parasitária do indutor, R_s , fosse zero?



Em pontilhado temos a defasagem. Perceba que a faixa de passagem é bem menor.
Ainda, para baixas frequências, a defasagem permanece quase constante.

2.2 Aplicação de funções automáticas do Gerador de Funções para análise da resposta em frequência de circuitos.

Nesta parte da experiência faremos uma observação experimental do comportamento ressonante do circuito no osciloscópio, utilizando-se um recurso do gerador de funções **AGILENT 33500B** denominado **SWEETP**. Por meio de tal programação, avaliaremos a resposta em frequência do circuito de forma indireta. Ao ativar a função **SWEETP**, o gerador de funções fornecerá na sua saída um sinal senoidal com frequência variável, com taxa de repetição do sinal definida pelo usuário. Neste experimento programaremos o gerador de funções para fornecer um sinal senoidal que variará sua frequência de 5 kHz a 15 kHz linearmente a cada intervalo de 100 ms. A resposta do circuito V_S deve ser observada no osciloscópio.

Para programar o sinal V_E no gerador no modo SWEETP, mantendo $V_E = 10$ Vpp:

- Tecle o botão **SWEETP** no painel do gerador. Na sequência, tecle as seguintes funções, impondo os valores indicados:
- STARTFREQ = 5 kHz,
- STOPFREQ = 15 kHz,
- SWEETPTIME = 100 ms,
- SWEET TYPE = linear,
- SWEET = ON.

No osciloscópio:

- Certifique-se que o modo “acquire” ou “média” do seu osciloscópio esteja desabilitado.
- Mude a escala de tempo do osciloscópio para visualizar os sinais, de modo a identificar um ponto de máximo dentro do intervalo indicado no SWEETIME (no seu caso é igual a 100 ms).

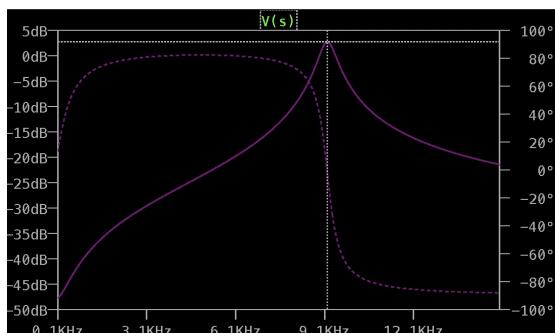
Para correlacionar as leituras das medições da forma da onda na escala do tempo do osciloscópio com medições na escala em frequência, utilize a seguinte correspondência: cada intervalo de 100 ms (adotado na função SWEETIME) corresponde a um intervalo de 10 kHz em frequência (que foi definido pela frequência final menos a frequência inicial adotadas).

Para estabilizar o sinal na tela do osciloscópio utilize o trigger externo.

★ *Veja o vídeo sobre a função Sweep para entender melhor esta função.*

Com isso, esboce a curva obtida no osciloscópio por meio deste recurso do gerador e determine as seguintes grandezas relacionadas à tensão V_S com auxílio dos cursores:

- i. V_{max} e $V_{max}/\sqrt{2}$, respectivamente;
- ii. a faixa (ou banda) de passagem (em Hz); $V_{max} = 1.365V$ $\frac{V_{max}}{\sqrt{2}} = 0.965V$
- iii. a frequência de ressonância.
- iv. Determine o Q do circuito através deste esboço. $f_{c1} = 8723Hz$ $f_{c2} = 9690Hz$



$$f_r = 9192Hz$$

$$Q = 9.5$$

- i. O circuito RLC acima analisado pode ser aplicado em que tipo de filtro?

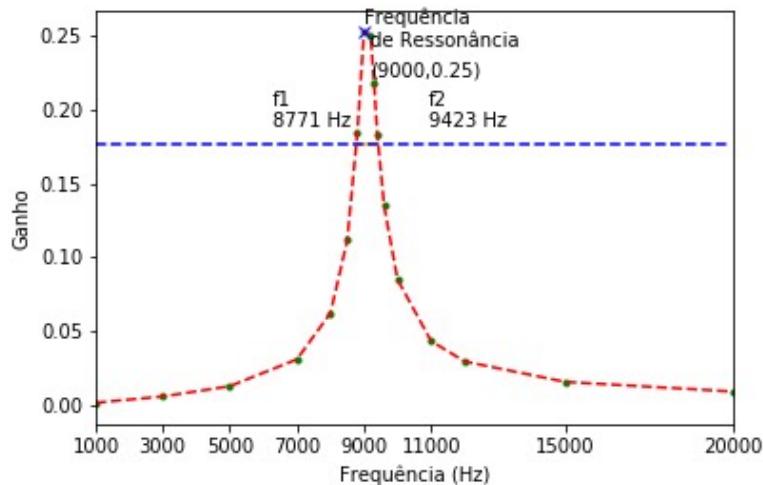
O circuito pode ser utilizado em um filtro passa-banda.

Ele atua deixando apenas uma faixa de frequência passar. No caso, entre 8723Hz e 9690Hz.

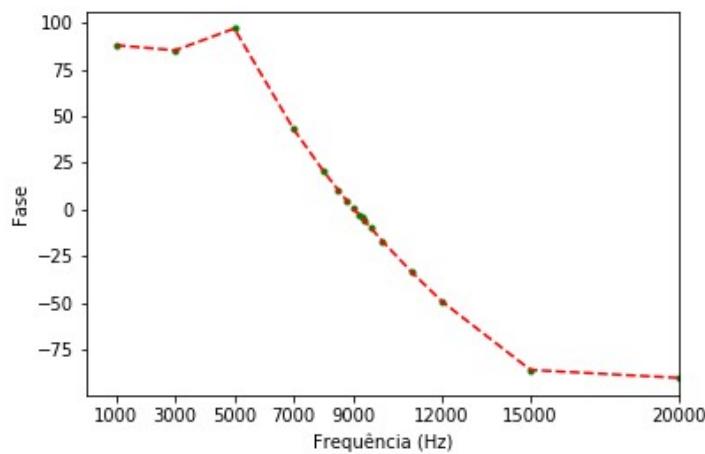
- ii. Discuta como a função Sweep observada no osciloscópio pode ajudar a caracterizar o comportamento de circuitos em frequência.

A função Sweep nos ajuda a obter a Função do Ganho e Função da Fase muito mais rápido do que os processos realizados anteriormente.

1) Gráfico de $G(jw)$:



2) Gráfico de $\text{Ph}(jw)$:



Os Gráficos foram feitos usando a biblioteca “matplotlib.pyplot” no Jupyter Notebook. Para obter as frequências de corte foi usado uma interpolação linear da biblioteca “scipy”.
Todo o código feito nesse relatório estará disponível em um repositório do github.