Lição 4

Técnicas de Análise de Circuitos CA

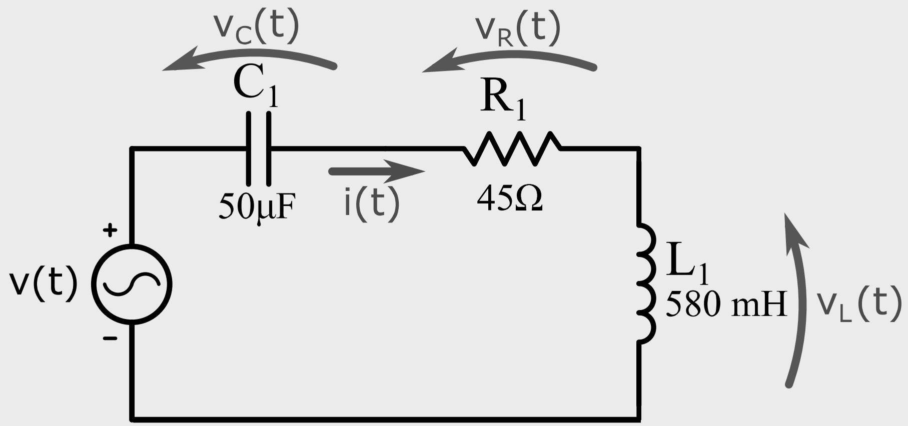
Consideração: Regime Estacionário Senoidal $\Rightarrow$ existem apenas fontes senoidais, e não se avalia as respostas transitórias

- Em um circuito CA alimentado por **uma ou mais** fontes operando **na mesma frequência** ω, todas as tensões e correntes serão senoides de mesma frequência ω.
- As técnicas de análise utilizadas em circuitos CC podem ser aplicadas de forma idêntica para o regime estacionário senoidal em termos de fasores e impedâncias.

Exemplo 1

Análise de um circuito RLC série

Determine a corrente e as tensões indicadas no circuito a seguir, onde $v(t) = 380\cos(250t - 28^\circ)$.

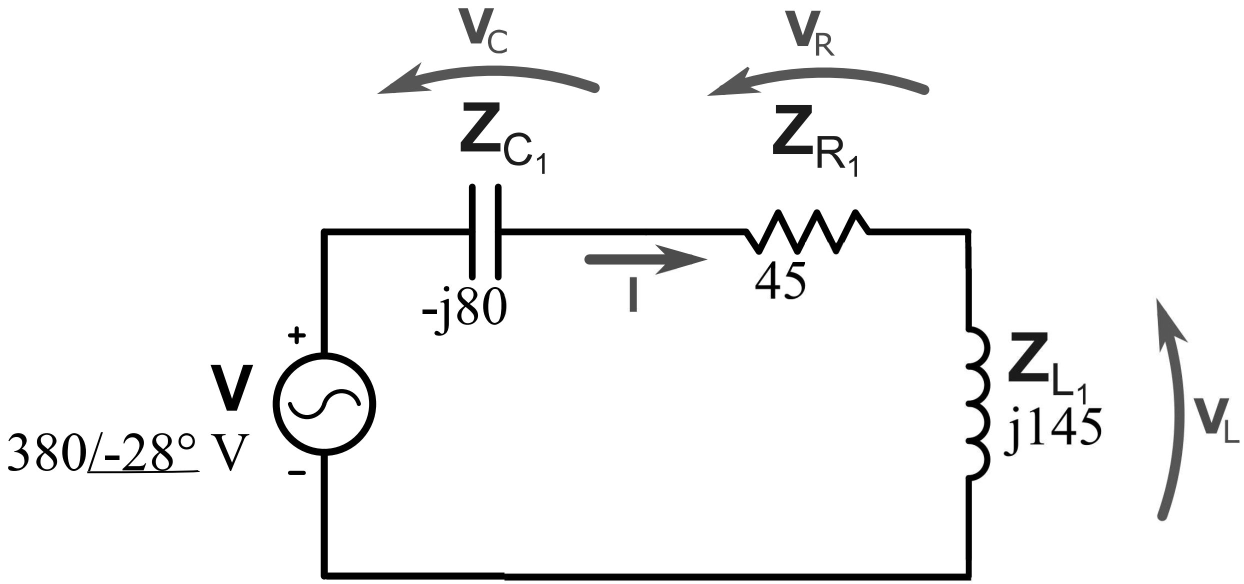


Solução: Cálculo das impedâncias de cada elemento:

