

Física Experimental III

Primeiro semestre de 2018

Aula 5 - Experimento 2

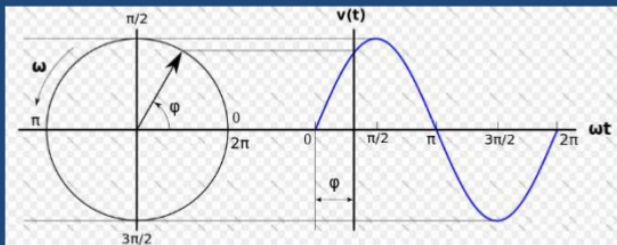
Página da disciplina:

<https://edisciplinas.usp.br/course/view.php?id=66863>

02 de abril de 2019

Experimento 2 - Circuitos de corrente alternada - processamentos de sinais

CONCEITOS BÁSICOS



FASORES

CICLO - PERÍODO - FREQUÊNCIA

$$T = 1/f$$

1 Experimento

- Experimento 2
- Circuitos de corrente alternada
- Corrente e tensão alternadas
- Elementos de circuito
- Notação complexa e impedância
- Atividades do Experimento 2

1 Experimento

- Experimento 2
- Circuitos de corrente alternada
- Corrente e tensão alternadas
- Elementos de circuito
- Notação complexa e impedância
- Atividades do Experimento 2

1 Experimento

- Experimento 2
 - Circuitos de corrente alternada
 - Corrente e tensão alternadas
 - Elementos de circuito
 - Notação complexa e impedância
 - Atividades do Experimento 2

Objetivos do experimento

- Estudar circuitos simples em corrente alternada
- Filtragem de sinais
- Análise de circuitos ressonantes
 - ▶ Resistores
 - ▶ Capacitores
 - ▶ Indutores

- 6 semanas
- Grupos de até nove membros
- Atividades (mínimas)
 - ▶ Descritas mais adiante
- Desafio

- Síntese da semana (até 1 ponto), é uma apresentação
 - ▶ Apresentação nas aulas das terças-feiras (limite de 15 minutos)
 - ▶ Fazer o upload da apresentação, em pdf, até as 19h00 da segunda-feira (diurno) e 8h00 da terça-feira (noturno)
 - ▶ A apresentação deve estar no formato paisagem 4:3 e na primeira página deve conter o nome de todos os membros
 - ★ Upload no site de reservas como "síntese"
- Apresentação final do experimento dia 14/05 (até 3 pontos)
- Entrega do relatório final do experimento dia 21/05 (até 4 pontos)

1 Experimento

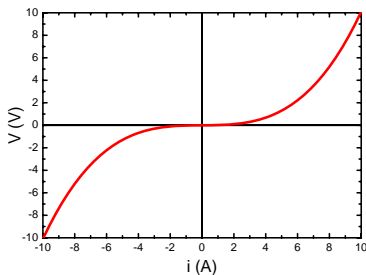
- Experimento 2
- Circuitos de corrente alternada
- Corrente e tensão alternadas
- Elementos de circuito
- Notação complexa e impedância
- Atividades do Experimento 2

Curvas características

- Elementos de circuito (ôhmicos e não ôhmicos)
 - ▶ Resistor comercial, célula solar, pilha

$$R = \frac{V}{i}$$

- ▶ Existe uma proporcionalidade entre tensão e corrente independente do tempo



Nesse experimento

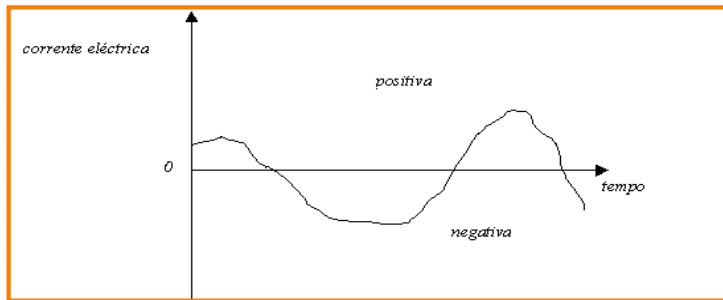
- Vamos explorar alguns elementos elétricos (resistores, capacitores e indutores) sob a ação de tensões alternadas harmônicas
- O que acontece com a corrente que flui no elemento?

