



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

PSI 3212 - LABORATÓRIO DE CIRCUITOS ELÉTRICOS

1º semestre de 2019

Experiência 9
Redes de Primeira ordem – Circuitos RC
GUIA e ROTEIRO EXPERIMENTAL

Walter Jaimes Salcedo / R. Onmori
Revisão: Elisabete G., Henrique E.M.P. e Leopoldo Y.

No. USP	Nome	Nota	Bancada

Data:	Turmas:	Profs:
--------------	----------------	---------------

LISTA DE EQUIPAMENTOS E MATERIAIS

- Osciloscópio
- Gerador de funções
- Multímetro Tektronix TX3 (C1-06) ou DMM830 (C1-01)
- **Dois** resistores de 1 k Ω , **dois** resistores de 10 k Ω e **um** resistor de 56 k Ω
- **Um** capacitor de 100 nF e **um** capacitor de 220 nF
- **Um** amplificador operacional LM-741
- Fonte simétrica CC de $\pm 15V$

PREPARAÇÃO – SIMULAÇÃO DO CIRCUITO:

Mostre para o seu professor os resultados de sua simulação feita em casa. Peça um visto no espaço abaixo. Anexe os resultados da simulação no relatório.

Visto do professor:	Comentário:
---------------------	-------------

PARTE I - MEDIDA DE CONSTANTE DE TEMPO (τ) E TEMPO DE SUBIDA (t_r) DE CIRCUITOS RC

Objetivos: avaliar a resposta transitória de circuitos RC. Determinar a constante de tempo (τ) e o tempo de subida (t_r) 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 Ω	
R_2	1 k Ω	
C_1	100 nF	
C_2	220 nF	

2) Medida da constante de tempo (τ) 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**. Observe as formas de onda $v_{C1}(t)$ e $v_{R1}(t)$ com o osciloscópio.

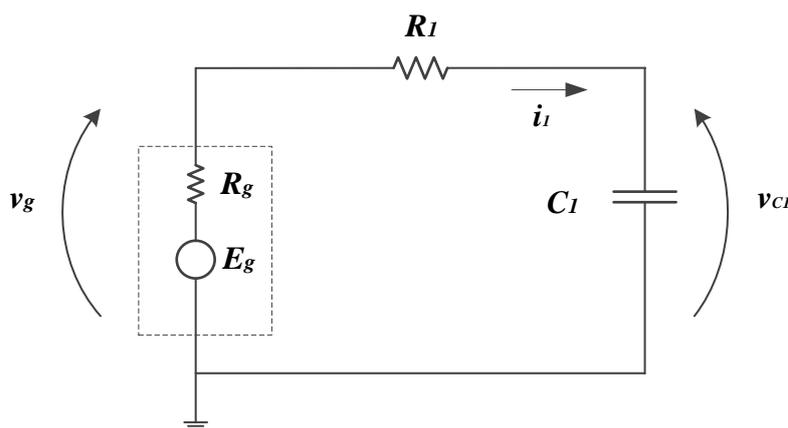
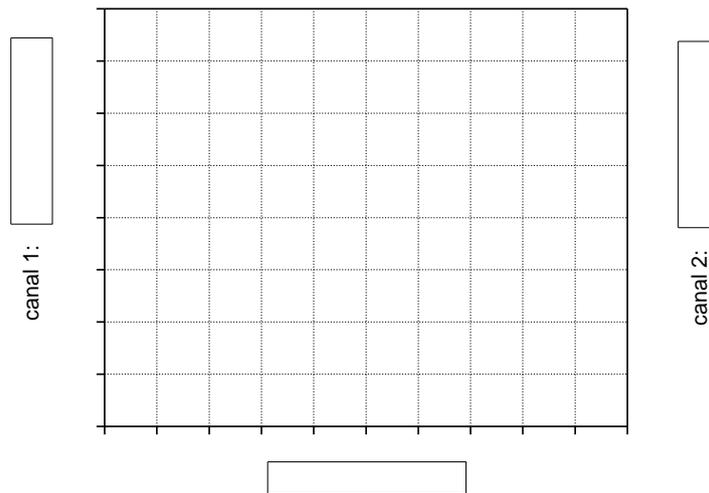


Figura 1- Circuito RC.

Ajuste o osciloscópio para que sejam observados apenas 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 $v_{R1}(t)$. Indique o referencial zero para cada sinal também.



2.2 Analise e discuta as formas de onda de $v_{C1}(t)$ e $v_{R1}(t)$ obtidas, principalmente em relação ao seu comportamento nos transitórios. Explique também porque a tensão no resistor, no início de cada transitório, é praticamente duas vezes a tensão no gerador.

