



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

PSI 3031 - LABORATÓRIO DE CIRCUITOS ELÉTRICOS

1º quadrimestre de 2020

## EXPERIÊNCIA 7

### Redes de Primeira ordem – Circuitos RC

### GUIA e ROTEIRO EXPERIMENTAL

WJSalcedo / R. Onmori  
Revisão: EG. / HEMP/LY/MNPC

| No. USP | Nome | Nota | Bancada |
|---------|------|------|---------|
|         |      |      |         |
|         |      |      |         |
|         |      |      |         |

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

#### LISTA DE EQUIPAMENTOS E MATERIAIS

- Osciloscópio
- Gerador de funções
- Multímetro Yokogawa TY720
- **Dois** resistores de 1 k $\Omega$ , **dois** resistores de 10 k $\Omega$  e **um** resistor de 56 k $\Omega$
- **Um** capacitor de 100 nF e **um** capacitor de 220 nF
- **Um** amplificador operacional LM-741
- Fonte simétrica CC de  $\pm 15V$

# PARTE I - MEDIDA DE CONSTANTE DE TEMPO ( $\tau$ ) E TEMPO DE SUBIDA ( $t_r$ ) DE CIRCUITOS RC

*Objetivos: avaliar a resposta transitória de circuitos RC. Determinar a constante de tempo e o tempo de subida dos circuitos RC.*

1) **Medida dos componentes:** meça o valor dos dois resistores ( $R_1 = R_2 = 1 \text{ k}\Omega$ ) e dos dois capacitores ( $C_1 = 100 \text{ nF}$  e  $C_2 = 220 \text{ nF}$ ) com o multímetro portátil. Anote os resultados na Tabela 1.

TABELA 1 - Valores dos Componentes

| COMPONENTE | VALOR NOMINAL | VALOR MEDIDO |
|------------|---------------|--------------|
| $R_1$      | 1 k $\Omega$  |              |
| $R_2$      | 1 k $\Omega$  |              |
| $C_1$      | 100 nF        |              |
| $C_2$      | 220 nF        |              |

2) **Medida da constante de tempo ( $\tau$ ) num circuito RC:**

2.1 Monte o circuito da **Figura 1** com o capacitor  $C_1$  e resistor  $R_1$ . Programe o gerador de funções para fornecer uma **onda quadrada** com  $V_g = 5 \text{ V}_{pp}$ , offset nulo e frequência de **400 Hz**. Veja as formas de onda  $v_c(t)$  e  $v_R(t)$  através do osciloscópio.

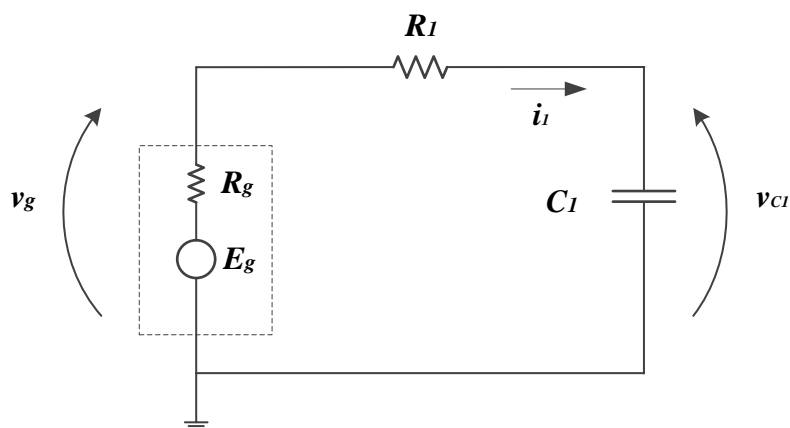
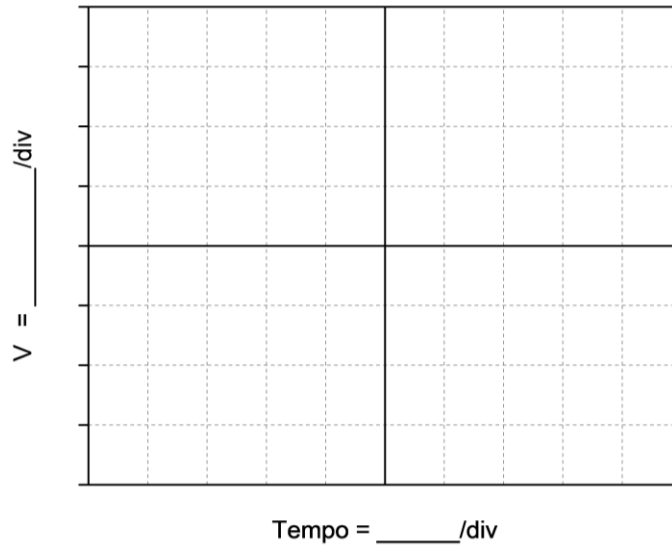