1 Experimento

- Experimento 2
- Circuitos de corrente alternada
- **Corrente e tensão alternadas**
- Elementos de circuito
- Notação complexa e impedância
- Atividades do Experimento 2

Corrente ou tensão alternada

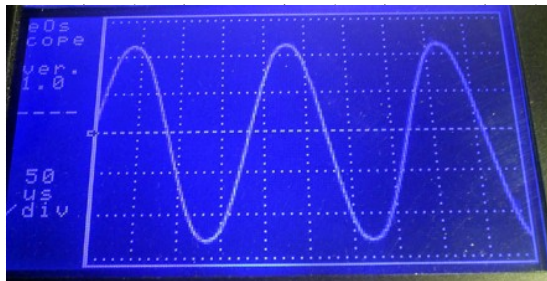
- Qualquer sinal que varia no tempo



- Nessa experiência: tensões harmônicas simples
- Importante:** qualquer tensão dependente do tempo = superposição de tensões harmônicas simples

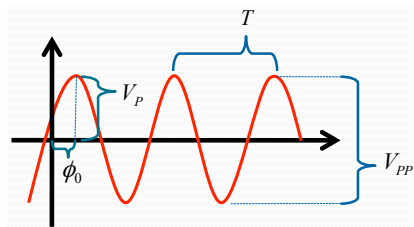
Corrente ou tensão alternada

- Na grande maioria dos casos a tensão (ou corrente) é descrita por uma função harmônica simples
 - ▶ Por exemplo, na sua casa a D.D.P. fornecida é senoidal



Tensão harmônica

- Como descrever matematicamente uma tensão senoidal?
 - ▶ V_P é a tensão máxima ou tensão de pico ou amplitude
 - ▶ ω é a frequência angular
 - ▶ ϕ_0 é a fase da tensão alternada no instante $t = 0$



$$V(t) = V_P \cos(\omega t + \phi_0)$$

$$\omega = 2\pi f$$

$$T = \frac{1}{f}$$

$$V_{PP} = 2V_P$$

$$V_{ef} = \frac{V_P}{\sqrt{2}}$$

A fase

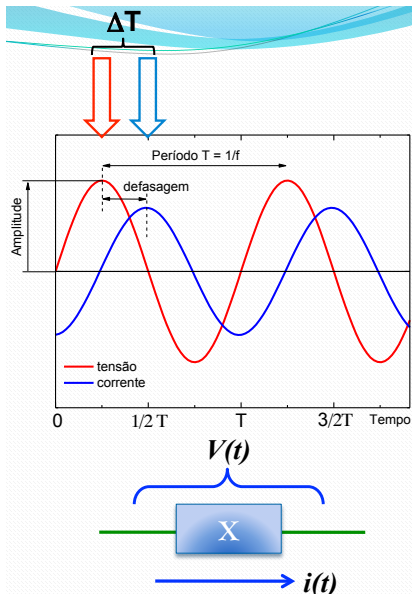
- Em um circuito de corrente alternada a tensão e a corrente não estão necessariamente em fase

$$V(t) = V_P \cos(\omega t + \phi_V)$$

$$i(t) = i_P \cos(\omega t + \phi_i)$$

$$\Delta\phi = \phi_i - \phi_V = 2\pi \frac{\Delta T}{T} = \omega \Delta T$$

- Tanto o período como ΔT devem ser medidos no ponto de inclinação máxima, ou seja, quando a curva cruza o zero



1 Experimento

- Experimento 2
- Circuitos de corrente alternada
- Corrente e tensão alternadas
- **Elementos de circuito**
- Notação complexa e impedância
- Atividades do Experimento 2

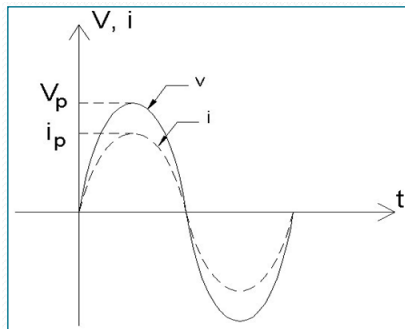
Resistor ôhmico

- A lei de Ohm diz que $V = Ri$, onde R é uma constante se o resistor for ôhmico. Assim, se a tensão estiver variando, temos que:

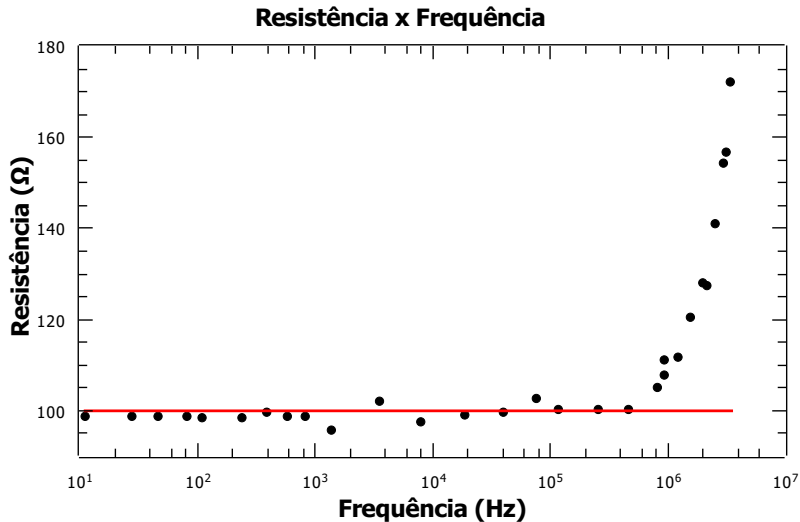
$$V(t) = V_P \cos(\omega t + \phi_0)$$

$$i(t) = \frac{V_P}{R} \cos(\omega t + \phi_0)$$

- Como as fases ϕ_0 são iguais, então a corrente e a tensão no resistor estão em fase!



Resistor medido no Experimento 1, semana 3



- Capacitância \Rightarrow capacidade de acumular carga para uma dada tensão elétrica

$$C = \frac{Q}{V}$$

- Porém, carga elétrica está relacionada com a corrente, através de:

$$Q = \int i(t) dt$$

- Assim

$$C = \frac{Q}{V} = \frac{\int i(t) dt}{V} \Rightarrow V = \frac{1}{C} \int i(t) dt \Rightarrow i(t) = C \frac{dV}{dt}$$

$$i(t) = C \frac{dV}{dt}$$

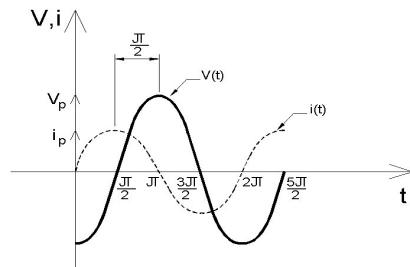
- Para tensão alternada

$$V(t) = V_P \cos(\omega t)$$

$$i(t) = -CV_P \omega \text{sen}(\omega t)$$

- A corrente e a tensão não se encontram em fase
 - ▶ Tensão máxima não ocorre quando a corrente é máxima

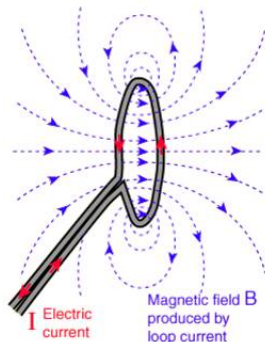
$$i(t) = CV_P \omega \cos\left(\omega t + \frac{\pi}{2}\right)$$



- Bobinas e indutores

- ▶ O fato da espira criar um campo magnético e, conseqüentemente um fluxo magnético nela mesma faz com que haja uma f.e.m. induzida nos seus terminais (Lei de Faraday)
- ▶ Existe uma dependência temporal

$$\varepsilon = -\frac{d\phi_B}{dt} = -L\frac{di(t)}{dt} = -V(t)$$



Indutor ideal

- Assim

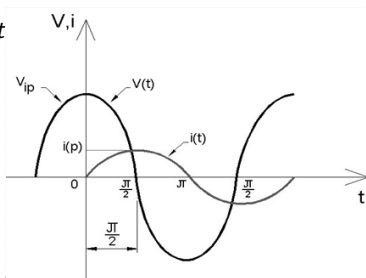
$$V(t) = L \frac{di(t)}{dt} \Rightarrow i(t) = \frac{1}{L} \int V(t) dt$$

