

Circuitos de Corrente Alternada II

Nesta prática continuaremos o estudo circuitos de corrente alternada, analisando tanto o comportamento transiente como em regime estacionário dos circuitos RC, RL e RLC em série. Uma ênfase especial será dada a análise do fenômeno da ressonância em circuitos RLC.

Sempre que surgir uma dúvida quanto à utilização de um instrumento ou componente, o aluno deverá consultar o professor para esclarecimentos.

I. Circuito RLC série (Análise estacionária)

A figura 1 mostra um circuito RLC série alimentado por uma fonte de tensão alternada cossenoidal que oscila com frequência angular constante ω . A tensão aplicada ao circuito pode ser escrita como:

$$V = V_o \cos(\omega t) \quad (1)$$

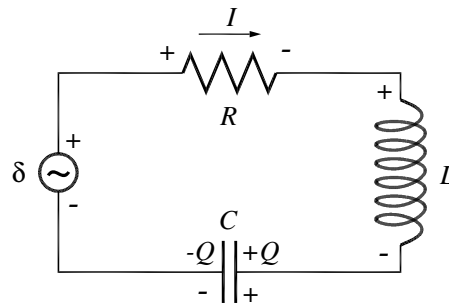


Figura 1 – Esquema elétrico de um circuito RLC série.

Usando a lei de Kirchhoff das malhas, podemos escrever $V = V_R + V_C + V_L$, onde as tensões em cada componente são dadas por:

$$V_R = RI \quad (2a)$$

$$V_C = \frac{Q}{C} = \frac{1}{C} \int Idt \quad (2b)$$

$$V_L = L \frac{dI}{dt} \quad (2c)$$

Substituindo as equações 2 na equação 1, e utilizando a notação complexa, obtemos:

$$L \frac{dI}{dt} + RI + \frac{1}{C} \int Idt = V_0 e^{i\omega t} \quad (3)$$

A corrente no circuito também deve oscilar harmonicamente:

$$I = I_0 e^{i\omega t} \quad (4)$$

Substituindo a equação 4 na equação 3:

$$I_0 \left(R + i\omega L + \frac{1}{i\omega C} \right) = V_0 \quad (5)$$

Isso permite calcular I_0 :

$$I_0 = \frac{V_0}{R + i\omega L + \frac{1}{i\omega C}} \quad (6)$$

Esse é um número complexo, o que indica que há uma diferença de fase entre a corrente e a tensão na fonte. É mais conveniente expressar esse número na forma polar:

$$I_0 = \frac{V_0}{\sqrt{R^2 + \left(\omega L - \frac{1}{\omega C} \right)^2}} e^{-i\varphi} \quad (7)$$

O argumento φ é dado por:

$$\varphi = \arctan\left(\frac{\omega L - 1/\omega C}{R}\right) \quad (8)$$

A impedância e o seu módulo valem, respectivamente:

$$Z = \frac{V_o}{I_o} = R + i\omega L - i\frac{1}{\omega C} \quad (9a)$$

$$|Z| = \sqrt{R^2 + \left(\omega L - \frac{1}{\omega C}\right)^2} \quad (9b)$$

Vemos que a impedância é simplesmente a soma das impedâncias do resistor, do capacitor e do indutor (representadas como números complexos).

A figura 2 mostra a impedância representada no plano complexo. A parte real é a resistência e a parte imaginária é chamada de reatância, sendo dada por:

$$X = X_L - X_C = \omega L - \frac{1}{\omega C} \quad (10)$$

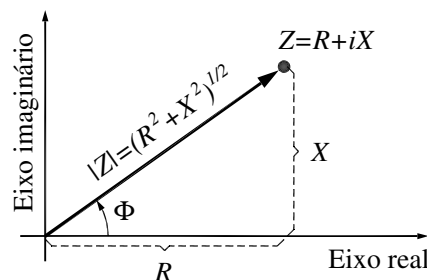


Figura 2 – Diagrama da impedância no plano complexo

Na figura 3 está mostrada a chamada representação por fasores (vetores girantes) da tensão e da corrente em um circuito RLC. A voltagem e a corrente são representadas por vetores que giram com velocidade angular ω mantendo uma diferença de fase φ entre si. Em qualquer instante os valores máximos da tensão ou da corrente podem ser determinados pela projeção do vetor corresponde sobre o eixo real.

