



Experiência 5 - Resposta em Frequênciade Circuitos RC e RLC

PARTE 1 - INTRODUÇÃO TEÓRICA

W. Salcedo e M. Lobo
Revisão: L. Yoshioka
MNPC e I.P./2023

1) Objetivos:

- Estudar a resposta em frequência em redes passivas RC e RLC.
- Identificar indicadores de qualidade da resposta destes circuitos analisando frequência de corte e índice de mérito.

2) Resposta em frequência

Em experiências anteriores (Exp. 3 e Exp. 5) observamos o comportamento de elementos reativos como o capacitor e o indutor operando em regime permanente senoidal. Verificamos que o módulo da impedância do capacitor é inversamente proporcional à frequência, enquanto que o módulo da impedância do indutor aumenta linearmente com a frequência. Nesta experiência estudaremos o comportamento de circuitos RC e RLC em função da variação de frequência do sinal de excitação.

Um circuito RC ou RLC pode ser representado por um quadrupolo (ou quadripolo) que é um dispositivo de duas portas, como mostrado na Fig. 1.

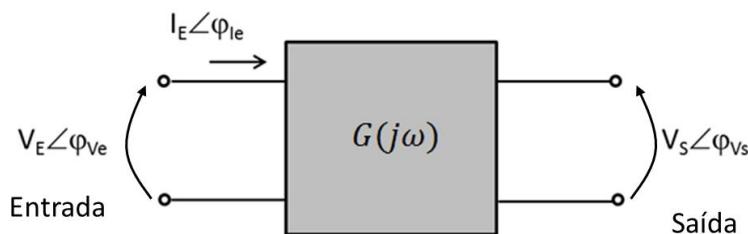


Figura 1 - Quadrupolo

O quadrupolo pode ser definido pela função ganho, $G(j\omega)$, $\omega = 2\pi f$, que relaciona o sinal de entrada com o sinal de saída. O ganho, $G(j\omega)$, é definido para excitação senoidal em regime estacionário sendo que depende dos parâmetros que constituem o quadrupolo (R , L e C) e da frequência angular do sinal de excitação, ω . O $G(j\omega)$ é uma função complexa constituída por um componente real e outro imaginário (na representação cartesiana) ou pelo módulo e fase (na representação polar). Para um quadrupolo como o da Fig. 1, definimos o ganho, $G(j\omega)$, como sendo a razão entre os fasores da tensão de saída, \widehat{V}_s , e da tensão de entrada, \widehat{V}_e , como segue:

$$G(j\omega) = \frac{\widehat{V}_s \angle \varphi_{vs}}{\widehat{V}_e \angle \varphi_{ve}} \quad (1)$$

ou

$$G(j\omega) = \left| \frac{V_s}{V_e} \right| \exp(j\varphi) = |G(j\omega)| \exp(j\varphi), \quad \text{onde} \quad \varphi = \varphi_{Vs} - \varphi_{Ve} \quad (2)$$

φ_{Ve} é a fase do sinal de entrada, \widehat{V}_E , e φ_{Vs} é a fase do sinal de saída, \widehat{V}_s .

Assim, o ganho, $G(j\omega)$, será completamente determinado pelo seu módulo, $|G(j\omega)|$, e sua fase, φ . Chamamos de resposta em frequência o comportamento do módulo e fase do ganho.

2.1 Sistemas não-ressonantes

Nos sistemas não ressonantes, a resposta em frequência é caracterizada pela frequência de corte. Existem dois critérios para a determinação da frequência de corte:

- 1) Frequência onde o módulo da função de transferência é 3 dB (decibéis¹) abaixo do valor de patamar (corresponde a $\frac{1}{\sqrt{2}} \approx 0,71$ vezes o valor do patamar ou valor máximo);
- 2) Frequência onde a fase da função de transferência é - 45 graus.