Figura 1- Circuito RC.

Ajuste o osciloscópio para que sejam observados dois a três períodos dos dois sinais. Esboce as curvas obtidas no gráfico a seguir.

Obs: no seu gráfico deixe claro qual forma de onda é correspondente a  $v_{C1}(t)$  e qual é correspondente a  $v_{R1}(t)$ .



**2.2** Analise e discuta as formas de onda de  $v_{C1}(t)$  e  $v_{R1}(t)$  obtidas, principalmente seu comportamento nos transitórios:

**2.3** Com base no método descrito no item 2.3 da apostila “Introdução Teórica (Figura 6)”, meça a constante de tempo do circuito a partir da tensão  $v_C(t)$ ,  $\tau$ , utilizando-se os cursores do osciloscópio. Esboce o intervalo escolhido da onda para tal medição, indicando os valores envolvidos nesta medição.

Indique o valor do  $\tau$  medido e também o período  $T$  da onda quadrada na Tabela 2, a seguir.

**2.4** Calcule a constante de tempo teórica do circuito da Figura 1 ( $\tau$  calculado). Lembre-se que a resistência total do circuito analisado é  $R_T = R_g + R$  (indique o resultado obtido na Tabela 2) <sup>1</sup>.

Cálculo:

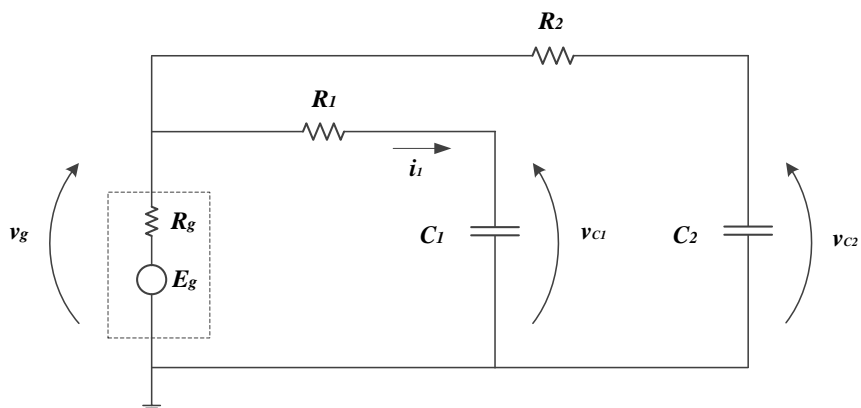
**Tabela 2** – Dados experimental e teórico sobre o circuito RC.

| Período do sinal (T) | $\tau$ (medido) | $\tau$ (calculado) | Erro relativo (%) |
|----------------------|-----------------|--------------------|-------------------|
|                      |                 |                    |                   |

**2.5** Considerando que são necessárias 5 constantes de tempo para a tensão no capacitor atingir 99% do seu patamar, verifique se esta condição foi alcançada com a escolha do período adotado de  $v_g(t)$ .