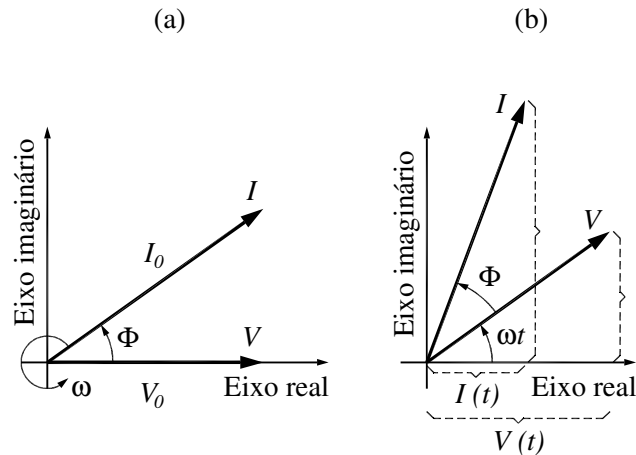


Figura 3 – Diagramas de tensões e correntes no plano complexo, em diferentes instantes.

Como discutido anteriormente a notação complexa é bastante adequada para simplificar os cálculos na análise dos circuitos, mas para obter os valores instantâneos das grandezas é necessário tomar a parte real. Assim a corrente é obtida tomando-se a parte real da equação 4, após substituir a equação 7, o que resulta em:

$$I(t) = \frac{V_0}{\sqrt{R^2 + \left(\omega L - \frac{1}{\omega C}\right)^2}} \cos(\omega t - \varphi) \quad (11)$$

Como a tensão da fonte foi assumida igual a $V = V_0 \cos(\omega t)$, nota-se claramente, a partir da equação 11, que em geral a corrente não está em fase com a tensão na fonte, sendo a diferença de fase entre elas dada por:

$$\varphi = \arctan\left(\frac{\omega L - 1/\omega C}{R}\right) \quad (12)$$

II. Ressonância

Uma característica importante de circuitos RLC é que eles possuem uma frequência natural de oscilação. Para compreender melhor o que isso significa, lembremos de um oscilador mecânico do tipo massa mola. Sabemos dos cursos

anteriores, que quando comprimimos ou estiramos um sistema massa mola à partir do repouso e depois o liberamos este sistema oscila naturalmente com uma frequência

$\omega_0 = \sqrt{\frac{k}{m}}$, onde k é a constante elástica da mola e m a massa. Se não houver atrito, esta

oscilação permanecerá infinitamente à custa da troca de energia entre o elemento restaurador (mola) e o de inércia (massa). Em um circuito elétrico ideal constituído por um indutor L e um capacitor C a situação é análoga. Qualitativamente, isso pode ser entendido considerando um circuito onde um capacitor inicialmente carregado é associado em série com um indutor em $t = 0$ de modo a formar um circuito fechado, figura 8 com $R = 0$. A carga está inicialmente no capacitor, o que quer dizer que a energia está armazenada no campo elétrico do mesmo. À medida que o tempo passa, a carga flui através do indutor (que inicialmente se comporta como um curto-circuito) dando origem a uma corrente elétrica que faz surgir um campo magnético crescente no interior do mesmo. Assim, há uma transferência de energia entre o capacitor e o indutor. No entanto, de acordo com a lei de Faraday-Lenz, surge uma força contra-eletromotriz nos terminais do indutor que tende a se contrapor a variação da corrente, o que faz com que quando o capacitor se descarrega totalmente, a corrente passe a fluir no sentido contrário de modo a carregar o capacitor novamente, ou seja, convertendo a energia magnética armazenada no campo magnético do indutor em energia elétrica armazenada no campo elétrico do capacitor. Se não houver forma de dissipação de energia essa troca de energia entre os dois elementos permanecerá indefinidamente, analogamente a um sistema massa mola. Portanto este sistema é um oscilador elétrico e, como será mostrado adiante, possui uma frequência natural de oscilação que é dada por $\omega_0 = 1/\sqrt{LC}$.

Note que se $\omega L = 1/(\omega C)$ na equação 12, ou seja, $\omega = 1/\sqrt{LC}$, a corrente e a tensão na fonte estão em fase. Em outras palavras, quando o circuito é forçado a oscilar com a sua frequência natural a resposta (corrente) ocorre em fase com a excitação (tensão da fonte) como ocorre em qualquer oscilador forçado. Se a frequência for maior que a frequência natural, a corrente estará atrasada em relação a tensão, como acontece com indutores; por isso, diz-se que nessa situação o circuito tem comportamento indutivo. Se a frequência for menor, a corrente estará adiantada, como ocorre nos capacitores; o circuito nesse caso tem comportamento capacitivo. O comportamento

capacitivo ou indutivo está relacionado ao sinal da reatância e varia de acordo com a frequência. Na condição $\omega L = 1/(\omega C)$, diz que o sistema está em ressonância, e nessa situação o circuito tem propriedades únicas e por isso merece um estudo especial.

