



**ESCOLA POLITÉCNICA DA UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO**  
**Departamento de Engenharia de Sistemas Eletrônicos - PSI - EPUSP**

**PSI 3031 - LABORATÓRIO DE CIRCUITOS ELÉTRICOS**

Edição 2018

Elisabete Galeazzo e Leopoldo Yoshioka

**Experiência 8: REDES DE SEGUNDA ORDEM**

**ROTEIRO EXPERIMENTAL E GUIA**

No. USP	Nome	Nota	Bancada

<b>Data:</b>	<b>Turmas:</b>	<b>Profs:</b>
--------------	----------------	---------------

**Lista de materiais**

- Fonte de tensão E3631A da Agilent
- Gerador de funções
- Osciloscópio
- Multímetro Tektronix TX3 portátil
- Medidor LCR
- Resistores (2)  $R = 470 \text{ k}\Omega$
- Capacitores (2)  $C = 3,3 \text{ nF}$ ; (2)  $10 \text{ nF}$ ; (1)  $4,7 \text{ nF}$ ; (2)  $1 \text{ nF}$
- Indutores (2)  $L = 3,3 \text{ mH}$
- Potenciômetro de  $10 \text{ k}\Omega$
- Protoboard, fios e cabos

**INTRODUÇÃO**

Neste experimento as redes elétricas de segunda ordem serão formadas por um resistor, um indutor e um capacitor associados em série ou em paralelo (circuitos RLC).

# 1. RESPOSTA TRANSITÓRIA DE UM CIRCUITO RLC SÉRIE

*O objetivo deste item é analisar as três possíveis respostas transitórias de circuitos RLC série, categorizadas como oscilação subamortecida, oscilação criticamente amortecida e oscilação superamortecida, por meio de valores apropriados dos componentes dos circuitos.*

Execute as tarefas a seguir, antes de montar o circuito abaixo (Figura 1):

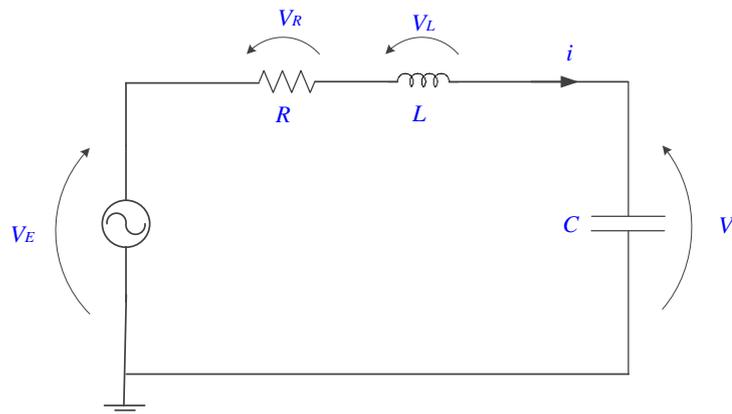


Figura 1 – Circuito RLC série com potenciômetro de 10 k $\Omega$ , L = 3,3 mH; C = 3,3 nF.

**Atenção:** O potenciômetro, que apresenta resistência variável, será o elemento resistivo do circuito que deverá ter seu valor ajustado (manualmente) para atender as diferentes solicitações do experimento. Analisaremos a tensão de saída do circuito sobre o capacitor  $v_C(t)$ .

1.1 Avalie a faixa de excursão de resistência do potenciômetro (Figura 2) e indique os valores experimentais na Tabela 1. A seguir, ajuste-o para fornecer “zero” ohms ou a menor resistência possível (para isso, escolher pinos 1-2 ou 2-3).

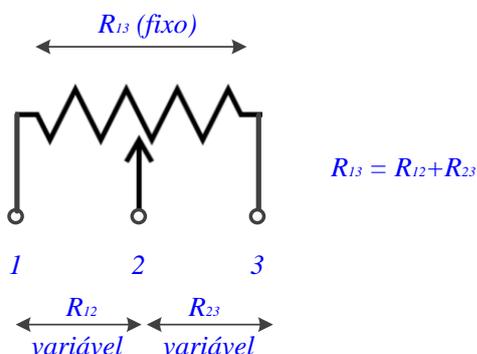


Figura 02 – Simbologia e imagem do potenciômetro de 10 k $\Omega$  adaptado para o experimento.