- Capacitor: $\mathbf{Z}_{C_1} = -j\dfrac{1}{\omega C_1} = -j\dfrac{1}{250 \cdot 50 \times 10^{-6}} = -j80\ \Omega$;
- Resistor: $\mathbf{Z}_{R_1} = R_1 = 45\ \Omega$;
- Indutor: $\mathbf{Z}_{L_1} = j\omega L_1 = j250 \cdot 580 \times 10^{-3} = j145\ \Omega$;

Exemplo 1 (continuação...)

Representação do circuito no domínio da frequência:



Aplicando a **Lei de Kirchhoff das tensões (LKT)** às tensões fasoriais, tem-se:

$$\mathbf{V}_C + \mathbf{V}_R + \mathbf{V}_L = \mathbf{V}$$

Agora, utilizando a Lei de Ohm para circuitos CA:

$$\mathbf{Z}_{C_1} \cdot \mathbf{I} + \mathbf{Z}_{R_1} \cdot \mathbf{I} + \mathbf{Z}_{L_1} \cdot \mathbf{I} = \mathbf{V}$$

$$(\mathbf{Z}_{C_1} + \mathbf{Z}_{R_1} + \mathbf{Z}_{L_1}) \cdot \mathbf{I} = \mathbf{V}$$

Exemplo 1 (continuação...)

$$\mathbf{I} = \frac{\mathbf{V}}{(\mathbf{Z}_{C_1} + \mathbf{Z}_{R_1} + \mathbf{Z}_{L_1})}$$

Substituindo os valores das impedâncias e da tensão da fonte:

$$\mathbf{I} = \frac{380\underline{/-28^\circ}}{(-j80 + 45 + j145)} = \frac{380\underline{/-28^\circ}}{(45 + j65)} \Rightarrow \boxed{\mathbf{I} = 4,8067\underline{/-83,3^\circ}\ \mathrm{A}}$$

Em seguida, por meio da Lei de Ohm, determina-se as tensões fasoriais em cada elemento do circuito:

$$\mathbf{V_C} = \mathbf{Z}_{C_1} \cdot \mathbf{I} = -j80 \cdot 4,8067\underline{/-83,3^\circ} \Rightarrow \boxed{\mathbf{V_C} = 384,53\underline{/-173,3^\circ}\ \mathrm{V}}$$

$$\mathbf{V_R} = \mathbf{Z}_{R_1} \cdot \mathbf{I} = 45 \cdot 4,8067\underline{/-83,3^\circ} \Rightarrow \boxed{\mathbf{V_R} = 216,30\underline{/-83,3^\circ}\ \mathrm{V}}$$