Os fenômenos de ressonância têm grande aplicação prática. Um exemplo são os circuitos sintonizadores de rádios, nos quais a antena capta os sinais alternados de várias rádios, em frequências diferentes. Um circuito ressonante seleciona apenas a faixa de frequências correspondente à emissora desejada. Logo, um bom rádio deve possuir um circuito ressonante altamente seletivo em termos de frequência (diz que ele deve ter alto fator de mérito ou alto fator de qualidade), para que o ruído ou as estações que emitem em frequências próximas não seja também amplificado e resulte em má qualidade do som.

Para entender a ressonância, vamos analisar a equação 11. Seu denominador é a raiz da soma de termos, um dos quais é constante e o outro depende da frequência. Há uma frequência para a qual esse termo se cancela:

$$\omega_0 L - \frac{1}{\omega_0 C} = 0 \Rightarrow \omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}} \quad (13)$$

Como visto esta frequência é a chamada de frequência natural de oscilação do circuito RLC. Quando a frequência da excitação é igual à frequência natural, o denominador é mínimo e a corrente é máxima. Esse é o fenômeno conhecido como ressonância. Diz-se que um circuito RLC está em ressonância quando a frequência da fonte externa é igual à frequência natural de oscilação.

A figura 4 mostra três gráficos obtidos segundo a equação 11 para três valores de R , usando $L = 0,1$ mH, $C = 10$ nF (o que dá $\omega_0 = 10^6$ s⁻¹) e $V_0 = 100$ V.

Na figura pode-se ver que há um pico em torno da frequência natural, o que quer dizer que a resposta do circuito é maior se a excitação for feita próxima dessa frequência. Quanto menor a resistência, mais alto e estreito esse pico é.

A potência dissipada em um circuito RLC pode ser escrita como:

$$P = VI = V_0 I_0 \cos(\omega t - \varphi) \cos(\omega t) \quad (14)$$

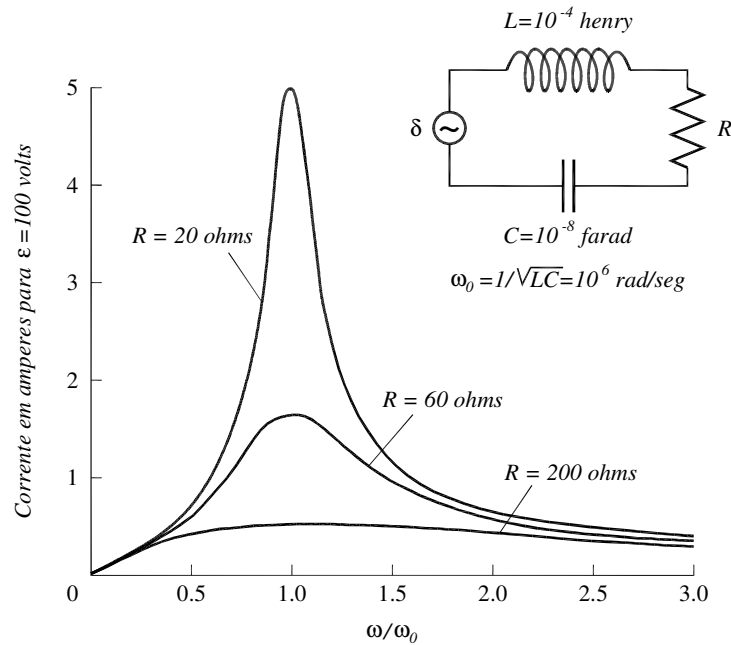


Figura 4 - Uma tensão elétrica com $V_0 = 100$ volts e frequência variável aplicada em um circuito RLC série.

