



ESCOLA POLITÉCNICA DA UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO  
Departamento de Engenharia de Sistemas Eletrônicos - PSI – EPUSP  
PSI 3212- LABORATÓRIO DE CIRCUITOS ELÉTRICOS

## 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
Data:	Turmas:	Profs:	

---

**Objetivos:** Saber analisar a resposta em frequência de quadrapolos 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 k $\Omega$  e 10 k $\Omega$
- 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 ( $L$ ) e a resistência em série do indutor ( $R_s$ ) utilizando o medidor RLC na frequência de 1 kHz. Meça a capacitância ( $C_p$ ) e resistência paralela parasitária ( $R_p$ ) do capacitor com o medidor RLC na frequência de 1 kHz.

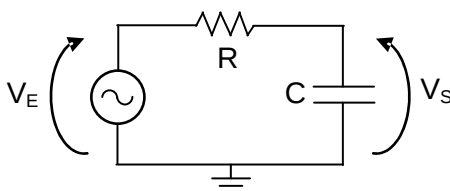
1.1  
Utilizar estes valores nas simulações

**Tabela 1 – Valores dos componentes  $R$ ,  $L$  e  $C$**

	Resistor 1	Resistor 2	Capacitor	Indutor (medido em 1kHz)	
Valor	$R$ (k $\Omega$ )	$R$ (k $\Omega$ )	$C_p$ (nF)	$L_s$ (mH)	$R_s$ ( $\Omega$ )
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  $R = 1 \text{ k}\Omega$  e  $C = 100 \text{ nF}$ , 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  $\phi(j\omega)$  a partir dos parâmetros do circuito.

**Temos que  $G(j\omega) = 1/(1 + j\omega RC)$ , portanto  $|G(j\omega)| = 1/\sqrt{1 + (\omega RC)^2}$ .**

**$\phi(j\omega) = -\arctan(\omega RC)$**

**$f_c(RC) = 1/(2\pi RC)$ ;  $\omega_c = 1/RC$**

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

**$|G(j\omega)| = V_{Sef}/V_{Eef}$ , sendo  $V_{Sef}$  e  $V_{Eef}$  as tensões eficazes da saída e da entrada respectivamente.**

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 ( $\phi_{VS}$  e  $\phi_{VE}$ ), para os valores de frequência  $f$  escolhidas.

c) Dica: Medição de fase: Medir utilizando "probes" de tensão, uma na entrada e outra na saída do circuito. Para ativar o ganho e fase na probe de saída, vocês devem clicar com o botão direito na probe de saída, ir em propriedades, ir na aba "parâmetros" e verificar se o "V(gain\_AC)" e o "V(phase)" estão como "yes" na coluna "Show" – se não estiverem, troquem para "yes". Em seguida, mudem para a aba "General" e cliquem em "Gain/phase reference probe: escolhendo a probe que está no gerador

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

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

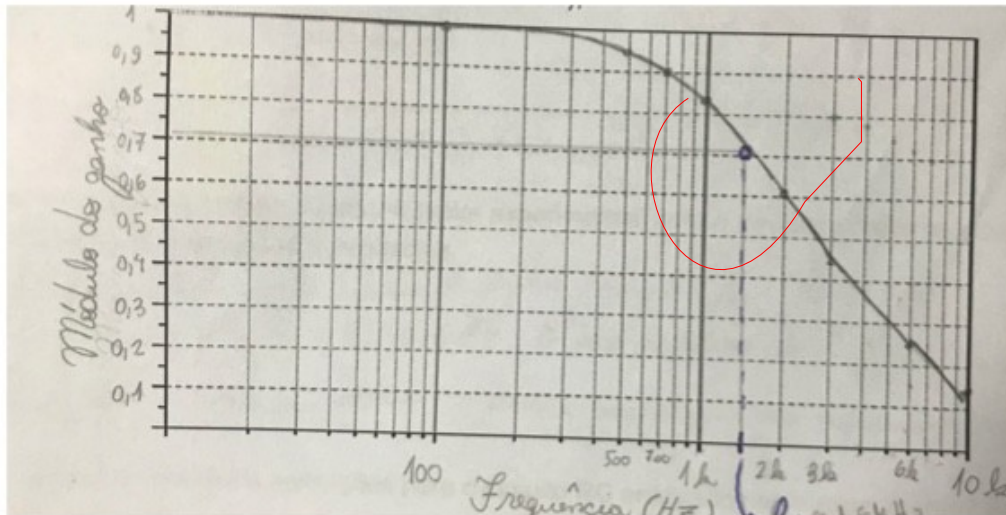
☐ Utilize a planilha eletrônica disponibilizada no Moodle para essa experiência para efetuar os cálculos, caso não tenha efetuado a preparação.