A Figura 2 mostra um exemplo de curvas de resposta em frequência da função ganho, com comportamento não ressonante. Note que a curva do módulo do ganho, sendo que na faixa de 10 Hz até próximo de 700 Hz o valor do ganho é aproximadamente de 0 dB (corresponde ao Ganho = 1). Observe que na frequência de corte (723 Hz) o valor do ganho é de - 3 dB (corresponde ao ganho = 0,701). A partir da frequência de corte, o ganho se reduz cada vez mais com o aumento da frequência. Note que quando se utiliza representação do ganho em decibéis (dB), valores negativos correspondem às condições em que a amplitude da tensão de saída (V_s) é menor do que a amplitude da tensão de entrada (V_E), ou seja, a razão V_s/V_E é menor do que um.

A Figura 2b mostra a curva da fase do ganho, sendo que a curva começa em 0° decrescendo monotonicamente com o aumento da frequência, até chegar a -90° . Observe que na frequência de corte (723 Hz) o valor da fase do ganho é exatamente -45° .

¹ Ganho em decibéis: $G_{dB} = 20 \log \left(\frac{V_s}{V_E} \right)$

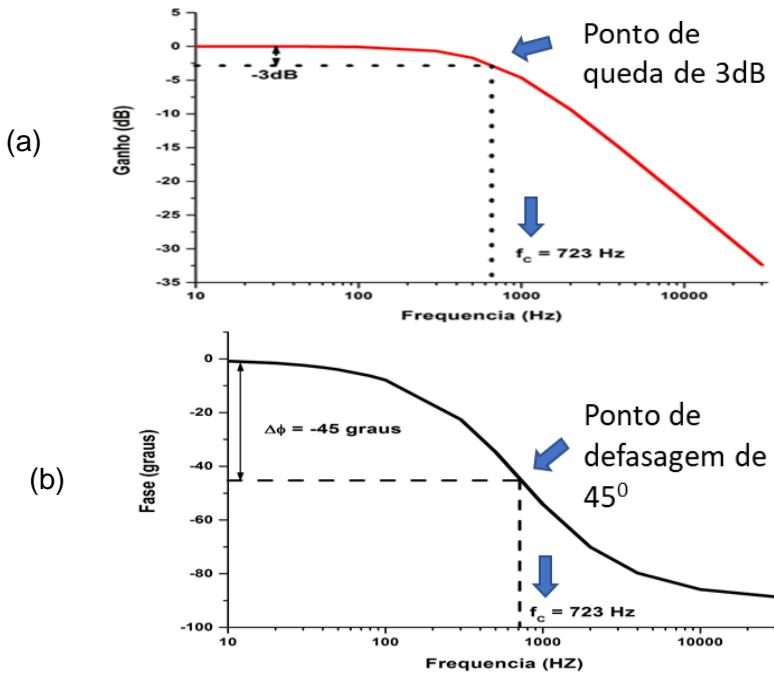


Figura 2 – Resposta em frequência de circuito não ressonante. A frequência de corte, f_c , do sistema é de 732 Hz.

2.2 Sistemas ressonantes

Circuitos elétricos compostos de elementos reativos (L e C) possuem uma tendência para apresentar um comportamento ressonante, ou seja, respondem com maior intensidade (por exemplo, maior ganho) em determinada frequência. Circuitos LC produzem o fenômeno de ressonância quando as suas reatâncias se tornam iguais (em módulo).

Em sistemas ressonantes, a resposta em frequência pode ser caracterizada pelos seguintes parâmetros:

- Frequência de ressonância (f_R)
- Frequência de corte inferior (f_{c1})
- Frequência de corte superior (f_{c2})
- Índice de mérito ou fator de qualidade (Q)

A Figura 3 mostra um exemplo de curva de resposta em frequência da função impedância, com comportamento ressonante.

Pode-se identificar a frequência de ressonância utilizando um dos seguintes critérios:

- 1) ponto onde a função de transferência assume seu **valor máximo** (ou mínimo);
- 2) ponto onde a fase da função de transferência é igual a **zero**. Nesta experiência consideraremos o primeiro critério².