A potência média dissipada é dada por:

$$P_{med} = \frac{1}{T} \int_0^T V_0 I_0 \cos(\omega t - \varphi) \cos(\omega t) dt = \frac{1}{2} V_0 I_0 \cos \varphi \quad (15)$$

A potência média depende da diferença de fase entre a corrente e a tensão. O fator $\cos \varphi$ é usualmente chamado *fator de potência*. A potência média é máxima na ressonância ($\omega = \omega_0$), onde o fator de potência vale 1. Em termos de V_0 , R , L e C , a potência média dissipada é:

$$P_{med} = \frac{1}{2} \frac{V_0^2 R}{R^2 + \left(\omega L - \frac{1}{\omega C} \right)^2} \quad (16)$$

Substituindo $\omega = \omega_0$ nas equações 9, 10, 11, 12 e 16, podemos perceber algumas características de um circuito RLC em ressonância:

- A impedância é mínima, e vale $Z(\omega_0) = R$.
- A reatância é nula: $X(\omega_0) = 0$. Isto é, a associação em série de L e C é equivalente a um curto-circuito.
- A corrente do circuito é máxima e sua amplitude vale $I(\omega_0) = V_0 / R$.
- A corrente está em fase com a tensão da fonte ($\varphi(\omega_0) = 0$)
- A potência média dissipada no circuito é máxima, e vale $P(\omega_0) = V_0^2 / 2R$.

A largura de banda da ressonância é definida como o intervalo de frequência dentro do qual a potência $P(\omega)$ é maior ou igual a metade do valor máximo. Em outras palavras, é igual a largura a meia altura da curva de $P(\omega)$ como função de ω . Em radianos / s esta largura é igual a:

$$\Delta\omega = R/L \quad (17)$$

O fator de mérito (ou fator de qualidade), Q , do circuito ressonante caracteriza o qual estreito é a curva $P(\omega)$ por ω e é definido como:

$$Q = \frac{\omega_0 L}{R} = \frac{\omega_0}{\Delta\omega} \quad (18)$$

O fator de mérito é inversamente proporcional à largura de banda. Circuitos com alto fator de mérito possuem uma banda estreita, o que é altamente desejável. Para conseguir isso, a resistência do circuito deve ser pequena. Na figura 5, as curvas correspondem a $Q = 5$, $Q = 5/3$ e $Q = 1/2$.

As figuras a seguir mostram a corrente (figura 5), a fase entre a corrente e a tensão (figura 6) e a potência dissipada (figura 7) em um circuito RLC para alguns valores do fator de mérito. Os valores da tensão na fonte, da capacitância e da indutância são idênticos aos usados na figura 4 ($V_0 = 100$ V, $L = 0,1$ mH e $C = 10$ nF).

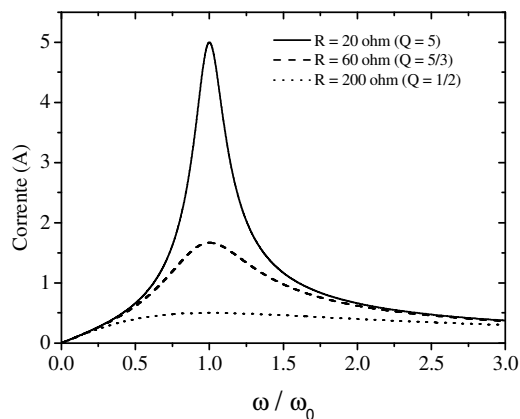


Figura 5 – Corrente em um circuito RLC série

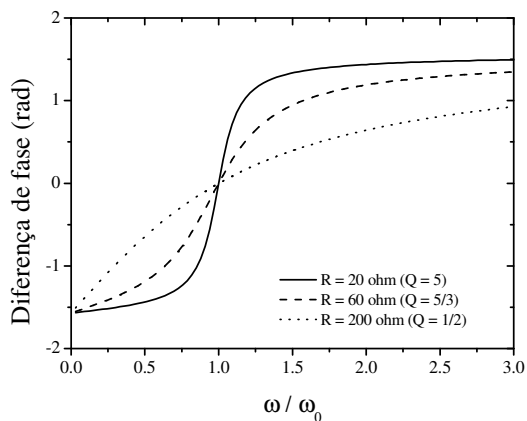


Figura 6 – Diferença de fase entre a tensão na fonte e a corrente em um circuito RLC série

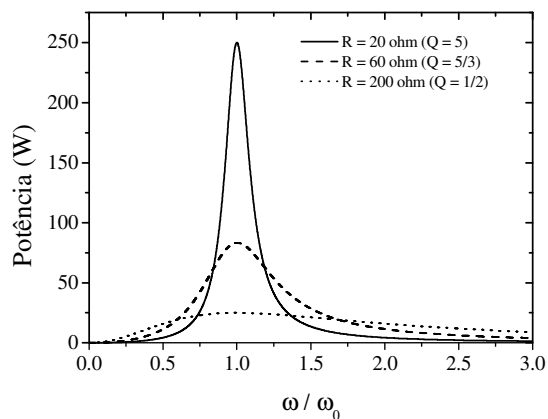


Figura 7 – Potência média dissipada em um circuito RLC série

Um caso limite é quando a resistência vai a zero: a corrente e a potência dissipada tendem a infinito na ressonância. Na prática, isso não ocorre porque os fios e a própria bobina possuem resistência e limitam a corrente do circuito.