**Tabela 2 - Resposta em frequência de um circuito RC.**

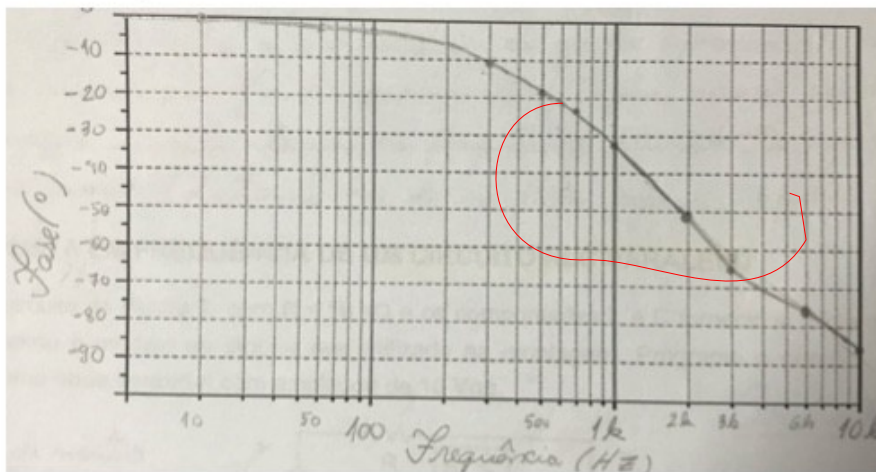
Valores experimentais (simulador) <span style="color: red;">Dica do item 1.2 e)</span>				Cálculos a partir das tensões medidas
f (Hz)	$V_E$ (CA RMS)	$V_S$ (CA RMS)	Fase $\theta_{S \rightarrow E}$ $= \phi_{V_S, V_E} (^{\circ})$	Ganho $ G(f) $
10	3,53 V	3,53 V	0,9°	1,00
50	3,53 V	3,53 V	-1,2°	1,00
100	3,53 V	3,52 V	-2,9°	1,00
300	3,53 V	3,46 V	-10,1°	0,98
500	3,52 V	3,35 V	-17,2°	0,95
700	3,51 V	3,20 V	-23,8°	0,91
1 k	3,48 V	2,94 V	-32,4°	0,84
1,2 k	3,47 V	2,76 V	-38,1°	0,79
1,3 k	3,46 V	2,66 V	-40,9°	0,77
1,4 k	3,45 V	2,57 V	-41,6°	0,74
1,5 k	3,45 V	2,49 V	-43,2°	0,72
1,6 k	3,44 V	2,41 V	-45,2°	0,70
1,7 k	3,44 V	2,33 V	-46,7°	0,68
1,8 k	3,43 V	2,27 V	-48,1°	0,66
2 k	3,42 V	2,12 V	-51,4°	0,62
3 k	3,39 V	1,57 V	-61,6°	0,46
6 k	3,35 V	0,86 V	-75,7°	0,26
10 k	3,36 V	0,53 V	-80,6°	0,16

f) Anexe os gráficos de:

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



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



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

**Comparando com as curvas traçadas na “preparação”, temos que o modelo teórico é adequado, pois os gráficos se assemelham**

h) Determine a faixa de passagem<sup>1</sup> e a frequência de corte ( $f_c$ ) a partir das curvas experimentais. Indique-as nos dois gráficos acima.

**A frequência de corte equivale a frequência do ganho de  $1/\sqrt{2} = 0,707 \rightarrow F_c = 1,5$  kHz**

**A faixa de passagem é a frequência abaixo da frequência de corte, ou seja, frequências abaixo de 1,5 kHz.**

<sup>1</sup> 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).