As frequências de corte inferior (f_{c1}) e frequência de corte superior (f_{c2}) seguem o mesmo critério dos sistemas não ressonantes, ou seja, correspondem aos pontos onde o módulo da função de transferência apresenta uma queda de 3 dB (ou $|G(j\omega)|/\sqrt{2}$, ou $Z_{max}/\sqrt{2}$).

² As frequências identificadas pelos dois critérios podem coincidir ou não, dependendo do fator Q relacionado às perdas dos componentes reativos (corrente de fuga pelo dielétrico do capacitor ou resistência de enrolamento do indutor).

O índice de mérito, parâmetro que indica a qualidade do sistema, é definido da seguinte forma:

$$Q = \frac{f_R}{f_{c2} - f_{c1}} \quad (3)$$

Particularmente, nesta experiência analisaremos a resposta em frequência de quadrupolos constituídos por circuitos passivos RC e RLC e, com o auxílio destes resultados, discutiremos a resposta em frequência de um multímetro digital.

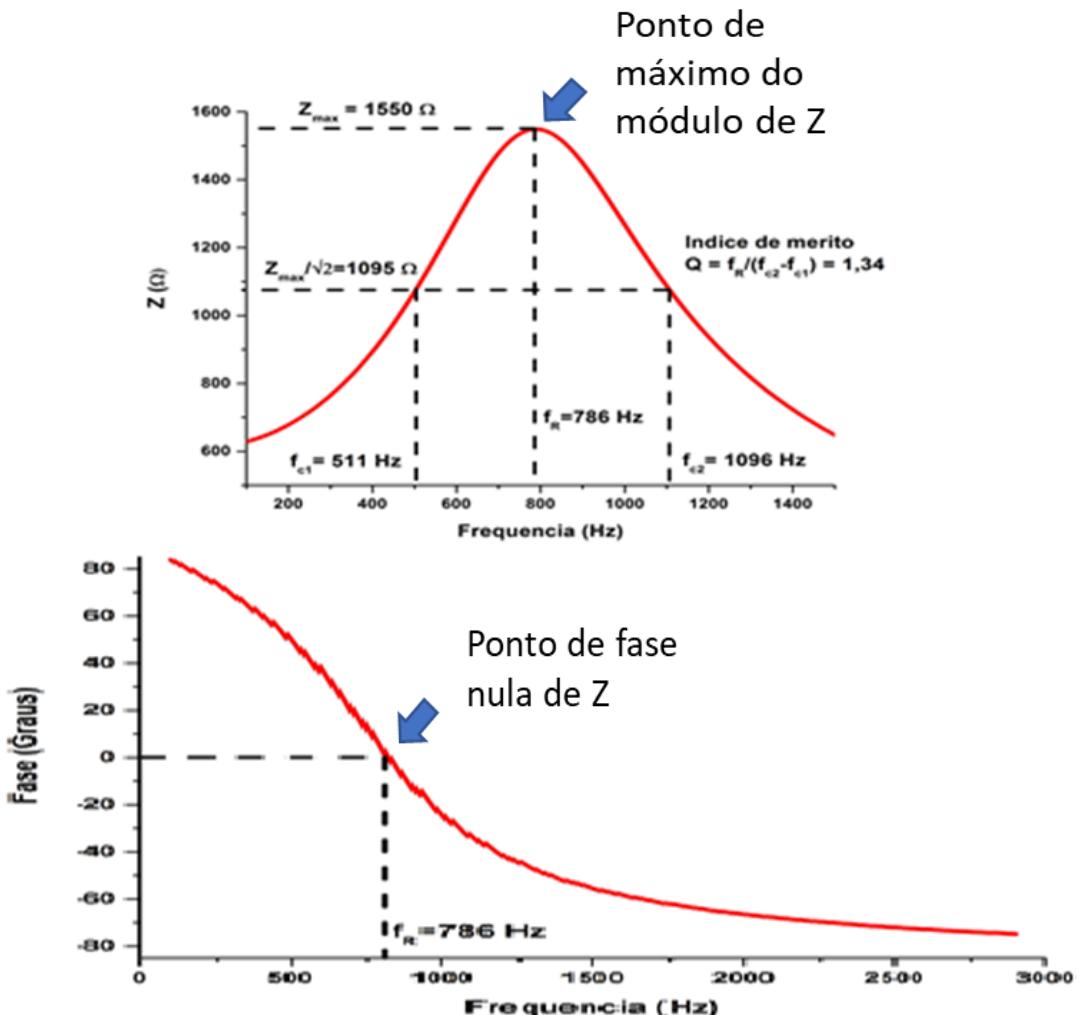


Figura 3 – Resposta em frequência de um circuito ressonante. Frequência de ressonância de 786 Hz.

3. Resposta em Frequência de um Circuito RC

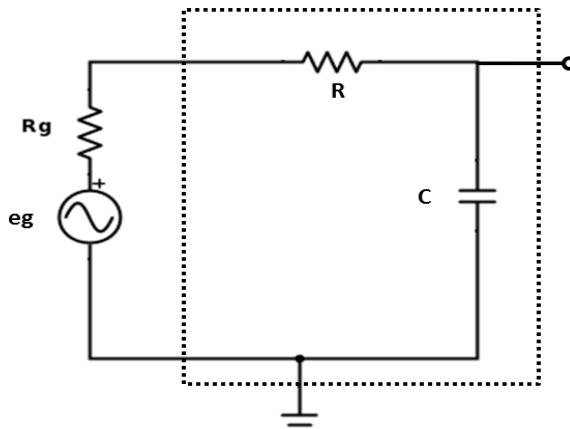


Figura 4 – Circuito RC.