III. Análise do comportamento transiente

Até agora analisamos o comportamento dos circuito RLC em regime estacionário. No entanto, como todo oscilador, assim que a excitação é ligada ou desligada, existe uma resposta transiente do circuito e é essa resposta que desejamos analisar nesta sessão.

Na figura 8 mostramos um circuito RLC sem fonte, mas com o capacitor carregado com carga Q_0 . No instante $t = 0$ a chave S é ligada e a energia elétrica armazenada no capacitor começa a ser transferida para o indutor em forma de energia magnética, enquanto parte desta energia é dissipada no resistor R.

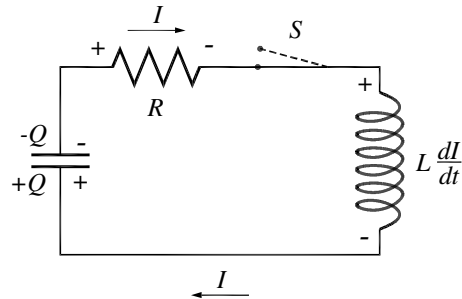


Figura 8 – Diagramas de um circuito RLC com o capacitor carregado

Com a chave S ligada, podemos aplicar a lei das malhas de Kirchoff a esse circuito:

$$L \frac{dI}{dt} + R.I + \frac{Q}{C} = 0 \quad (19)$$

Mas $I = dQ / dt$. Logo:

$$L \frac{d^2Q}{dt^2} + R \frac{dQ}{dt} + \frac{Q}{C} = 0 \quad (20)$$

No circuito RLC, a tendência é que a energia fique oscilando entre o capacitor e o indutor, sendo progressivamente dissipada no resistor. Assim, podemos supor que a carga no capacitor pode ser expressa por uma oscilação amortecida:

$$Q = Ae^{-\gamma t} \cos(\omega_1 t + \alpha) \quad (21)$$

O fator exponencial descreve o amortecimento, e o parâmetro γ é chamado de constante de decaimento. O termo de cosseno é responsável pelas oscilações, que ocorrem em uma frequência ω_1 , não necessariamente igual a ω_0 ; o fator de fase α aparece para permitir o ajuste às condições iniciais.

Para facilitar os cálculos, vamos utilizar a notação complexa:

$$Q = Ae^{pt} \quad (22)$$

Agora substituimos a equação 22 na equação 20:

$$p^2 L + pR + \frac{1}{C} = 0 \quad (23)$$

Temos uma equação algébrica de segundo grau para p, cujas soluções são:

$$p_1 = -\frac{R}{2L} + \sqrt{\left(\frac{R}{2L}\right)^2 - \frac{1}{LC}} \quad (24a)$$

$$p_2 = -\frac{R}{2L} - \sqrt{\left(\frac{R}{2L}\right)^2 - \frac{1}{LC}} \quad (24b)$$

Se o radicando for negativo, podemos escrever:

$$p_1 = -\frac{R}{2L} - i\sqrt{\frac{1}{LC} - \left(\frac{R}{2L}\right)^2} \quad (25a)$$

$$p_2 = -\frac{R}{2L} - i\sqrt{\frac{1}{LC} - \left(\frac{R}{2L}\right)^2} \quad (25b)$$

A solução geral é a combinação linear das duas soluções independentes:

$$Q = Ae^{-\left(\frac{R}{2L}\right)t} \left(Be^{i\sqrt{\frac{1}{LC} - \left(\frac{R}{2L}\right)^2}t} + Ce^{-i\sqrt{\frac{1}{LC} - \left(\frac{R}{2L}\right)^2}t} \right) \quad (26)$$

A parte real da equação 26 é:

$$Q = Ae^{-\left(\frac{R}{2L}\right)t} \cdot \cos\left(\sqrt{\frac{1}{LC} - \left(\frac{R}{2L}\right)^2}t + \alpha\right) \quad (27)$$

Comparando com a equação 21, podemos identificar os parâmetros γ e ω_1 :

$$\gamma = \frac{R}{2L} \quad (28a)$$

$$\omega_1 = \sqrt{\frac{1}{LC} - \left(\frac{R}{2L}\right)^2} = \sqrt{\omega_o^2 - \gamma^2} \quad (28b)$$

A constante de decaimento γ é proporcional a resistência, o que era esperado, porque a resistência é o elemento que dissipa energia. A frequência de oscilação ω_1 é menor do que a frequência natural ω_o .