**A frequência de corte teórica é calculada por  $F_c = (1/(2*\pi*R*C))$**

$$\approx 1/(2*3,14*1000*100*10^{-9}) \approx 1592,4 \text{ Hz}$$

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

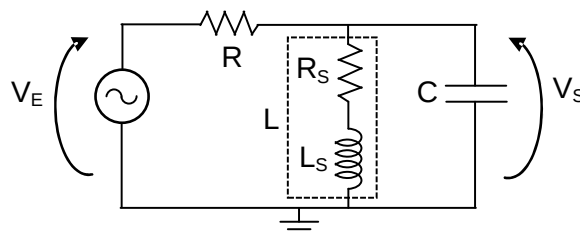
**Os valores se encontram impressionantemente próximos, já que devido a simulação, todos os elementos se comportam idealmente.**

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

**O circuito RC analisado pode ser usado como um filtro passa-baixas, visto que o módulo do ganho aproxima-se de 1 para valores menores que  $f_c$  e aproxima-se de 0 para valores muito maiores que  $f_c$ . Logo o circuito atenua as frequências elevadas e reforça as frequências mais baixas, tratando-se de um filtro passa-baixas.**

## 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  $\phi$  a partir dos parâmetros do circuito da Figura 2.

**Devem ser utilizadas as expressões 11 e 12.**

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 ( $\phi_{V_S, V_E}$ ) 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  $\phi$ , 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) Dica do item 1.2 c)				Cálculos a partir das tensões medidas
f (Hz)	$V_E$ (CH1) (CA $V_{ms}$ )	$V_S$ (CH2) (CA $V_{ms}$ )	Fase $\theta_{2 \rightarrow 1}$ $= \phi_{VS,VE} (^{\circ})$	Ganho $G(f)$
1,0 k	3,35 V	72 mV	63°	0,002
3 k	3,36 V	217 mV	76°	0,006
5 k	3,37 V	448 mV	73°	0,013
7 k	3,39 V	832 mV	62°	0,031
8 k	3,43 V	915 mV	45°	0,061
8,5 k	3,47 V	941 mV	29°	0,102
8,8 k	3,49 V	950 mV	16°	0,161
9 k	3,50 V	953 mV	7°	0,227
9,2 k	3,51 V	955 mV	-3°	0,273
9,3 k	3,51 V	954 mV	-8°	0,256
9,4 k	3,50 V	953 mV	-13°	0,223
9,6 k	3,49 V	950 mV	-22°	0,161
10 k	3,46 V	940 mV	-37°	0,096
11 k	3,41 V	898 mV	-57°	0,047
12 k	3,39 V	843 mV	-67°	0,032
15 k	3,37 V	576 mV	-77°	0,017
20 k	3,36 V	346 mV	-83°	0,010

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

- O gráfico de  $|G(f)|$ ;
- O gráfico da fase ( $\phi_{VS,VE}$ ) em função da frequência, f.