A função de transferência do ganho, $G(j\omega)$, do circuito mostrado na Figura 4 (parte marcada por linhas tracejadas) será dada pelas expressões que seguem:

$$G(j\omega) = \frac{Z_C}{Z_C + R} = \frac{1}{1 + \omega RC j} \quad (4)$$

$$|G(j\omega)| = \frac{1}{\sqrt{1 + (\omega RC)^2}} = \frac{1}{\sqrt{1 + \left(\frac{\omega}{\omega_c}\right)^2}} \quad (5)$$

$$\varphi = -\arctan(\omega RC) \quad (6)$$

Onde $\omega_c = 1/RC$

Obs.: Faça como exercício a verificação dos resultados acima.

4) Resposta em Frequência do Circuito RLC

4.1 Circuito RLC (indutor sem perdas)

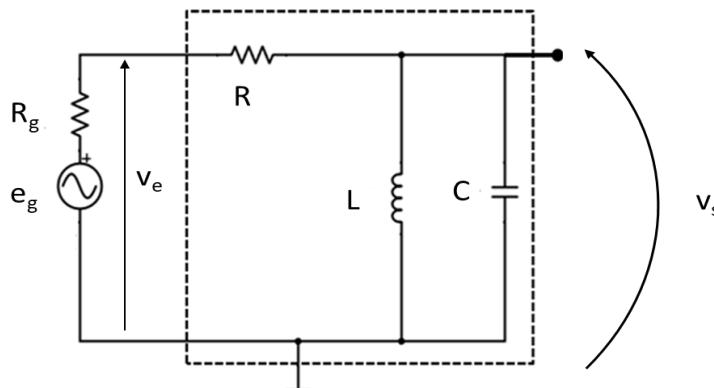


Figura 5 – Circuito RLC sem perdas no indutor

A função de transferência do ganho, $G(j\omega)$, do circuito mostrado na Figura 5 (parte marcada por linhas tracejadas) será dada pelas expressões que seguem ($\omega_0 = 1/\sqrt{LC}$):

$$G(j\omega) = \frac{1}{1 + \frac{R}{\omega L} \left(\left(\frac{\omega}{\omega_0} \right)^2 - 1 \right) j} \quad (7)$$

$$|G(j\omega)| = \left[\frac{1}{1 + \left(\frac{R}{\omega L} \right)^2 \left(1 - \left(\frac{\omega}{\omega_0} \right)^2 \right)^2} \right]^{1/2} \quad (8)$$

$$\varphi = \arctan \left[\frac{R}{\omega L} \left(1 - \frac{\omega^2}{\omega_0^2} \right) \right] \quad (9)$$

Obs.: Faça como exercício a verificação dos resultados acima.