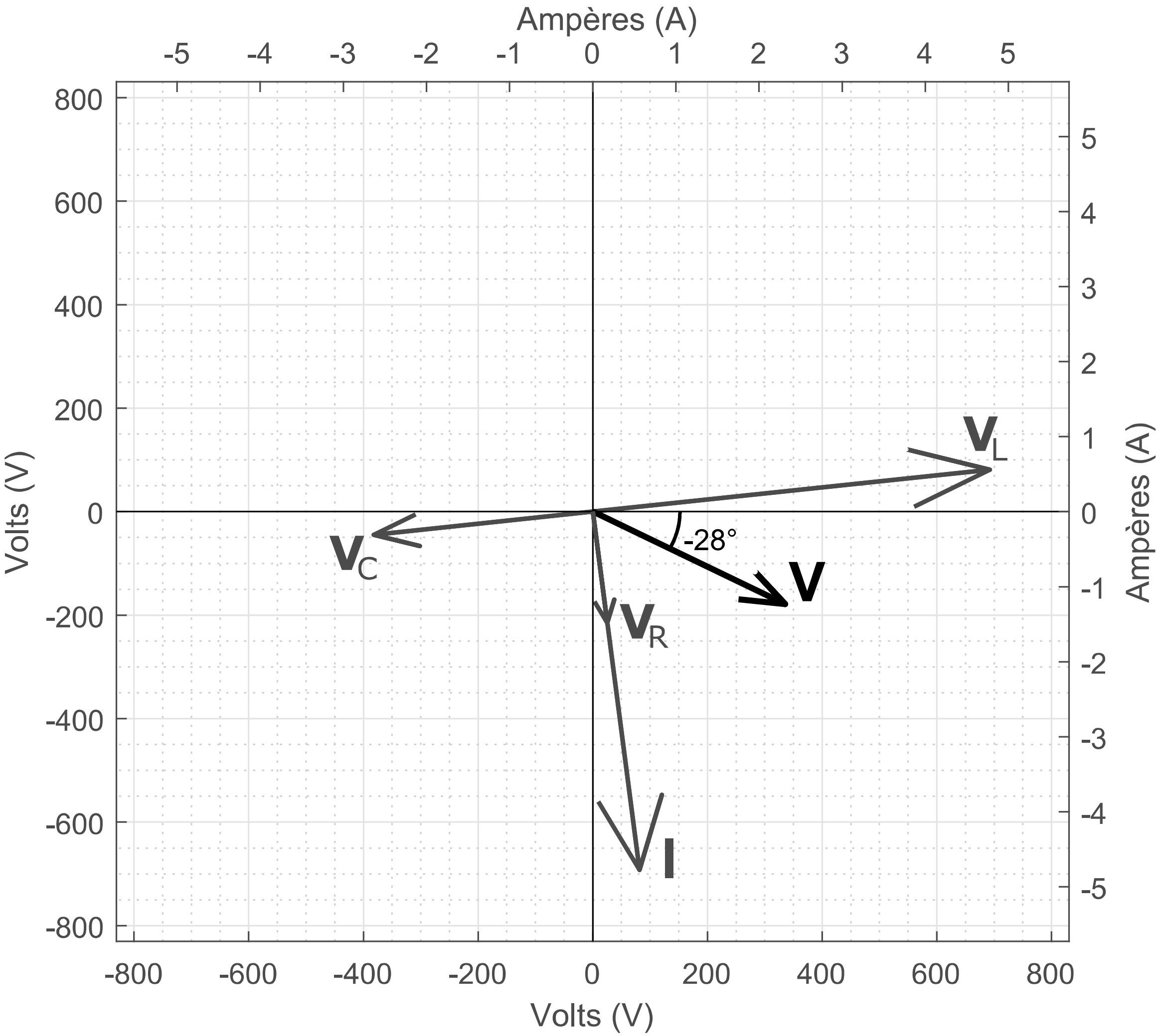
$$\mathbf{V_L} = \mathbf{Z}_{L_1} \cdot \mathbf{I} = j145 \cdot 4,8067\underline{/-83,3^\circ} \Rightarrow \boxed{\mathbf{V_L} = 696,97\underline{/6,7^\circ}\ \mathrm{V}}$$

Transformando os fasores para o domínio do tempo, com $\omega = 250$ rad/s:

- $i(t) = 4,8067\cos(250t - 83,3^\circ)\ \mathrm{A}$
- $v_C(t) = 384,53\cos(250t - 173,3^\circ)\ \mathrm{V}$
- $v_R(t) = 216,30\cos(250t - 83,3^\circ)\ \mathrm{V}$
- $v_L(t) = 696,97\cos(250t + 6,7^\circ)\ \mathrm{V}$

Exemplo 1 (continuação...)

Diagrama Fasorial:



- $\mathbf{V} = 380\angle{-28^\circ}$ V
- $\mathbf{V_C} = 384,53\angle{-173,3^\circ}$ V
- $\mathbf{V_R} = 216,30\angle{-83,3^\circ}$ V
- $\mathbf{V_L} = 696,97\angle{6,7^\circ}$ V
- $\mathbf{I} = 4,8067\angle{-83,3^\circ}$ A

Exemplo 1 (continuação...)