**1.2** Meça a resistência série ( $R_{LS}$ ) e a indutância série ( $L_s$ ) do indutor L com um LCR meter na frequência de 1 kHz (indique-as na Tabela 1). Meça também a capacitância paralela  $C_p$  e a resistência paralela ( $R_{Cp}$ ) do capacitor de 3,3 nF na frequência de 1 kHz com o LCR meter (indique os valores na Tabela 1);

**Tabela 1** – valores experimentais dos componentes do circuito RLC:

Potenciômetro	Indutor (em 1 kHz)	Capacitor (em 1 kHz)
Pinos ____ e ____: $R_{min} =$ _____ $R_{max} =$ _____	$L_s =$ _____	$C_p =$ _____
Pinos 1 e 3: $R_{fixa} =$ _____	$R_{LS} =$ _____	$R_{Cp} =$ _____

**1.3** Monte o circuito RLC série.

Ajuste o sinal do gerador para uma onda quadrada de 1kHz e 10 Vpp.

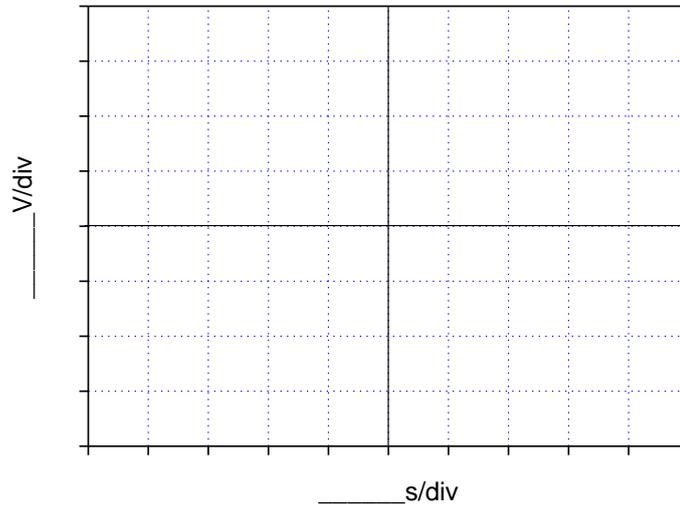
Se necessário, varie a frequência da onda quadrada para melhor visualização da resposta transitória do circuito até alcançar o regime permanente em corrente contínua, para cada semiciclo do sinal do gerador.

Observe os três regimes de transitórios qualitativamente, variando-se a resistência do potenciômetro.

**1.4 Oscilação Amortecida:**

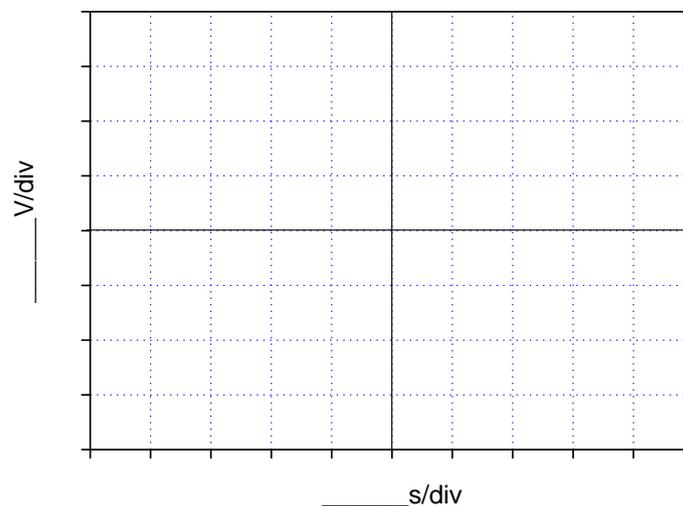
Encontre a condição de oscilação subamortecida do circuito, ajustando o valor do potenciômetro. Procure obter 5 a 10 ciclos de oscilação em cada semiciclo do sinal do gerador.

Descreva o sinal do gerador, ( $v_e(t)$ ), programado para obtenção da oscilação amortecida, e esboce no gráfico a seguir dois períodos das tensões de entrada e de saída do circuito nesta condição.



**1.5** Abra o circuito para medir a resistência do potenciômetro nessa condição (utilize as ponteiros do multímetro para acessar os terminais do dispositivo, sem retirá-lo do protoboard). Por que a resistência do componente deve ser medida com o circuito “em aberto”? Determine a resistência equivalente entre os terminais do capacitor. Apresente seus cálculos.

**1.6** Com o circuito novamente fechado, ajuste as escalas do osciloscópio para maximizar um semiciclo do sinal do gerador na tela do equipamento, mantendo visíveis os ciclos de oscilação mais significativos de  $v_C(t)$ . Faça um esboço dos dois sinais nessa condição.



**1.7** Meça a frequência de oscilação subamortecida ( $f_d$ ) a partir dos ciclos de oscilação de  $v_C(t)$ . Calcule  $\omega_d$ .