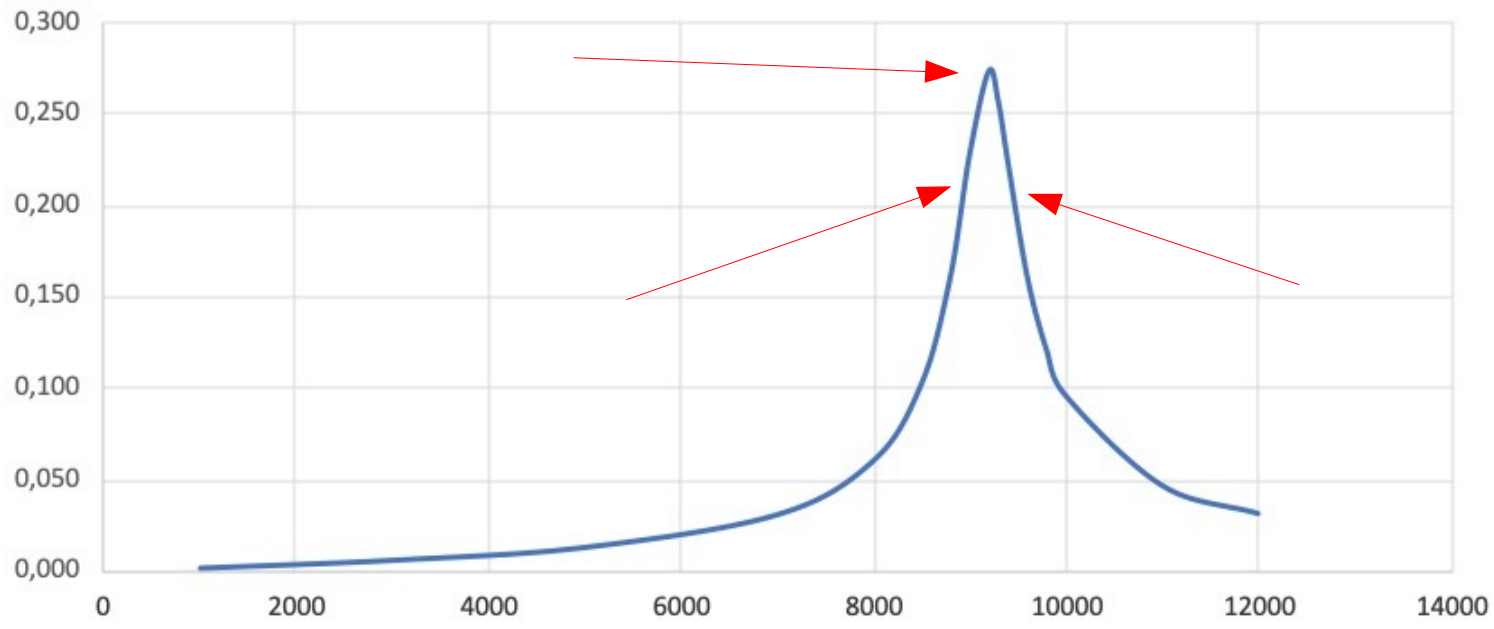
### Anexados ao final do arquivo

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).

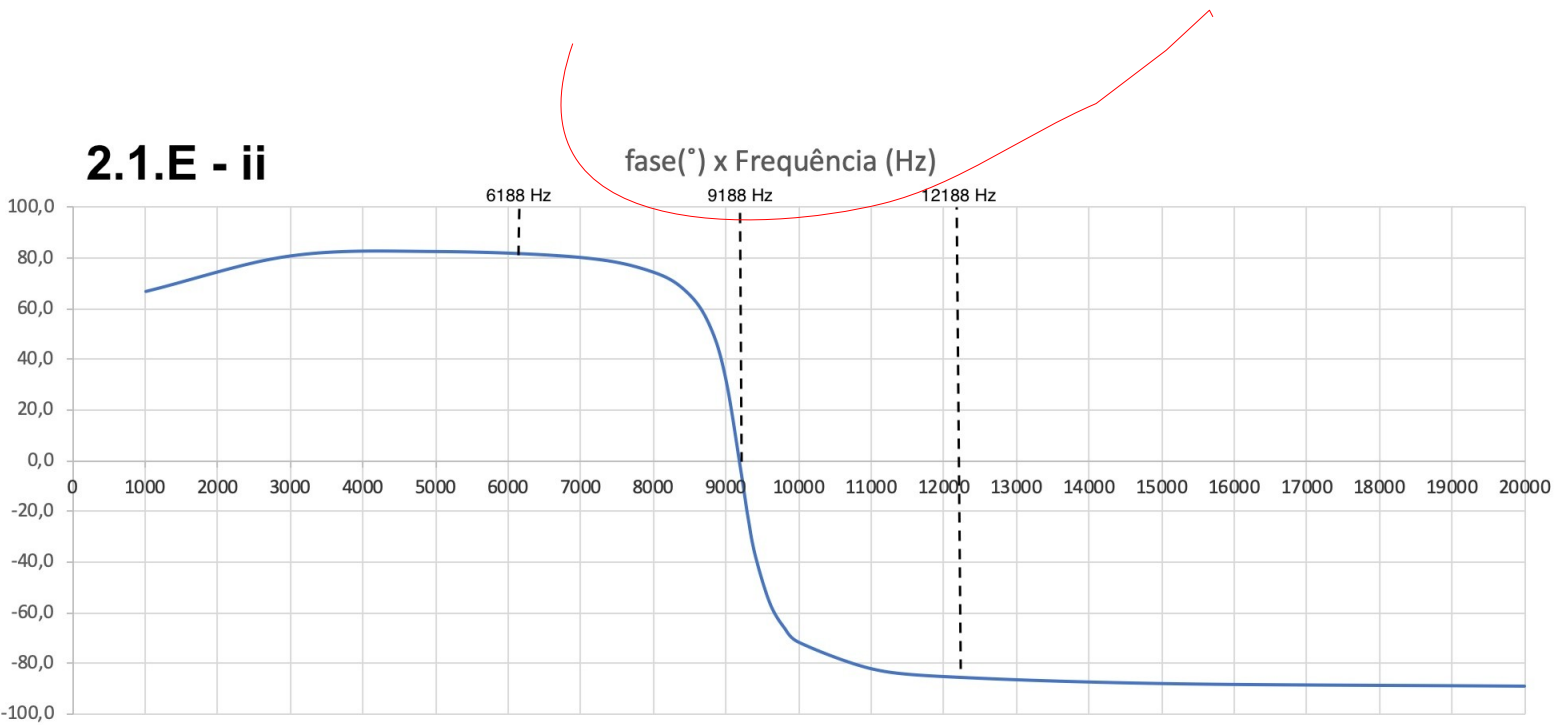
**Pelo gráfico a  $f_R \approx 9\text{kHz}$**

