

## 119148 – Prática de Circuitos Eletrônicos 1

## Experimento 06: Circuitos de Segunda Ordem

## 1. Objetivos

O objetivo desse experimento é oferecer um primeiro contato com circuitos elétricos de segunda ordem através do estudo de seu funcionamento para diferentes condições de polos do sistema.

Circuitos de segunda ordem são aqueles que apresentam exatamente dois elementos armazenadores de energia não-redutíveis. No caso linear, pode-se ter um par de capacitores, um par de indutores, ou ainda um indutor e um capacitor.

O comportamento deste tipo de circuito pode ser analisado a partir de sua função de transferência (no domínio fasorial ou no de Laplace). Mais especificamente, a resposta do sistema a um degrau de entrada dependerá das raízes do denominador da função de transferência, quando expressa como uma razão entre dois polinômios em  $2\pi f j$  ou em  $s$ . Estas raízes do denominador são chamadas polos do circuito.

## 2. Estudo pré-laboratorial

Considere o circuito mostrado na Figura 2.1, em que  $V_i(t)$  e  $V_o(t)$  são a tensão de entrada e a tensão de saída, respectivamente. Note que se trata de um circuito de segunda ordem.

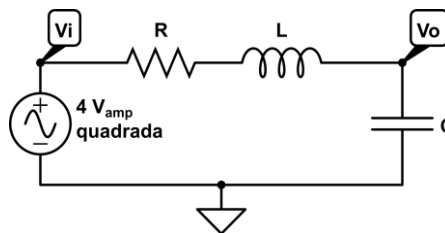


Figura 2.1 – Circuito para avaliação de impedância em regime permanente senoidal.

## 2.1 - Cálculos

- Utilizando o conceito de impedância, determine a **razão** entre a tensão de saída e a tensão de entrada, seja no domínio fasorial ou no domínio de Laplace (de acordo com a sua preferência). Expresse a razão como uma **fração de dois polinômios** (em  $2\pi f j$  se você usou fasores, ou na variável  $s$ , caso tenha usado a transformada de Laplace).
- A partir da resposta ao item anterior, determine os **polos do circuito**, ou seja, as raízes do denominador da função de transferência obtida no item (a). Expresse estes polos em função apenas de  $R$ ,  $L$  e  $C$ .
- Que condição  $R$ ,  $L$  e  $C$  devem satisfazer para que os polos sejam:
  - Reais e distintos? Neste caso, o circuito é dito *sobreamortecido*.
  - Reais e iguais? Neste caso, o circuito é dito *criticamente amortecido*.
  - Complexos conjugados? Neste caso, o circuito é dito *subamortecido*.
- Sem resolver explicitamente o circuito, esboce a forma de onda de saída ao ser aplicado um degrau de entrada, considerando cada um dos três casos possíveis (I – *Sobreamortecido*; II – *Criticamente amortecido*; e III – *Subamortecido*).
- Suponha que  $L = 100\mu\text{H}$  e  $C = 10\text{nF}$ . Qual o **valor de  $R$**  para que o circuito seja criticamente amortecido?
- Calcule a **frequências de ressonância** (ou frequência natural) do circuito, considerando os valores de  $L$  e  $C$  dados em (e). Lembre-se que a frequência natural  $\omega_0$  é dada por  $\omega_0 = 1/\sqrt{LC}$ . Qual o seu valor em **Hz**?
- Para cada um dos três casos encontrados no item (c), calcule o **coeficiente de amortecimento** do circuito,  $\xi$ . Lembre-se que o coeficiente de amortecimento  $\xi$  para um circuito  $RLC$  em série é dado por  $\xi\omega_0 = R/(2L)$ .
- Considerando os valores de  $L$  e  $C$  dados em (e), calcule a **frequência de amortecimento**,  $\omega_d$ , do circuito para o caso subamortecido. Lembre-se que a frequência de amortecimento  $\omega_d$  é dada por  $\omega_d = \sqrt{\omega_0^2 - \alpha^2}$ , onde  $\alpha = \xi\omega_0$  é a *atenuação* ou *frequência neperiana*.

## 2.2 - Simulações

Simule o circuito da Fig. 2.1 adotando  $L = 100\mu\text{H}$  e  $C = 10\text{nF}$ . Configure a tensão de entrada como uma onda quadrada com amplitude de 4 V e frequência  $\omega = \omega_0/10$ . Sendo  $R_{crit}$  o valor do resistor para que o circuito seja criticamente amortecido, obtenha o sinal de saída do circuito fazendo  $R$  igual a diferentes valores percentuais de  $R_{crit}$ : 25%, 50%, 100%, 150% e 300%.

Para o caso em que  $R = 0,25 R_{crit}$ , obtenha a partir do gráfico do sinal de saída, o valor final  $V_f$ , a frequência de amortecimento  $\omega_d$ , a ultrapassagem percentual  $M_p(\%)$ , e o tempo de acomodação em 5%  $t_{s\ 5\%}$ .