Para determinar a corrente, é preciso derivar a equação 21:

$$I(t) = \frac{dQ}{dt} = -\omega_o Ae^{-\gamma t} \sin\left(\omega_1 t + \alpha - \arctan\left(\frac{\gamma}{\omega_1}\right)\right) \quad (29)$$

Agora que podemos determinar γ e ω_1 , resta o trabalho de adequar a solução (equações 21 e 29) com as condições iniciais através das variáveis A e α . As condições iniciais são:

$$Q(t=0) = Q_o \quad (30a)$$

$$I(t=0) = 0 \quad (30b)$$

Substituindo nas equações 21 e 29, calculamos A e δ :

$$A = \frac{Q_o}{\cos(\arctan(\gamma/\omega_1))} = Q_o \frac{\omega_o}{\omega_1} \quad (31a)$$

$$\alpha = -\arctan\left(\frac{\gamma}{\omega_1}\right) \quad (31b)$$

Para uma resistência pequena ($R \ll \sqrt{L/C}$), podemos considerar que a carga e a corrente oscilaram com frequência angular muito próxima a frequência natural do circuito (isso equivale a fazer $\omega_1 \approx \omega_o$).

As oscilações amortecidas só ocorrem se sua frequência (ω_1) for real. Da equação 28b, vemos que isso acontece se $\gamma < \omega_o$ (que corresponde a $R < 2\sqrt{L/C}$). Essa situação é chamada de *regime sub-amortecido*, ou *amortecimento sub-crítico*.

O caso em que $\gamma > \omega_o$ (que corresponde a $R > 2\sqrt{L/C}$) é chamado de *regime super-amortecido*, ou de *amortecimento super-crítico*. As soluções para p são reais e diferentes:

$$p_1 = -\gamma + \sqrt{\gamma^2 - \omega_o^2} \quad (32a)$$

$$p_2 = -\gamma - \sqrt{\gamma^2 - \omega_o^2} \quad (32b)$$

Ambos os valores são negativos, portanto a solução geral é uma soma de dois decaimentos exponenciais a taxas diferentes:

$$Q = Ae^{(-\gamma + \sqrt{\gamma^2 - \omega_o^2})t} + Be^{(-\gamma - \sqrt{\gamma^2 - \omega_o^2})t} \quad (33)$$

Finalmente, o caso em que $\gamma = \omega_o$ (que corresponde a $R = 2\sqrt{L/C}$) é chamado de *regime criticamente amortecido*, ou de *amortecimento crítico*. As duas soluções para p são iguais:

$$p_{1,2} = -\gamma \quad (34)$$

Nesse caso, a outra solução independente é:

$$Q = te^{-\gamma t} \quad (35)$$

A solução geral é portanto:

$$Q = (a + bt)e^{-\gamma t} \quad (36)$$

A figura 9 mostra o comportamento típico da corrente como função do tempo é mostrado para os diferentes regimes de amortecimento (sub-crítico, crítico e super-crítico).

No amortecimento sub-crítico, a corrente realiza algumas oscilações antes de alcançar a situação de equilíbrio, enquanto nos amortecimentos crítico e super-crítico há um decaimento exponencial da corrente. A situação em que a corrente decai mais rapidamente é no amortecimento crítico; nesse caso, aumentar o fator de amortecimento *aumenta* o tempo necessário para atingir o equilíbrio.

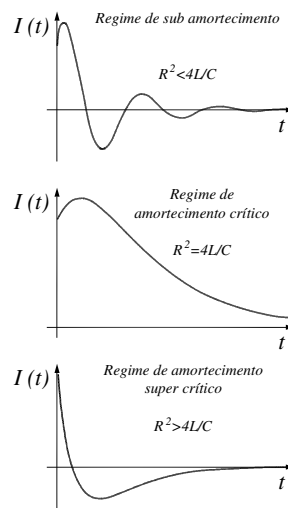


Figura 9 – Comportamento da corrente em um circuito RLC série nos diferentes regimes de amortecimento.