### 3) Medida do tempo de subida e da frequência de corte de circuitos RC

Nesta parte da experiência analisaremos a relação entre o tempo de subida ( $t_r$ ) e a frequência de corte ( $f_c$ ) nos circuitos RC. Para este fim, adicione uma nova malha ao circuito, com  $R_2 = 1 \text{ k}\Omega$  e  $C_2 = 220 \text{ nF}$ , conforme ilustração da Figura 2. Mantenha o mesmo sinal do gerador do item 2.1.



**Figura 2** – Circuito com 2 resistores ( $R_1 = R_2$ ) e 2 capacitores ( $C_1 \neq C_2$ ).

<sup>1</sup> Lembre-se que a resistência interna do gerador é  $50 \Omega$  (independentemente se este equipamento está operando em High Z ou 50 ohms (vide Exp.3 para mais detalhes)).

**3.1** Com base na definição sobre tempo de subida ( $t_r$ ) descrita no item 2.3 da “Introdução Teórica”, meça  $t_r$  experimental ( $t_{r\_exp}$ ) das duas malhas. Para isso, utilize o recurso disponível de medidas automáticas (**MEAS**) do osciloscópio. Anote o resultado obtido para cada malha na Tabela 3.

**Tabela 3** – Resultados experimentais e teóricos.

| Malha<br>com C: | Valores Experimentais      |                         |                         |                            |   | Valores teóricos               |                               |
|-----------------|----------------------------|-------------------------|-------------------------|----------------------------|---|--------------------------------|-------------------------------|
|                 | (item 3.1)<br>$t_{r\_exp}$ | (item 3.2)<br>$V_{PP0}$ | (item 3.2)<br>$V_{PPC}$ | (item 3.2)<br>$f_{c\_exp}$ | (item 3.4)<br>$f_{c\_exp} \cdot t_{r\_exp}$ | (item 3.3)<br>$f_{c\_teorica}$ | (item 3.4)<br>$f_c \cdot t_r$ |
| 100 nF          |                            |                         |                         |                            |   |                                |                               |
| 220 nF          |                            |                         |                         |                            |   |                                |                               |

**3.2** Altere a forma de onda do sinal  $v_g(t)$  para senoidal, e encontre experimentalmente as frequências de corte ( $f_{c\_exp}$ ) de cada malha RC. Anote os valores obtidos na Tabela 3, assim como as tensões  $V_{PP0}$ <sup>2</sup> e  $V_{PPC}$ <sup>3</sup> das duas malhas.

**3.3** Calcule as frequências de corte teóricas ( $f_{c\_teórica}$ ) a partir dos parâmetros do circuito de cada malha, e compare-as com os valores experimentais. Anote os resultados na Tabela 3.

**3.4** Calcule o produto  $f_{c\_exp} \cdot t_{r\_exp}$  e o seu valor teórico (indicado na “Introdução Teórica”) para cada malha. Apresente os resultados na Tabela 3.

<sup>2</sup>  $V_{PP0}$  é a tensão pico a pico máxima do sinal.

<sup>3</sup>  $V_{PPC}$  é a tensão pico a pico na frequência de corte ( $V_{PPC} = V_{PP0} / \sqrt{2}$ )

**3.5** Identifique se  $f_c \cdot t_r$  (experimental) =  $f_c \cdot t_r$  (teórico) nos dois casos e discuta qual é o significado do produto  $f_c \cdot t_r$  ser um valor constante em circuitos RC.

**3.6** Lembrando que o osciloscópio não responde instantaneamente para efetuar uma medição, determine o tempo de subida do osciloscópio ( $t_r$ ). Justifique seu raciocínio. Para responder essa pergunta, note que no painel frontal do osciloscópio há uma indicação de frequência. Este valor corresponde à largura da banda passante do equipamento (ou seja, faixa de operação do equipamento até alcançar a frequência de corte).