Empty box for student response to question 2.2.

2.3 Com base no método descrito no item 2.3 da apostila “Introdução Teórica (Figura 6)”, determine a constante de tempo τ do circuito a partir da curva $v_{C1}(t)$, utilizando os cursores do osciloscópio. Para isso, destaque (e amplie) apenas um trecho do ciclo de subida desta forma de onda. Esboce-a e identifique o intervalo de tensão e tempo escolhidos entre os cursores, e os valores envolvidos nesta medição. Coloque o valor do τ exp. e do período T da onda quadrada na Tabela 2 (próxima página).

<p>The figure shows a zoomed-in view of an oscilloscope grid. The vertical axis is labeled 'V = ____ /div' and has five major divisions. The horizontal axis is labeled 'Tempo = ____ /div' and has five major divisions. A vertical cursor line is drawn at the second major division from the left, and a horizontal cursor line is drawn at the second major division from the bottom.</p>	<p>Cuidado: note que no exemplo da Figura 6 da Introdução teórica, a tensão de saída do capacitor vai de zero a “E” (tensão máxima). Aqui, o sinal vai de $-V_p/2$ a $V_p/2$.</p>
---	--

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

Cálculo:

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

Período do sinal (T)	τ (medido)	τ (calculado)	Erro relativo (%)

2.5 Considerando que são necessárias 5 constantes de tempo para a tensão no capacitor atingir 99% do seu patamar, comprove 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.

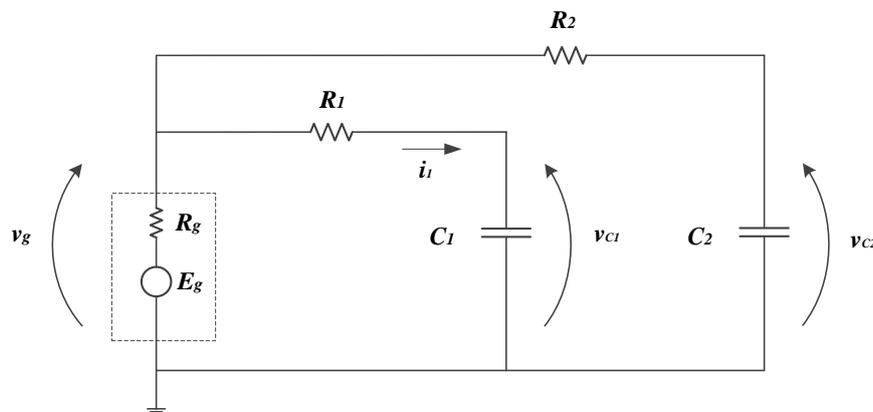


Figura 2 – Circuito com 2 resistores ($R_1 = R_2$) e 2 capacitores ($C_1 \neq C_2$).

¹ Lembre-se que a resistência interna do gerador é 50Ω (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.

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. **Lembre-se que esta análise deve ser efetuada varrendo-se o sinal numa faixa de frequências adequada.** Anote os valores obtidos na Tabela 3, assim como as tensões V_{PP0} ² e V_{PPC} ³ das duas malhas (*obs: leia as informações do rodapé!*).

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, indicando o erro relativo. Anote os resultados na Tabela 3.

Malha 1	Malha 2
----------------	----------------

3.4 Calcule o produto $f_{c_exp} \cdot t_{r_exp}$ e o seu valor teórico (indicado na “Introdução Teórica”) para cada malha, e apresente o erro relativo. Leve os resultados para a Tabela 3.

Malha 1	Malha 2
----------------	----------------

Tabela 3 – Resultados experimentais e teóricos.

Malha com C:	Valores Experimentais					Valores teóricos	
	(item 3.1) t_{r_exp}	(item 3.2) V_{PP0}	(item 3.2) V_{PPC}	(item 3.2) f_{c_exp}	(item 3.4) $f_{c_exp} \cdot t_{r_exp}$	(item 3.3) $f_{c_teórica}$	(item 3.4) $f_{c} \cdot t_r(\text{teórico})$
100 nF							
220 nF							

² V_{PP0} é a tensão pico a pico máxima do sinal.

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

3.5 Como deve ter sido observado na Tabela 3, $f_{c_exp} \cdot t_{r_exp} = f_c \cdot t_r$ (teórico) = cte. Discuta qual é o significado do produto $f_c \cdot t_r$ ser um valor constante em circuitos RC (de uma forma geral).

3.6 Lembrando que o osciloscópio não responde instantaneamente para efetuar medições, determine o tempo de subida do osciloscópio (t_r). Justifique seu raciocínio.