IV. Solução geral do circuito RLC

A solução geral do circuito RLC na presença de uma fonte de tensão alternada é composta por dois termos: o primeiro é a solução estacionária (equação 11), e o segundo termo é a solução transiente (que depende do tipo de amortecimento). O termo

estacionário é uma oscilação de amplitude constante, enquanto o termo transiente é uma oscilação que decai com o tempo. Assim, depois de um certo tempo (que pode ser bastante rápido), o termo transiente se torna desprezível frente ao termo estacionário.

V. Analogia eletro-mecânica

As equações que governam o circuito RLC são completamente análogas às que governam osciladores mecânicos (sistema massa-mola) quando há atrito viscoso (proporcional à velocidade). O sistema massa-mola também apresenta as propriedades de ressonância e os três tipos de comportamento transiente observados no circuito RLC. Assim podemos fazer uma analogia entre circuitos elétricos e sistemas mecânicos:

Parâmetros Mecânicos	Parâmetros Elétricos
Deslocamento, x	Carga, q
Velocidade, $v = \frac{dx}{dt}$	Corrente, $i = \frac{dq}{dt}$
Aceleração, $a = \frac{d^2x}{dt^2}$	Varição da corrente, $\frac{di}{dt} = \frac{d^2q}{dt^2}$
Massa, m	Indutância, L
Constante elástica da mola, k	Inverso da capacitância, $1/C$
Coefficiente de atrito, b	Resistência, R
Força de atrito, $-b \frac{dx}{dt}$	Queda de tensão, $-Ri = -R \frac{dq}{dt}$

Experimentos

Para quantificar o comportamento instantâneo de tensões e correntes que variam no tempo, utilizaremos um osciloscópio. Portanto, preste muita atenção na ligação do osciloscópio para que os cabos “terra” estejam sempre ligados no mesmo ponto do circuito.

1. Circuito RLC – solução estacionária

Nesta parte da prática analisaremos o comportamento dos circuitos RLC em regime estacionário. Verificaremos a validade das leis de Kirchoff em corrente alternada e mediremos as diferença de fase em tensão e corrente de acordo com os elementos do circuito.

a) Monte o circuito RLC mostrado na figura 10 utilizando $L = 44 \text{ mH}$ (bobina disponível na bancada sem o núcleo de ferro), $C = 0.1 \mu\text{F}$ e $R = 1 \text{ k}\Omega$ e aplique uma tensão senoidal de cerca de 10 V e frequência de cerca de 1 kHz .

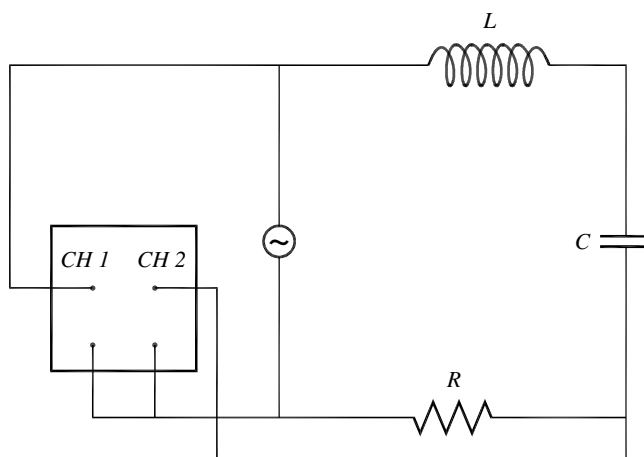


Figura 10 – Circuito RLC

b) Meça a tensão total aplicada e a tensão em todos os elementos do circuito com um osciloscópio e com um multímetro. Meça também a frequência usando o osciloscópio. A configuração sugerida é a seguinte: visualização de ambos os canais (em modo Alt), com canal 2 invertido, escala vertical em 5 V/div e base de tempo em

0,2 ms/div, com acoplamento DC para ambos os canais e trigger no modo Auto. Se o sinal medido em algum canal for pequeno você poderá aumentar sensibilidade da escala vertical. Na figura 10, o canal 1 está medindo a tensão total na fonte, e o canal 2 está medindo a tensão sobre o resistor. Para medir a tensão no capacitor e no indutor, troque-os de posição com o resistor.

c) Utilizando os valores dos componentes calcule o módulo das tensões nos terminais de cada elemento do circuito, e compare com os valores medidos. Discuta a validade da lei de Kirchhoff para as tensões para circuitos de corrente alternada.

d) Utilizando dois canais do osciloscópio meça a diferença de fase entre a tensão nos terminais do resistor, do indutor e do capacitor em relação à tensão total do circuito. Se necessário, diminua a base de tempo para ter maior precisão. Esse resultado é consistente com a equação 15?

e) Faça um diagrama mostrando todas as tensões no plano complexo.