Análise e interpretação dos resultados:

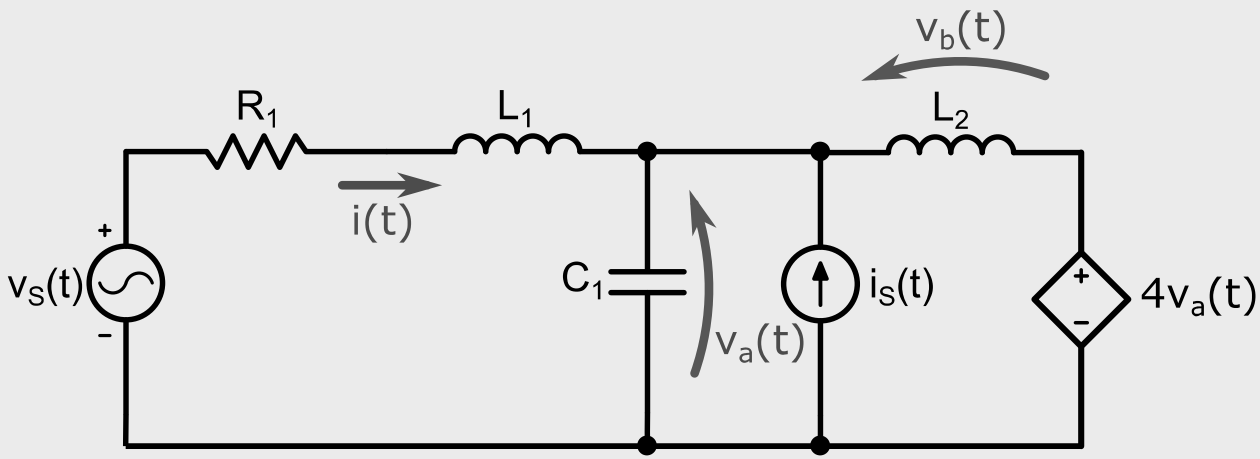
- Confira que $\mathbf{V}_C + \mathbf{V}_R + \mathbf{V}_L = \mathbf{V}$.
- Observe que $\mathbf{I}$ está em fase com $\mathbf{V}_R$.
- Observe que $\mathbf{I}$ está **adiantada** 90 °em relação a $\mathbf{V}_C$.
- Observe que $\mathbf{I}$ está **atrasada** 90 °em relação a $\mathbf{V}_L$.
- A impedância equivalente vista pela fonte, $(\mathbf{Z}_{C_1} + \mathbf{Z}_{R_1} + \mathbf{Z}_{L_1}) = 45 + j65$, tem característica indutiva. Por isso, ela tende a atrasar a corrente em relação à tensão da fonte $\mathbf{V}$.
- A impedância equivalente, na forma polar, é igual a $79,06\underline{/55,3^\circ}$. Consequentemente, $\mathbf{I}$ está **atrasada 55,3** ° em relação a $\mathbf{V}$.
- Note que, neste exemplo, as amplitudes das tensões no indutor e no capacitor são superiores à amplitude da tensão imposta pela fonte.

> Ao analisar um circuito, **sempre** avalie a coerência dos resultados.

Exemplo 2

Análise Nodal [Svoboda; Dorf, 2016]

Determine a corrente e as tensões indicadas no circuito a seguir, onde: $v_S(t) = 20\cos(250t)$ V; $i_S(t) = 1,2\cos(250t + 45°)$ A; $R_1 = 8\Omega$; $C_1 = 0,25mF$ mH; $L_1 = 36$ mH; e $L_2 = 80$ mH.



Solução: Primeiramente, observar que as fontes independentes possuem mesma frequência ($\omega = 250$ rad/s). Portanto, o circuito pode ser analisado por meio de fasores considerando as duas fontes simultaneamente.

Exemplo 2 (continuação...)

Cálculo das impedâncias:

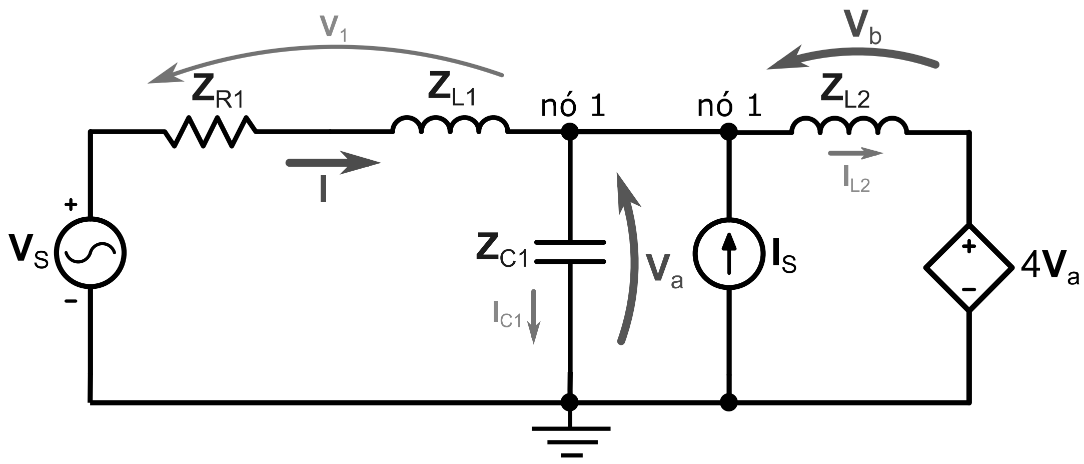
- Resistor R_1: $\mathbf{Z}_{R_1} = R_1 = 8\ \Omega$;
- Capacitor C_1: $\mathbf{Z}_{C_1} = -j\dfrac{1}{\omega C_1} = -j\dfrac{1}{250 \cdot 0,25 \times 10^{-3}} = -j16\ \Omega$;
- Indutor L_1: $\mathbf{Z}_{L_1} = j\omega L_1 = j250 \cdot 36 \times 10^{-3} = j9\ \Omega$;
- Indutor L_2: $\mathbf{Z}_{L_2} = j\omega L_2 = j250 \cdot 80 \times 10^{-3} = j20\ \Omega$;

Tensões fasorias das fontes:

- Fonte de tensão independente: $\mathbf{V}_S = 20\underline{/0^\circ}$ V;
- Fonte de corrente independente: $\mathbf{I}_S = 1,2\underline{/45^\circ}$ V;
- Fonte de tensão dependente: $4\mathbf{V}_a$ V;

Exemplo 2 (continuação...)

Representação do circuito no domínio da frequência:



Aplicando a Lei de Kirchhoff das Correntes ao **nó 1**, tem-se:

$$\mathbf{I} + \mathbf{I}_S = \mathbf{I}_{C1} + \mathbf{I}_{L2} \textbf{ (Eq. 1)}$$

Escrevendo as correntes desconhecidas na **(Eq. 1)** em termos das tensões e impedâncias:

- $\mathbf{I} = \frac{\mathbf{V}_1}{(\mathbf{Z}_{R_1}+\mathbf{Z}_{L_1})} \Rightarrow \boxed{\mathbf{I} = \frac{\mathbf{V}_S-\mathbf{V}_a}{(\mathbf{Z}_{R_1}+\mathbf{Z}_{L_1})}}$ **(Eq. 2)**
- $\boxed{\mathbf{I}_{C1} = \frac{\mathbf{V}_a}{\mathbf{Z}_{C_1}}}$ **(Eq. 3)**
- $\mathbf{I}_{L2} = \frac{\mathbf{V}_b}{\mathbf{Z}_{L_2}} = \frac{\mathbf{V}_a-4\mathbf{V}_a}{\mathbf{Z}_{L_2}} \Rightarrow \boxed{\mathbf{I}_{L2} = \frac{-3\mathbf{V}_a}{\mathbf{Z}_{L_2}}}$ **(Eq. 4)**

Exemplo 2 (continuação...)

Substituindo (Eq. 2), (Eq. 3) e (Eq. 4) em (Eq. 1):

$$\frac{\mathbf{V}_S - \mathbf{V}_a}{(\mathbf{Z}_{R_1} + \mathbf{Z}_{L_1})} + \mathbf{I}_S = \frac{\mathbf{V}_a}{\mathbf{Z}_{C_1}} + \frac{-3\mathbf{V}_a}{\mathbf{Z}_{L_2}}$$