Dica: 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 “Circuitos com Amplificadores Operacionais”*). Alimente o amplificador operacional com a fonte na configuração simétrica ± 15 V. Escolha **$R_1 = R_2 = 10$ k Ω** .

1.a) Configure o gerador de funções para fornecer uma tensão DC (comandos: waveform \rightarrow DC \rightarrow offset) na entrada V_{in} , e obtenha a curva de histerese (ver como exemplo a Figura 10 da apostila – “Introdução Teórica”), variando-se o valor de V_{in} de -10 a 10 V. Meça V_o com o multímetro de

bancada 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.

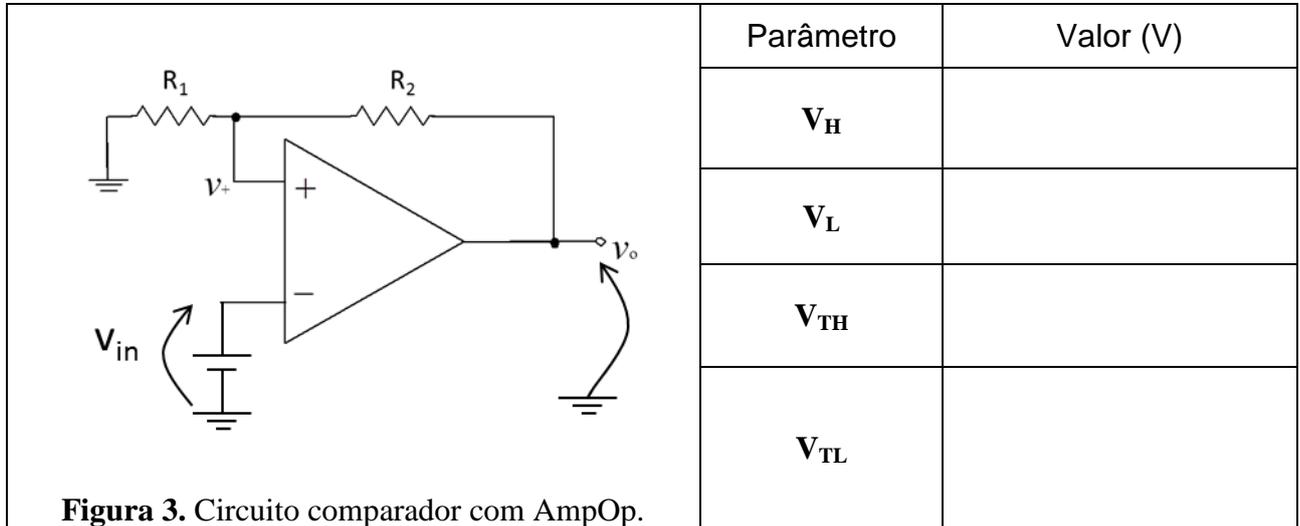
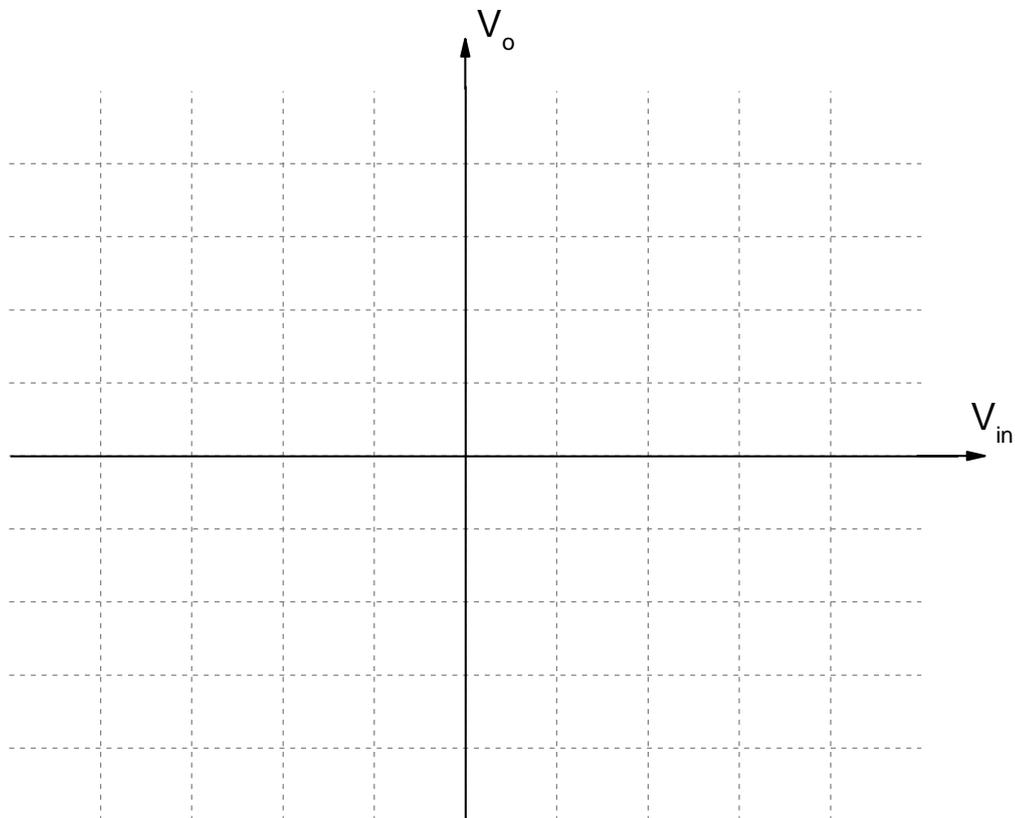