### 3. Procedimento Experimental

- a) Monte o circuito da Fig. 2.1. Adote  $L = 100 \mu\text{H}$ ,  $C = 10 \text{ nF}$  e escolha o valor de  $R = R_{crit}$  tal que o circuito seja criticamente amortecido. Se necessário, use elementos em série ou em paralelo para obter valores próximos aos calculados.
- b) Configure a tensão de entrada como uma onda quadrada com amplitude de 4 V e frequência de aproximadamente  $\omega = \omega_0/10$ . Observe no osciloscópio a forma de onda da tensão de entrada (fonte) e de saída (capacitor). Se com os valores especificados no item (a) a resposta não for exatamente compatível com a de um circuito criticamente amortecido, encontre empiricamente um valor de  $R_{crit}$  mais adequado e justifique no relatório a discrepância observada.
- c) Mantendo  $L$  e  $C$  fixos, ajuste o valor da resistência para diferentes percentuais do valor de  $R_{crit}$  selecionado no item (b): 25% (Caso II), 50% (Caso III), 150% (Caso IV) e 300% (Caso V).  
Para cada caso, observe no osciloscópio a forma de onda da tensão de entrada (fonte) e a de saída (capacitor). De acordo com sua resposta ao item (c) do pré-relatório, qual o tipo de circuito em cada caso (sobre-amortecido, criticamente amortecido ou subamortecido)? Compare a forma de onda de saída com seu esboço no item (d) do pré-relatório.
- d) Para o Caso II, observe a saída do circuito e obtenha experimentalmente o valor final  $V_f$ , a frequência de amortecimento  $\omega_d$ , a ultrapassagem percentual  $M_p(\%)$  e o tempo de acomodação em 5%  $t_s$ .

### 4. Relatório

#### 4.1 – Análises e simulações das montagens com os valores efetivamente usados durante o experimento

- a) Em seu relatório, explícite os valores precisos dos componentes adotados.
- b) Também inclua uma simulação do circuito da Figura 2.1 substituindo os valores de componentes e da fonte pelos usados efetivamente no experimento prático nas montagens dos Casos I até V.

#### 4.2 – Análise a comparação das formas de onda

Apresente e analise os valores medidos experimentalmente, explicando teoricamente os resultados e comparando com as formas de onda esperadas para os casos sobre-amortecido, criticamente amortecido e subamortecido, bem como discutindo e justificando eventuais discrepâncias.

#### 4.3 – Análise e recomendação do valor de $R$ para atender restrições

Responda ainda à seguinte pergunta: “Caso o projeto do circuito exigisse que não fossem tolerados valores maiores do que  $\pm 4 \text{ V}$  na saída, mas houvesse a necessidade de que a forma de onda de saída fosse a mais parecida possível com a onda de entrada, qual valor de  $R$  você recomendaria que fosse utilizado? Justifique.



## 119148 – Prática de Circuitos Eletrônicos 1 – Folha de Dados

Turma: \_\_\_\_\_

Data: \_\_\_\_/\_\_\_\_/\_\_\_\_

Aluno: \_\_\_\_\_

Matrícula: \_\_\_\_\_

### Experimento 06: Circuitos de Segunda Ordem

Procedimento 3 b):

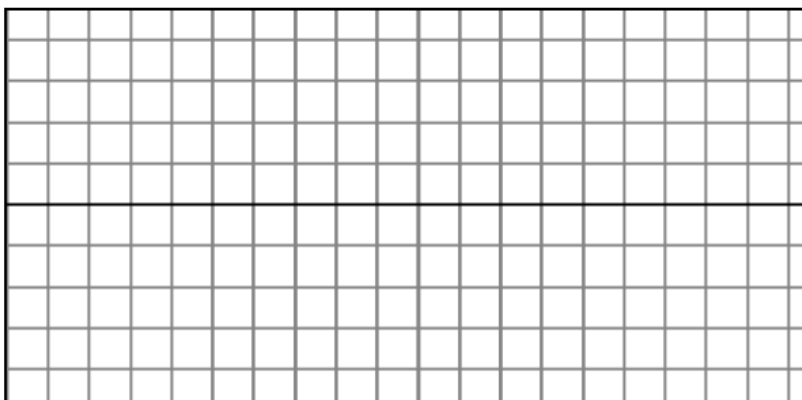
Caso I - Criticamente amortecido

$R_{crit} =$  \_\_\_\_\_  $[\Omega]$

$L =$  \_\_\_\_\_  $[H]$

$C =$  \_\_\_\_\_  $[F]$

Saída no Caso I:

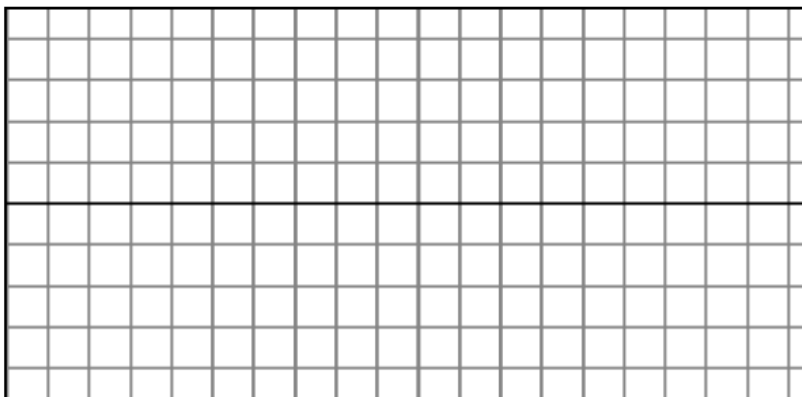


Procedimento 3 c):

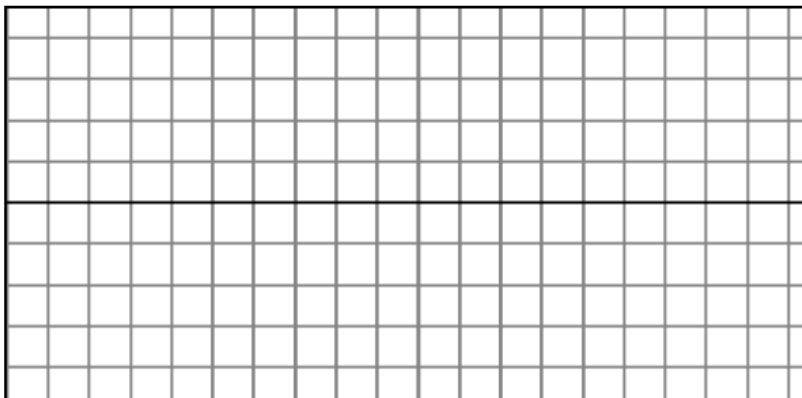
	Caso II*	Caso III	Caso IV	Caso V
Percentual de $R_{crit}$	25% = _____ $[\Omega]$	50% = _____ $[\Omega]$	150% = _____ $[\Omega]$	300% = _____ $[\Omega]$
Tipo de circuito				

\*Responder item 3 d) antes de prosseguir

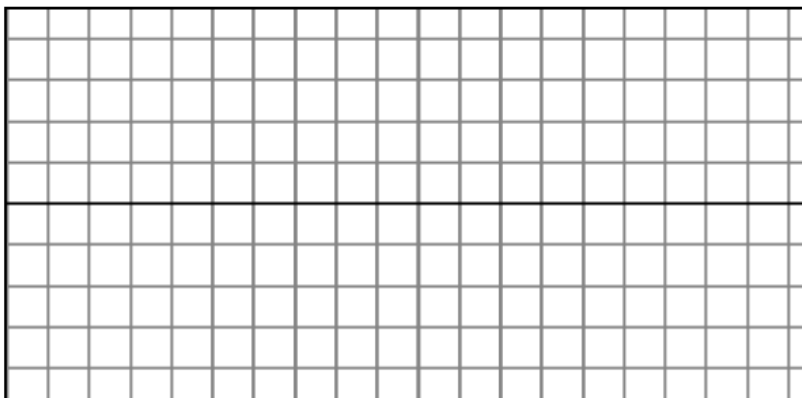
Saída no Caso II:



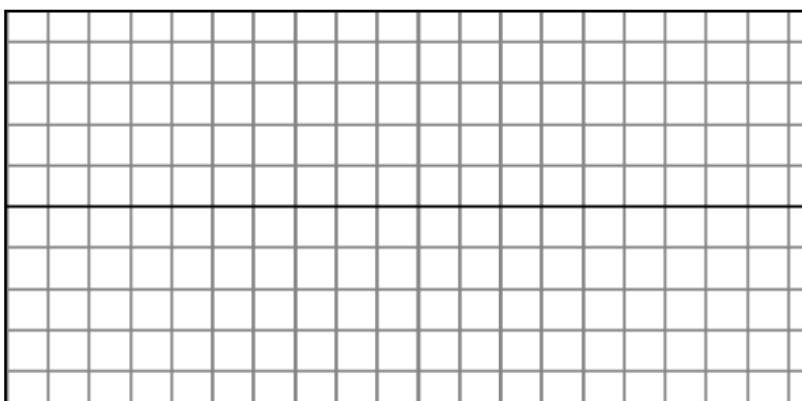
Saída no Caso III:



Saída no Caso IV:



Saída no Caso V:



Procedimento 3 d):

Caso II

$V_f =$  \_\_\_\_\_ [V]     $\omega_d =$  \_\_\_\_\_ [rad/s]     $M_p(\%) =$  \_\_\_\_\_     $t_{s\ 5\%} =$  \_\_\_\_\_ [s]