**1.8** Para que valor tende a tensão no capacitor após cada transitório? Por quê?

**1.9** O objetivo deste item é determinar experimentalmente o fator de amortecimento ( $\alpha$ ) da função exponencial esboçada no item 1.6, que contorna os valores de pico da oscilação amortecida num transitório. Para isso, é necessário analisar a máxima variação de tensão em cada ciclo de um mesmo transitório com relação ao valor médio da oscilação.

**Dica:** Para obtenção de  $\alpha$ , meça a amplitude da oscilação e o instante em dois picos da curva de oscilação num transitório, conforme indicação da Tabela 2 (por exemplo, meça a amplitude de oscilação máxima no primeiro e no sexto pico da oscilação, para minimizar erros).

Tabela 2: Dados extraídos da oscilação do capacitor\*.

<b>n</b> ("n" é n° do pico)	<b>A<sub>n</sub> (V)</b> (Amplitude máxima da oscilação" no pico "n")	<b>t<sub>n</sub> (s)</b>
1		
6		

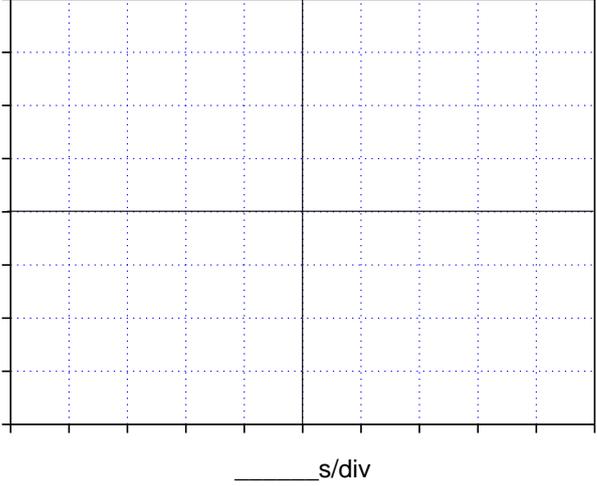
\* em relação ao seu valor médio no patamar!

Lembrando que a oscilação amortecida da tensão no capacitor é modulada pela expressão  $A(t) = A_0 e^{-\alpha t}$ , deduza a relação matemática entre  $\alpha$  e os parâmetros experimentais ( $A_1, A_n$  e  $\Delta t_n$ , (sendo  $\Delta t_n = t_n - t_1$ )).



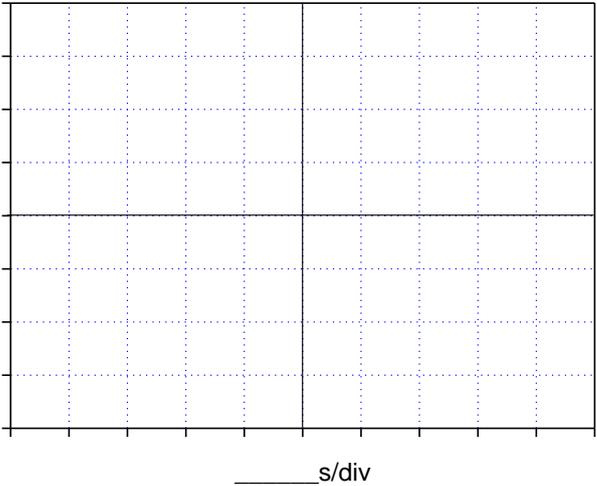
### 1.11 Oscilação Criticamente Amortecida:

Altere a resistência do circuito para visualizar a condição de oscilação criticamente amortecida. Meça a resistência do potenciômetro nesta condição e calcule a resistência equivalente do circuito. Faça um esboço do sinal nesta condição em gráfico apropriado, utilizando-se a mesma escala adotada no experimento anterior. Represente dois períodos do sinal no gráfico.

Características do sinal de entrada ( $v_e(t)$ ) para obtenção da oscilação criticamente amortecida:	
R potenciômetro nesta condição:	
R equivalente:	

### 1.12 Oscilação Superamortecida

Altere a resistência do circuito para visualizar a condição de oscilação superamortecida. Meça a resistência do potenciômetro e calcule a resistência equivalente do circuito nesta condição. Faça um esboço da curva obtida no osciloscópio em gráfico apropriado, adotando-se a mesma escala dos dois gráficos anteriores.