- Para tensão alternada

$$V(t) = V_P \cos(\omega t)$$

$$i(t) = \frac{V_P}{\omega L} \text{sen}(\omega t)$$

$$i(t) = \frac{V_P}{\omega L} \cos\left(\omega t - \frac{\pi}{2}\right)$$



1 Experimento

- Experimento 2
- Circuitos de corrente alternada
- Corrente e tensão alternadas
- Elementos de circuito
- **Notação complexa e impedância**
- Atividades do Experimento 2

$$\hat{C} = a + jb \quad \text{com} \quad j = \sqrt{-1}$$
$$\hat{C} = Ce^{j\alpha} \quad \text{com} \quad e^{j\alpha} = \cos\alpha + j\sin\alpha$$

- Relação

$$C = \sqrt{a^2 + b^2} \quad \text{e} \quad \tan\alpha = \frac{b}{a}$$

- Propriedades

$$\frac{d}{dt} (e^{j\omega t}) = j\omega (e^{j\omega t})$$

$$\int e^{j\omega t} dt = \frac{1}{j\omega} (e^{j\omega t})$$

- Podemos escrever uma grandeza complexa como:

$$\hat{V}(t) = V_P e^{j(\omega t + \phi_V)}$$

- A tensão elétrica no elemento é dada pela parte real desta grandeza complexa, ou seja

$$V(t) = \text{Re} \left[\hat{V}(t) \right] = V_P \cos(\omega t + \phi_V)$$

- Podemos escrever uma grandeza complexa como:

$$\hat{i}(t) = i_P e^{j(\omega t + \phi_i)}$$

- A corrente elétrica no elemento é dada pela parte real desta grandeza complexa, ou seja

$$i(t) = \text{Re} \left[\hat{i}(t) \right] = i_P \cos(\omega t + \phi_i)$$

Impedância de um elemento

- Define-se a impedância complexa como sendo a razão entre a tensão e corrente complexas

$$\hat{Z} = \frac{\hat{V}}{\hat{i}}$$

- Ou seja

$$\hat{Z} = \frac{V_P e^{j(\omega t + \phi_V)}}{i_P e^{j(\omega t + \phi_i)}} = \frac{V_P}{i_P} e^{j(\phi_V - \phi_i)}$$

$$\hat{Z} = Z_0 e^{j\phi_0} \quad \text{com} \quad Z_0 = \frac{V_P}{i_P} \quad \text{e} \quad \phi_0 = \phi_V - \phi_i$$

Impedância de um elemento

$$\hat{Z} = Z_0 e^{j\phi_0}$$

- Z_0 é o módulo da impedância do elemento

$$Z_0 = \frac{V_P}{i_P}$$

- ϕ_0 é a diferença de fase entre a tensão e corrente

$$V(t) = V_P \cos(\omega t) \Rightarrow \hat{V}(t) = V_P e^{j(\omega t)}$$

$$i(t) = CV_P \omega \cos\left(\omega t + \frac{\pi}{2}\right) \Rightarrow \hat{i}(t) = CV_P \omega e^{j(\omega t + \frac{\pi}{2})}$$

- De modo que

$$\hat{Z} = \frac{\hat{V}}{\hat{i}} = \frac{1}{\omega C} e^{-j\frac{\pi}{2}} \left\{ \begin{array}{l} Z_0 = \frac{1}{\omega C} \\ \phi_0 = -\frac{\pi}{2} \end{array} \right.$$

$$\begin{aligned}V(t) = V_P \cos(\omega t) &\Rightarrow \hat{V}(t) = V_P e^{j(\omega t)} \\i(t) = \frac{V_P}{\omega L} \cos\left(\omega t - \frac{\pi}{2}\right) &\Rightarrow \hat{i}(t) = \frac{V_P}{\omega L} e^{j(\omega t - \frac{\pi}{2})}\end{aligned}$$