## **PARTE II. GERADOR DE ONDA QUADRADA COM CIRCUITO RC E AMPLIFICADOR OPERACIONAL**

---

*Objetivos: vamos entender o funcionamento de um circuito comparador do tipo Schmitt Trigger, para depois construir um gerador de onda quadrada baseado no circuito comparador associado a um circuito de 1ª ordem.*

---

### **1) Circuito Comparador**

Monte o circuito comparador da Figura 3 (*repare que ele é muito parecido com o circuito comparador que foi analisado na experiência 5 - Circuitos com Amplificadores Operacionais*). Alimente o amplificador operacional com a fonte na configuração simétrica  $\pm 15$  V. Escolha  **$R_1 = R_2 = 10 \text{ k}\Omega$** . Configure o gerador de funções para fornecer uma tensão DC como parâmetro (comandos: waveform  $\rightarrow$  DC  $\rightarrow$  offset) na entrada  $V_{in}$ , e obtenha a curva de histerese (ver Figura 10 da apostila – “Introdução Teórica”), variando-se o valor de  $V_{in}$  de -10 a 10 V. Meça  $V_o$  e anote os valores de  $V_H$ ,  $V_L$ ,  $V_{TH}$  e  $V_{TL}$ . Desenhe a curva de histerese obtida no gráfico a seguir.

**Cuidados:** Próximo aos valores esperados de  $V_{TH}$  e  $V_{TL}$  altere o nível DC do gerador ( $V_{in}$ ) em passos de décimos de volts para obter melhor resolução. .