Características do sinal de entrada ( $v_e(t)$ ) para obtenção da oscilação criticamente amortecida:	
R potenciômetro nesta condição:	
R equivalente:	

## 2. RESPOSTA DO CIRCUITO RLC EM FREQUÊNCIA

---

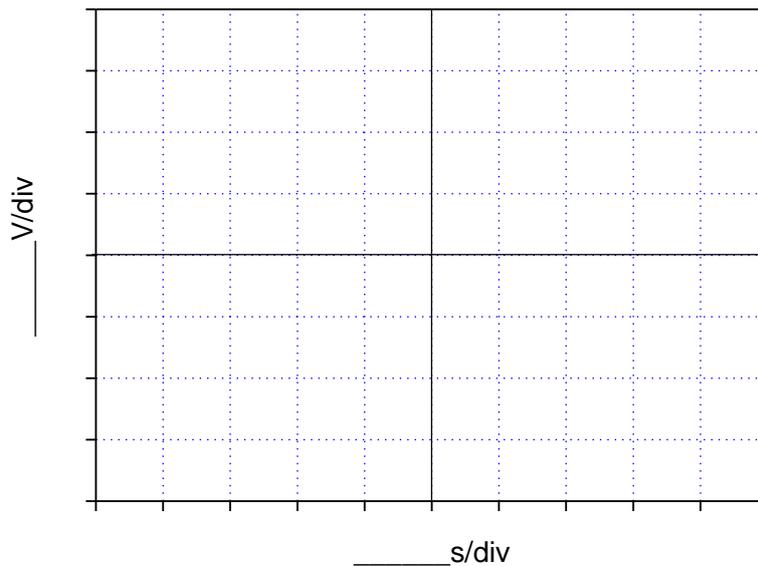
*O objetivo deste item é obter a frequência de ressonância do circuito RLC série experimentalmente.*

---

**2.1** Altere o circuito RLC analisado para a mesma condição de oscilação subamortecida indicada no item 1.4 e aumente a resistência do potenciômetro para obter cerca de 2 a 3 oscilações apenas<sup>1</sup>. A seguir, altere gradativamente a frequência da onda quadrada até chegar em 45 kHz, e visualizando o comportamento da tensão no capacitor no osciloscópio até chegar neste valor.

Esboce o sinal observado no capacitor ao chegar a 45 kHz.

Circuito RLC série com os seguintes componentes:  $R = \underline{\hspace{2cm}}$ ;  $L = \underline{\hspace{2cm}}$  e  $C = \underline{\hspace{2cm}}$



**2.2** Por que não foram observados os fenômenos transitórios analisados no item 1?

---

<sup>1</sup> Esse procedimento é conveniente para proteger o circuito de correntes elevadas na condição de ressonância.

**2.3** Encontre a frequência de ressonância do circuito ( $f_o$ ), alterando-se a frequência do sinal de alimentação. Comente e justifique o procedimento experimental aplicado.

**2.4** Dada a relação apresentada entre  $\omega_o$ ,  $\omega_d$  e  $\alpha$  na introdução teórica, calcule  $f_o$  a partir de  $\omega_d$  e  $\alpha$  obtidos experimentalmente nos itens 1.7 e 1.9. Compare o valor calculado com o valor de frequência de ressonância obtida experimentalmente. O que se pode concluir?

### ITEM ADICIONAL:

## 3. BATIMENTO AMORTECIDO COM CIRCUITOS RLC

---

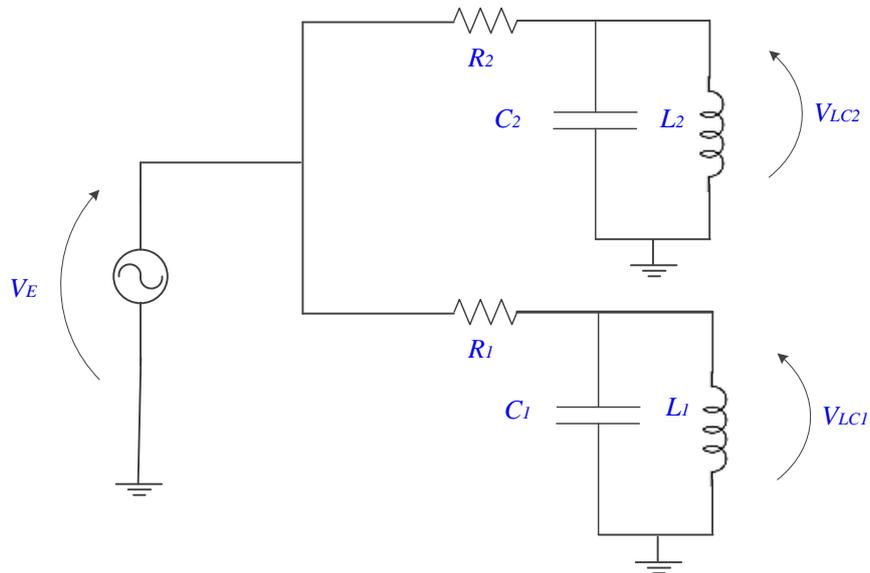
*O objetivo aqui é visualizar o efeito denominado batimento amortecido ao se somar os sinais de transitórios de dois circuitos RLC com frequências de oscilação amortecidas muito próximas entre si.*