Tensões em um circuito RLC série (solução estacionária)

	Total	Resistor	Capacitor	Indutor
Tensão pico-a-pico (osciloscópio)				
Tensão rms (multímetro)				
Fase				
Tensão esperada				
Fase esperada				

2. Circuito RLC – ressonância

Nesta parte da prática estudaremos o fenômeno da ressonância em circuitos RLC. O objetivo principal é avaliar a resposta do circuito (amplitude e fase da corrente) como função da frequência e da resistência R do circuito.

a) No circuito RLC da figura 10 utilize $L = 44$ mH, $C = 0,22$ μ F e $R = 10$ Ω .

b) Utilizando os dois canais do osciloscópio, meça o valor da tensão no gerador (V_o) e na resistência (V_R), em função da frequência. Faça um gráfico de V_R / V_o em função da frequência. A configuração sugerida para o osciloscópio é; visualização de ambos os canais (em modo Alt e com canal 2 normal), acoplamento DC em ambos os canais, *trigger* em modo *Auto*. **Obs:** Este gráfico deve ser feito durante a aquisição dos dados para que você possa espaçar os pontos adequadamente, concentrando-os na

b) Ajuste o gerador de sinais para obter uma onda quadrada com as características mostradas na figura 11a (o sinal do gerador de sinais será mostrado no canal 1)

c) Como mostrado na figura 10, o canal 2 do osciloscópio mede a tensão nos terminais do resistor (V_R), que é diretamente proporcional ao valor da corrente no circuito. A configuração sugerida para o osciloscópio é: apenas canal 2, 0,2 V/div, acoplamento DC, *trigger* Auto com *Source* no canal 2.

d) Ajuste a escala de tempo do osciloscópio para 0,2 ms/div, de modo a visualizar o sinal transiente parecido com o mostrado na figura 11b.

e) Calcule a partir dessa curva o período e a frequência de oscilação.

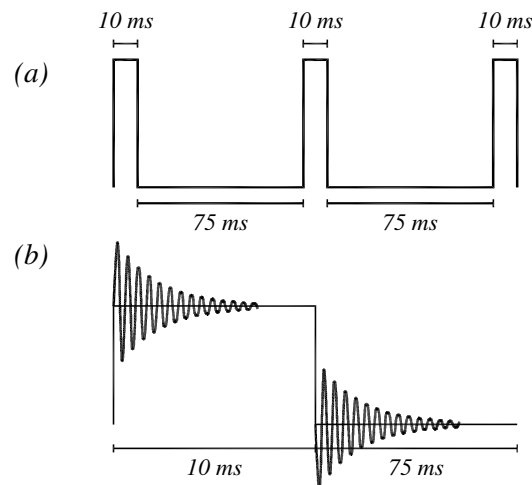


Figura 11 – Formas de onda para a excitação e a resposta transiente do circuito RLC

f) Coloque o canal 2 em GND (terra) e ajuste a posição do sinal para ficar em cima da linha central do osciloscópio.

g) Coloque o canal 2 em acoplamento AC, e meça a amplitude de cada pico e cada vale com relação ao terra. A partir desses dados, calcule a constante de decaimento γ do sinal.

h) Substitua o capacitor por um de maior capacitância e descreva o que acontece com a curva de decaimento.

i) Insira um núcleo de ferro no indutor e descreva o que acontece com a curva à medida que se varia a indutância do circuito.

j) Com o núcleo de ferro totalmente inserido no indutor, meça a frequência de oscilação e a constante de decaimento. Com isso, obtenha a auto-indutância da bobina com o núcleo de ferro.

k) Peça ao seu professor um conjunto de resistores distintos e adicione ao circuito de modo a obter amortecimento crítico e super crítico. Faça um esquema em escala das formas de onda nos diferentes regimes.

Transiente RLC – indutor com núcleo de ar

Pico	Tensão	Pico	Tensão
$T =$		$\omega_o =$	
$\gamma =$			

Transiente RLC – indutor com núcleo de ferro

Pico	Tensão	Pico	Tensão
$T =$		$\omega_o =$	
$\gamma =$		$L =$	