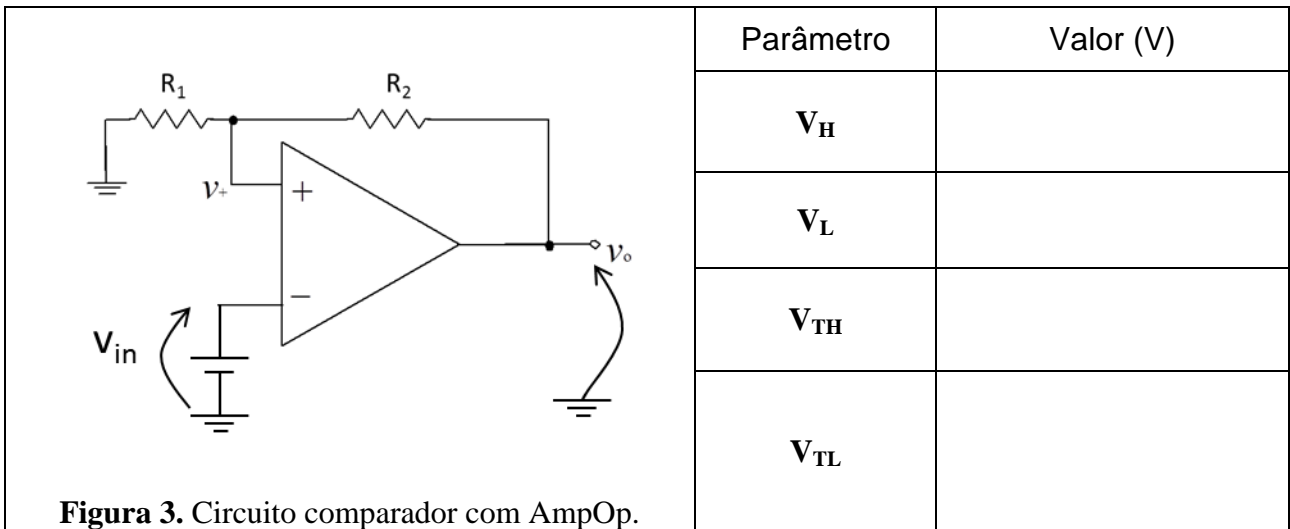
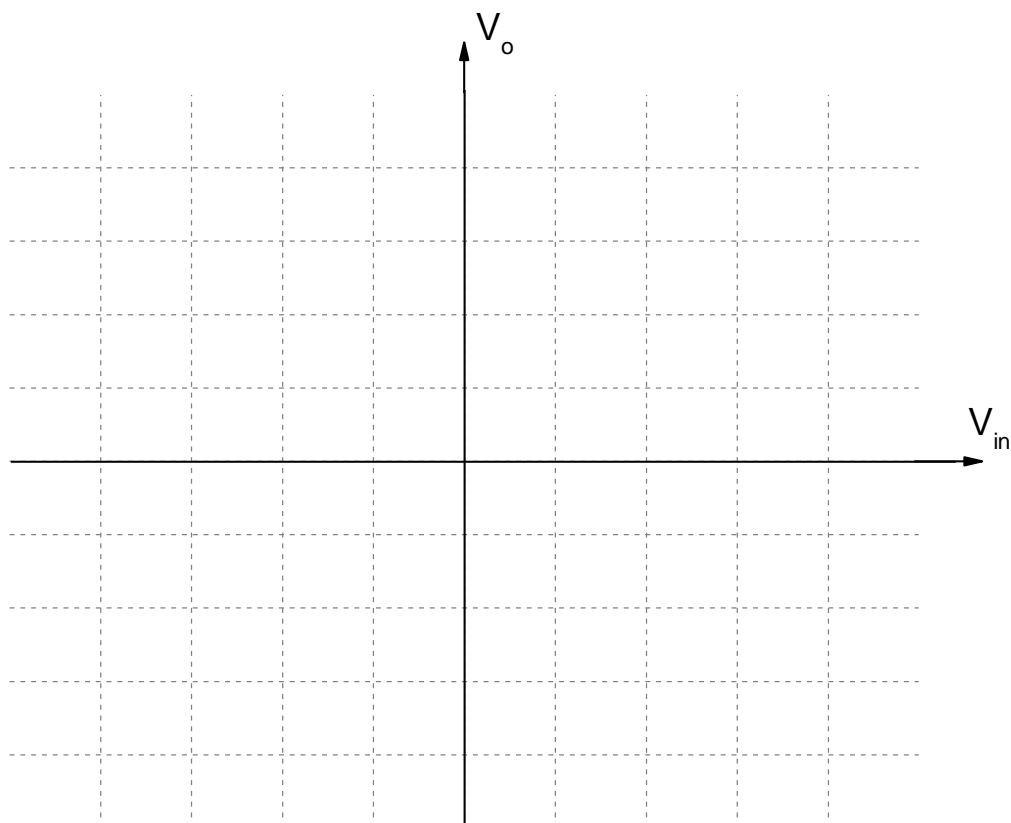
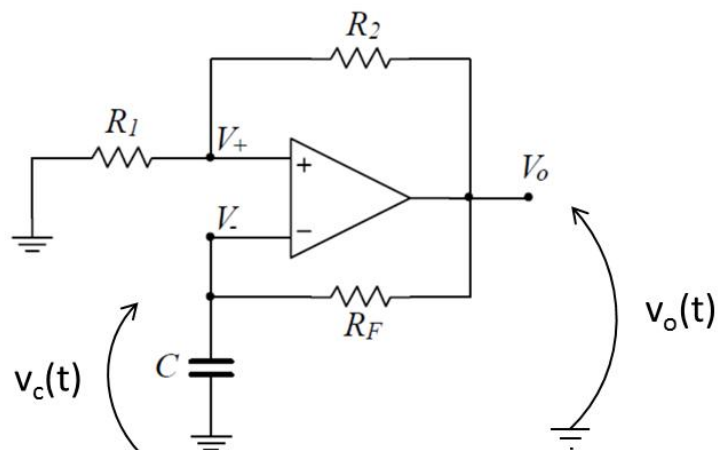


Gráfico de Resposta do circuito comparador com AmpOp (curva de histerese):



## 2) Oscilador de onda quadrada

Acrescente ao circuito da Figura 3 os elementos  $R_F$  e  $C$ , como mostrado no esquema da Figura 4. Nesta parte da experiência será utilizado o capacitor de  $C = 100 \text{ nF}$  e resistência  $R_F = 56 \text{ k}\Omega$ . Após a montagem, meça com o osciloscópio os valores da tensão pico a pico da saída ( $V_{O_{PP}}$ ) e do capacitor ( $V_{C_{PP}}$ ), assim como os valores médios ( $V_{O_{avg}}$  e  $V_{C_{avg}}$ ) das tensões de saída e do capacitor e a frequência do sinal de saída,  $f$ , respectivamente. Complete a Tabela 5 com os resultados obtidos.