---

**3.1** Monte os dois circuitos RLC paralelos, conforme esboço da Figura 03. Utilize os seguintes valores para os componentes:

$R_1 = R_2 = 470 \text{ k}\Omega$ ;  $L_1 = L_2 = 3,3 \text{ mH}$ ;  $C_1 = 10 \text{ nF}$  e  $C_2 =$  cerca de 10 a 20% superior ao valor de  $C_1$ .

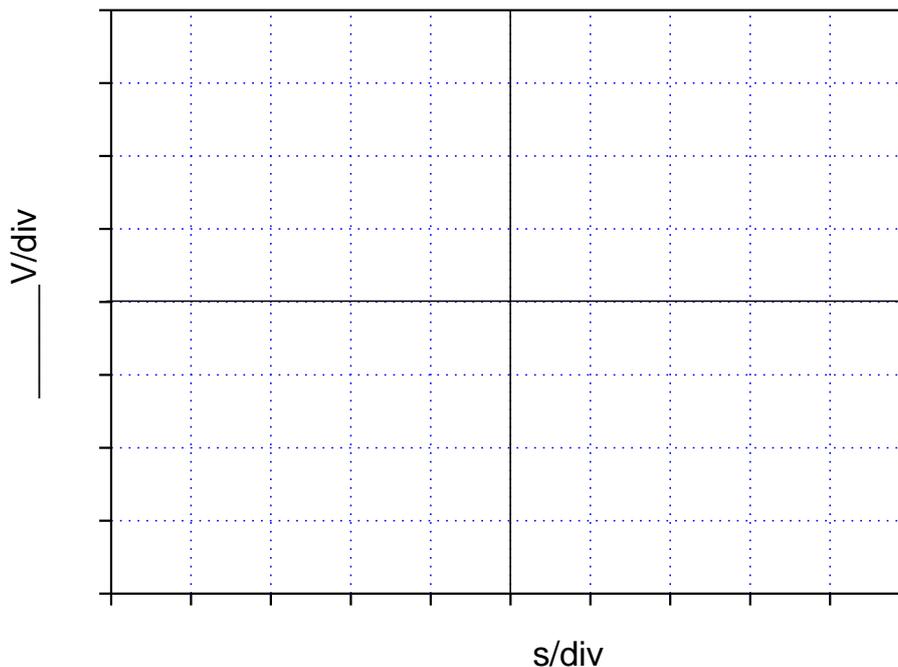
**dica:** você pode fazer associações de capacitores em paralelo ou em série para alcançar o valor de  $C_2$  desejado.



**Figura 03** – Circuitos RLC paralelo com mesma fonte de alimentação

Os circuitos devem ser alimentados com o mesmo gerador e ao mesmo tempo, para que seja possível visualizar suas respostas transitórias ao mesmo tempo no osciloscópio. Utilize um sinal com 20 Vpp e baixa frequência, exemplo 100 Hz, para melhor visualização dos sinais num transitório. Utilize também trigger externo. Note que ambos os circuitos apresentam oscilação amortecida como resposta transitória.

Apresente as duas curvas,  $v_{LC1}(t)$  e  $v_{LC2}(t)$  no gráfico a seguir.



**3.2** Determine graficamente a frequência de oscilação amortecida de cada circuito.

**3.3** A seguir some os sinais de saída de cada circuito. Ajuste a taxa de varredura do osciloscópio para visualizar apenas as amplitudes de oscilação de um transitório, a fim de melhorar a resolução das medições.

Imprima o gráfico do sinal de batimento observado no intervalo.

**3.5** Determine experimentalmente:

**a)** O período e a frequência do sinal resultante da soma das duas ondas. Compare o resultado com o valor esperado teoricamente. Apresente o erro relativo.

**b)** O período e a frequência do sinal da onda moduladora. Descreva como determinou esses valores. Compare com o valor esperado teoricamente. Apresente o erro relativo.

**c)** O período e a frequência do batimento. Compare com o valor esperado teoricamente. Apresente o erro relativo. Indique os períodos medidos na curva esboçada do batimento.