Gráfico de Resposta do circuito comparador com AmpOp (curva de histerese).

Obs: defina e apresente as escalas do seu gráfico.



1.b) Mantendo-se a mesma montagem experimental, altere apenas o sinal de entrada, v_{in} , para sinal senoidal de 200 Hz e 20 Vpp. Visualize 4 períodos dos sinais de entrada (v_{in}) e de saída (v_o) com o osciloscópio. Imprima os gráficos e identifique as tensões V_H e V_L nas curvas traçadas. Compare com os valores encontrados no item 1.a) e faça seus comentários na própria folha de impressão.

1.c) Observe a curva de histerese no osciloscópio. Para isso, acione a tecla [Horiz] no painel do osciloscópio, e selecione a tecla softkey “Modo \rightarrow XY”. **Cuidado: não utilize o trigger externo nesta condição.** Imprima a curva obtida no osciloscópio, e identifique nela as grandezas V_{TH} , V_{TL} , V_H , V_L . Compare com a curva traçada no item 1.a). Faça seus comentários na própria folha de impressão.

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 a 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. **Atenção:** Coloque as pontas de prova em acoplamento CC.

Complete a Tabela 5 com os resultados obtidos.

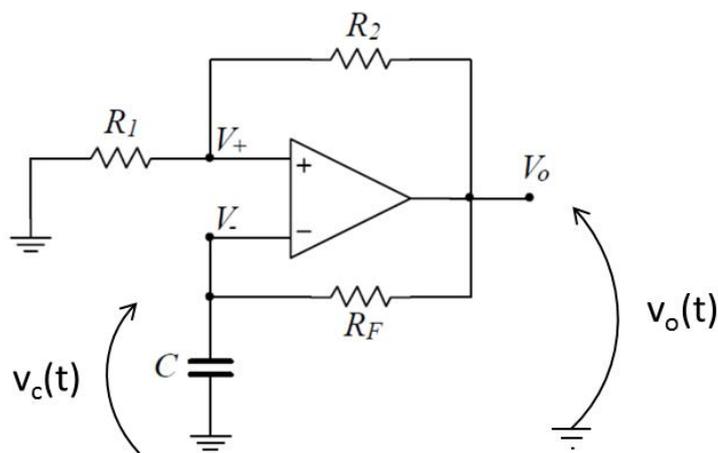


Figura 4. Gerador de onda quadrada ($R_1 = R_2 = 10 \text{ k}\Omega$).

Tabela 5 –Dados experimentais do circuito oscilador.

R_F (valor exp.)	C (valor exp.)	$V_{C_{PP}}$	$V_{C_{avg}}$	$V_{O_{PP}}$	$V_{O_{avg}}$	f

2.1 A partir dos valores obtidos de V_{OPP} e $V_{O_{avg}}$ (Tabela 5), identifique o tipo de sinal gerado (forma de onda, período, ...) e discuta que componentes do circuito são responsáveis pelo comportamento observado em $v_o(t)$.

2.2 Mantendo-se os dois canais do osciloscópio na mesma escala, 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 pasta *Vis_laboratório* (atalho 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. Apresente o erro relativo.

f (teórico)	f (experimental)

2.6 Compare e discuta os valores experimentais de frequência, tempo de subida e valores V_{0pp} e $V_{C_{pp}}$ em relação aos valores obtidos na simulação que efetuaram como tarefa de casa.

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. Analisando-se estes parâmetros, pode-se dizer que o circuito está atuando como um bom gerador de onda quadrada? Explique.

2.8 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 ?

2.9 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?