**Figura 4.** Gerador de onda quadrada ( $R_1 = R_2 = 10 \text{ k}\Omega$ ).

**Tabela 5** –Dados experimentais do circuito oscilador.

| $R_F$         | $C$    | $V_{C_{PP}}$ | $V_{C_{avg}}$ | $V_{O_{PP}}$ | $V_{O_{avg}}$ | $f$ |
|---------------|--------|--------------|---------------|--------------|---------------|-----|
| 56 k $\Omega$ | 100 nF |              |               |              |               |     |

**2.1** A partir dos valores obtidos de  $V_{O_{PP}}$  e  $V_{O_{avg}}$  (Tabela 5), identifique o tipo de sinal gerado (AC ou não AC(?)) e discuta que componentes do sistema são responsáveis por este comportamento.



**2.2** Imprima os gráficos de tensão do oscilador ( $v_O(t)$ ) e do capacitor ( $v_C(t)$ ) para  $R_F$  e  $C$  utilizados. Siga o modelo sugerido da apostila “Introdução Teórica”, Fig. 12, para manter as duas formas de onda superpostas. Use o programa “**Captura\_Osciloscópio.exe**” instalado na área de trabalho do seu computador. Indique no gráfico impresso a posição das grandezas:  $V_H$ ,  $V_L$ ,  $V_{TH}$  e  $V_{TL}$  do comparador (circuito da Figura 3), assim como  $V_{c_{pp}}$  e o período da onda quadrada.

**2.3** Meça o tempo de subida da onda quadrada ( $t_r$ ), usando o mesmo método aplicado na Parte I do experimento, item 3.1.

$$t_r = \dots\dots\dots$$

**2.4** Compare os valores  $V_{TH}$  e  $V_{TL}$  do comparador (circuito da Fig.3) com os valores  $V_{c_{pp}}$  no oscilador (circuito da Fig.4). Analisando a forma de onda obtida ( $v_O(t)$ ) do circuito (Figura 4), explique o mecanismo de funcionamento do oscilador.

**2.5** Calcule o valor esperado teoricamente da frequência da onda quadrada do oscilador e compare com o valor experimental.

| f (teórico) | f (experimental) |
|-------------|------------------|
|             |                  |

## ITENS ADICIONAIS

**2.7** Em relação aos gráficos  $v_O(t)$  e  $v_C(t)$  experimentais, discuta qual é a relação entre o período do sinal da tensão de saída com os valores da constante de tempo do circuito ( $R_F C$ ) e do tempo de subida ( $t_r$ ) medido no item 2.3. Ou seja, a partir desses parâmetros, pode-se dizer que o circuito está atuando como um bom gerador de onda quadrada? Explique.

**2.7** O tempo de subida  $t_r$  da onda quadrada é dependente de algum parâmetro do circuito ( $R_1$ ,  $R_2$ ,  $R_F$  e  $C$ ) ou depende de alguma característica do AmpOp? Observe que o valor medido de  $t_r$  no item 2.3 é muito menor que o período da onda quadrada obtida. Por exemplo, se a resistência  $R_F$  for trocada por outra de valor muito menor, o que acontecerá com o  $t_r$ ?

**2.8** No circuito da Figura 4 observe que para obter-se uma onda quadrada com frequência de oscilação elevada (por exemplo, 10 kHz), não é suficiente somente reduzir o produto  $R_F C$ . Por quê? Que solução você proporia para se obter uma onda quadrada perfeita nesta frequência?