4.2 Circuito RLC (indutor com perdas)

O resistor R_s em série com L_s representa a resistência do enrolamento do indutor L .

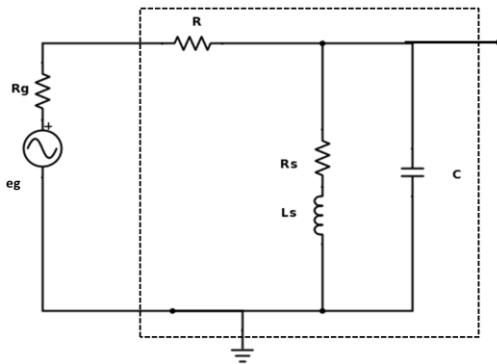


Figura 6 - Circuito RLC com perdas no indutor.

A função de transferência do ganho, $G(j\omega)$, do circuito mostrado na Figura 6 (parte marcada por linhas tracejadas) será dada pelas expressões que seguem:

$$G(j\omega) = \frac{R_s + \omega L j}{R_s + R \left(1 - \frac{\omega^2}{\omega_0^2} \right) + (\omega L + \omega R R_s C) j} \quad (10)$$

$$|G(j\omega)| = \left[\frac{1 + \left(\frac{R_s}{\omega L} \right)^2}{1 + \left(\frac{R_s}{\omega L} \right)^2 \left(1 + \frac{2R}{R_s} + (\omega R C)^2 \right) + \left(\frac{R}{\omega L} \right)^2 \left(1 - \left(\frac{\omega}{\omega_0} \right)^2 \right)^2} \right]^{1/2} \quad (11)$$

$$\varphi = \arctan \left[\frac{R}{\omega L} \left(\frac{1 - \frac{\omega^2}{\omega_0^2} \left(1 + \frac{R_s^2}{\omega^2 L^2} \right)}{1 + \frac{R_s(R_s + R)}{\omega^2 L^2}} \right) \right] \quad (12)$$

Onde: $\omega_0 = 1/\sqrt{LC}$

Obs.: Faça como exercício a verificação dos resultados acima.

PARTE 2 - PREPARAÇÃO PARA A EXPERIÊNCIA

Nesta experiência vocês devem realizar uma preparação antes do dia de aula. A preparação é importante para a execução da Experiência/Aula pois ajudará a economizar tempo e garantir a execução dos itens previstos no Guia Experimental. Para isto, podem utilizar a Planilha Excel disponibilizada como Material Complementar, na aba da Exp-06, no e-Disciplinas. Os resultados desta atividade serão solicitados Guia Experimental para ser anexados o Relatório.

1) Resposta em frequência de circuito RC

Considere o circuito RC mostrado na **Figura 4** e adote $R_g = 0 \Omega$; $R = 1 \text{ k}\Omega$ e $C = 100 \text{ nF}$.

- Utilize a planilha Excel disponibilizada na aba da Exp-06, no e-Disciplinas, para calcular o valor numérico do módulo de ganho, $|G(j\omega)|$, e de fase, φ , com a frequência variando de **10 Hz a 10 kHz**. Escolha as frequências conforme indicado na *Tabela 1 do Guia Experimental*).
- Construa os gráficos, ajustando as escalas para representar as curvas de forma similar às curvas mostradas na Figura 2. Para o gráfico do módulo do ganho deve-se utilizar a escala em dB e a escala de frequência deve ser logarítmica. Veja um exemplo de escala monolog no final deste documento.
- Analise os resultados. Eles serão importantes na realização da experiência. Os gráficos deverão ser anexados ao Relatório da Experiência.
- A partir dos gráficos de ganho e de fase obtenha a frequência de corte.
- Calcule a frequência de corte teórica, utilizando-se a fórmula $f_c = \frac{1}{2\pi RC}$.