- De modo que

$$\hat{Z} = \frac{\hat{V}}{\hat{i}} = \omega L e^{j\frac{\pi}{2}} \left\{ \begin{array}{l} Z_0 = \omega L \\ \phi_0 = \frac{\pi}{2} \end{array} \right.$$

Indutor real (exercício)

- O indutor real (bobina) possui uma resistência elétrica interna (R_B) que muitas vezes não pode ser desprezada
- Nesse caso, a tensão elétrica é a soma das tensões da parte indutiva e resistiva

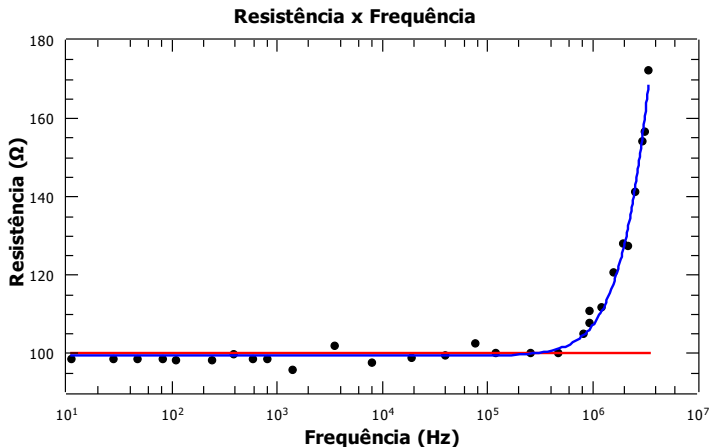
$$V = L \frac{di}{dt} + R_B i$$

- Assim

$$Z_0 = \sqrt{R_B^2 + \omega^2 L^2} \quad \text{e} \quad \phi_0 = \arctan \left(\frac{\omega L}{R_B} \right)$$

- Mostre isso!

Resistor medido no Experimento 1, semana 3



$$Z_0 = \sqrt{R^2 + \omega^2 L^2} \Rightarrow R = 99,4 \pm 0,5 \Omega \quad \text{e} \quad L = 40,0 \pm 0,5 \mu\text{H}$$

1 Experimento

- Experimento 2
- Circuitos de corrente alternada
- Corrente e tensão alternadas
- Elementos de circuito
- Notação complexa e impedância
- Atividades do Experimento 2

- Estudar circuitos simples em corrente alternada
- Filtragem de sinais
- Análise de circuitos ressonantes
 - ▶ Resistores
 - ▶ Capacitores
 - ▶ Indutores

Atividades mínimas do experimento

- Caracterização de um capacitor e de um indutor
 - ▶ Impedância x frequência
 - ▶ Fase x frequência
 - ▶ Comparação com modelos
- Caracterização de um circuito RC
 - ▶ Ganho x frequência
 - ▶ Fase x frequência
 - ▶ Comparação com modelos
- Caracterização de filtros RC
 - ▶ Passa-baixa
 - ▶ Passa-alta
 - ▶ Passa-banda
 - ▶ Simulações
- Caracterização de circuitos RLC
 - ▶ Corrente x frequência
 - ▶ Fatores de qualidade $Q \approx 20$ e $Q \approx 2$

- Atividades realizadas
 - ▶ Resultados experimentais
 - ▶ Simulações
 - ▶ Pesquisas;
 - ▶ Estimativas teóricas
 - ▶ Dúvidas
 - ▶ Planejamento das atividades futuras

A meta final, o desafio do experimento

- Usando uma onda quadrada de 250 Hz e o conceito de filtro passa-baixa projetar um circuito de modo que ele selecione o harmônico fundamental dessa onda quadrada, com pouca atenuação (amplitude pico-pico da onda filtrada de pelo menos 80% da amplitude da onda original)
- É possível, filtrando passivamente obter, partindo de uma onda quadrada de 250Hz, um sinal “razoavelmente senoidal” com frequência de 500Hz?
- Usando uma onda quadrada de 250 Hz e o conceito de filtro passa-banda projetar um circuito de modo a obter na saída um sinal razoavelmente senoidal com frequência de 750 Hz e amplitude de pelo menos 10% da amplitude da onda original.