2.1.E - i

mod G(f)



2.1.E - ii





- 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).

$$f_r = 1/[2\pi\sqrt{LC}] = 1/[2 \cdot 3,14 \cdot \sqrt{(0,003 \cdot 0,0000001)}] \approx 9188,81 \text{ Hz}$$

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

**Na frequência de ressonância, a defasagem é nula. Na frequência de passagem, a defasagem começa com um valor positivo e decresce exponencialmente até o valor negativo.**

- 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?

**Caso  $R_s$  fosse nulo, teríamos que a fase iniciaria no valor  $90^\circ$  e decresceria até  $-90^\circ$**

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

Fazer uma simulação em frequência "AC SWEEP" de 5 KHz a 15 KHz com  $V_e = 10 \text{ Vpp}$

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

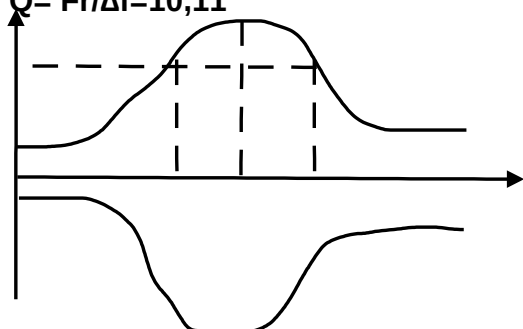
Para correlacionar as leituras das medições da forma da onda na escala do tempo do osciloscópio com medições na escala em frequência, utilize a seguinte correspondência: cada intervalo de 100 ms (adotado na função SWEETIME) corresponde a um intervalo de 10 kHz em frequência (que foi definido pela frequência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

- $V_{\max}$  e  $V_{\max}/\sqrt{2}$ , respectivamente;    **i)  $V_{\max} = 3,45V$ ;  $V_{\max}/\sqrt{2} = 2,47V$**
- a faixa (ou banda) de passagem (em Hz);    **ii)  $f_{c1}=8825Hz$ ,  $f_{c2}=9742Hz$ , logo a faixa de passagem é  $\Delta f=917Hz$**
- a frequência de ressonância.    **iii) Pelo osciloscópio obtemos que a frequência de ressonância equivale  $9,27kHz$**
- Determine o Q do circuito através deste esboço.    **iv)  $Q = f_r/\Delta f = 10,11$**



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

**Pode ser usado como filtro passa faixas**

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

**A função Sweep nos permite analisar a resposta em frequência do circuito, em um intervalo pré-determinado de frequências, desta forma é possível obter as bandas de passagem, frequência de ressonância entre outras informações.**