2) Resposta em frequência de circuito RLC

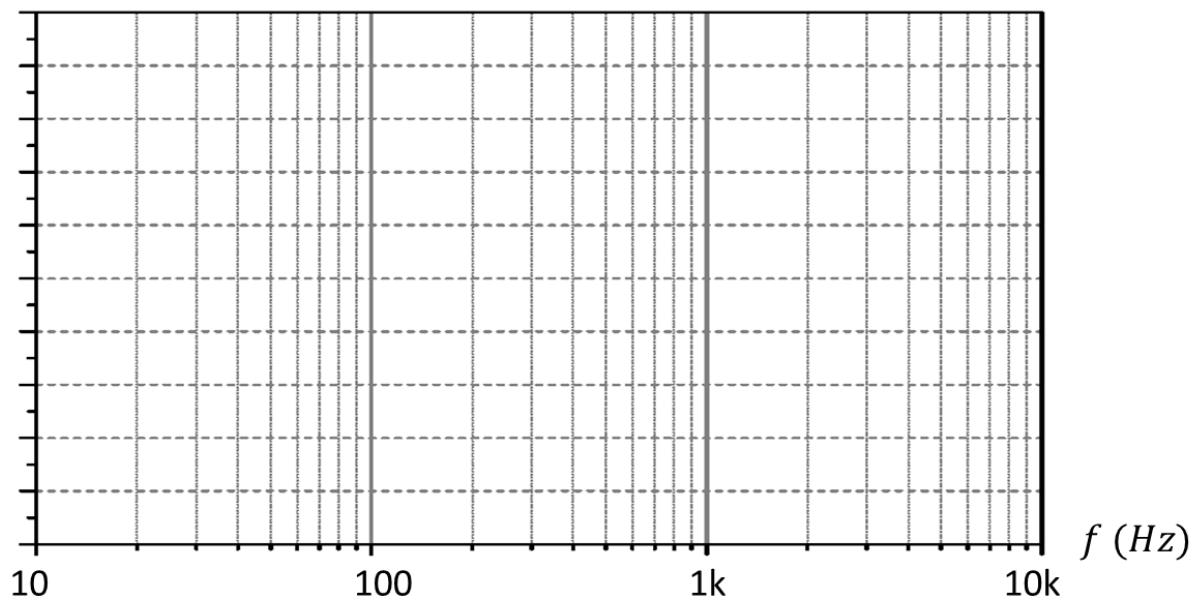
Considere o circuito RLC mostrado na **Figura 6**, e adote $R = 10\text{k}\Omega$, $C = 100 \text{ nF}$, $L_s = 3,0\text{mH}$ e $R_s = 8,0 \Omega$.

- Calcule o valor numérico do módulo de ganho, $|G(j\omega)|$, e da fase, φ , com a frequência variando de **1 kHz a 20 kHz**. Escolha os pontos convenientemente espaçados (ver *Tabela 3 do Template do Relatório*).
- Construa o gráfico, ajustando as escalas para representar a curva de forma similar às curvas mostradas na Figura 3. Para o gráfico do ganho deve-se utilizar a escala em dB e a escala de frequência deve ser logarítmica (gráfico monolog).
- Imprima os gráficos, caso tenha utilizado algum software. Os mesmos deverão ser anexados ao Relatório que será desenvolvido durante a experiência.
- A partir dos gráficos de ganho e de fase obtenha as frequências de ressonância correspondentes.
- Calcule a frequência de ressonância teórica, utilizando a fórmula $\frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}$.
- A partir do gráfico de ganho obtenha as frequências de corte inferior e superior.
- Determine a largura de banda ($\Delta f = f_{c2} - f_{c1}$)
- Calcule o fator de mérito ($Q = \frac{f_R}{\Delta f}$).

Modelos de Tabelas e Gráficos (Monolog)

Tabela – Valores numéricos de módulo e fase do Ganco

$|G(f)|$ dB



$\varphi(f)$ (graus)