Colocando $\mathbf{V}_a$ em evidência:

$$\frac{\mathbf{V}_S}{(\mathbf{Z}_{R_1} + \mathbf{Z}_{L_1})} + \mathbf{I}_S = \mathbf{V}_a \left(\frac{1}{\mathbf{Z}_{R_1} + \mathbf{Z}_{L_1}} + \frac{1}{\mathbf{Z}_{C_1}} - \frac{3}{\mathbf{Z}_{L_2}} \right)$$

- Substituindo os valores calculados das impedâncias e os fasores correspondentes às fontes, determina-se $\mathbf{V}_a$:

$$\frac{20\underline{/0^\circ}}{(8 + j9)} + 1,2\underline{/45^\circ} = \mathbf{V}_a \left(\frac{1}{8 + j9} + \frac{1}{-j16} - \frac{3}{j20} \right)$$

$$1,99\underline{/-11,38^\circ} = \mathbf{V}_a \left(0,16\underline{/69,86^\circ}\right) \Rightarrow \boxed{\mathbf{V}_a = 12,43\underline{/-81,24^\circ}\ \text{V}}$$

Exemplo 2 (continuação...)

- Por sua vez, a tensão $\mathbf{V}_b$ é dada por:

$$\mathbf{V}_b = \mathbf{V}_a - 4\mathbf{V}_a = -3\mathbf{V}_a \Rightarrow \boxed{\mathbf{V}_b = 37,29\underline{/98,76^\circ} \text{ V}}$$

- Por fim, para determinar $\mathbf{I}$, utiliza-se a (Eq.2):

$$\mathbf{I} = \frac{\mathbf{V}_S - \mathbf{V}_a}{(\mathbf{Z}_{R_1} + \mathbf{Z}_{L_1})} = \frac{20\underline{/0^\circ} - 12,43\underline{/-81,24^\circ}}{(8 + j9)} \Rightarrow \boxed{\mathbf{I} = 1,82\underline{/-14,21^\circ} \text{ A}}$$

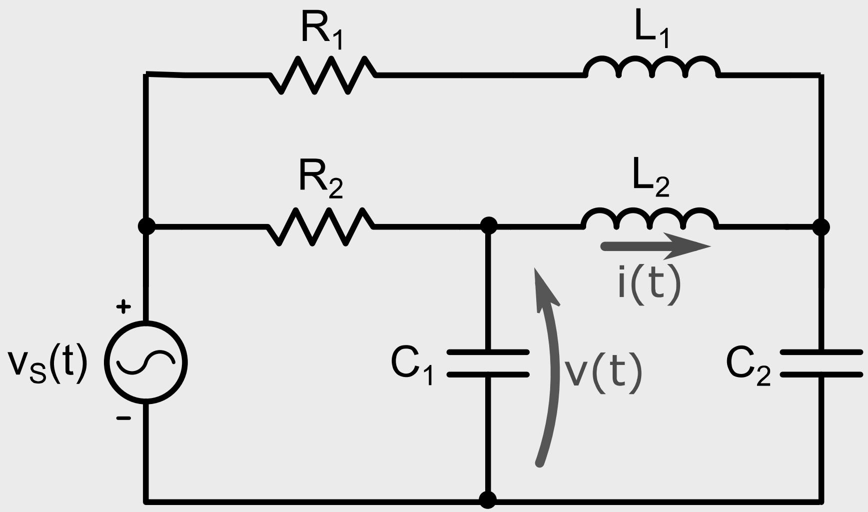
Assim, as senoides correspondentes aos fasores $\mathbf{V}_a$, $\mathbf{V}_b$ e $\mathbf{I}$ são:

- $v_a(t) = 12,43\cos(250t - 81,24^\circ)$ V
- $v_b(t) = 37,29\cos(250t + 98,76^\circ)$ V
- $i(t) = 1,82\cos(250t - 14,21^\circ)$ A

Exemplo 3

Análise de Malhas [Svoboda; Dorf, 2016]

Determine a corrente e a tensão indicadas no circuito a seguir, onde:
$R_1 = 100\Omega$; $R_2 = 200\Omega$; $L_1 = 80$ mH; $L_2 = 50$ mH; $C_1 = 25\mu$F;
$C_2 = 12,5\mu$F; e $v_S(t) = 45\cos(500t)$ V.



Exemplo 3 (continuação...)

Solução: Cálculo das impedâncias, para $\omega = 500$ rad/s:

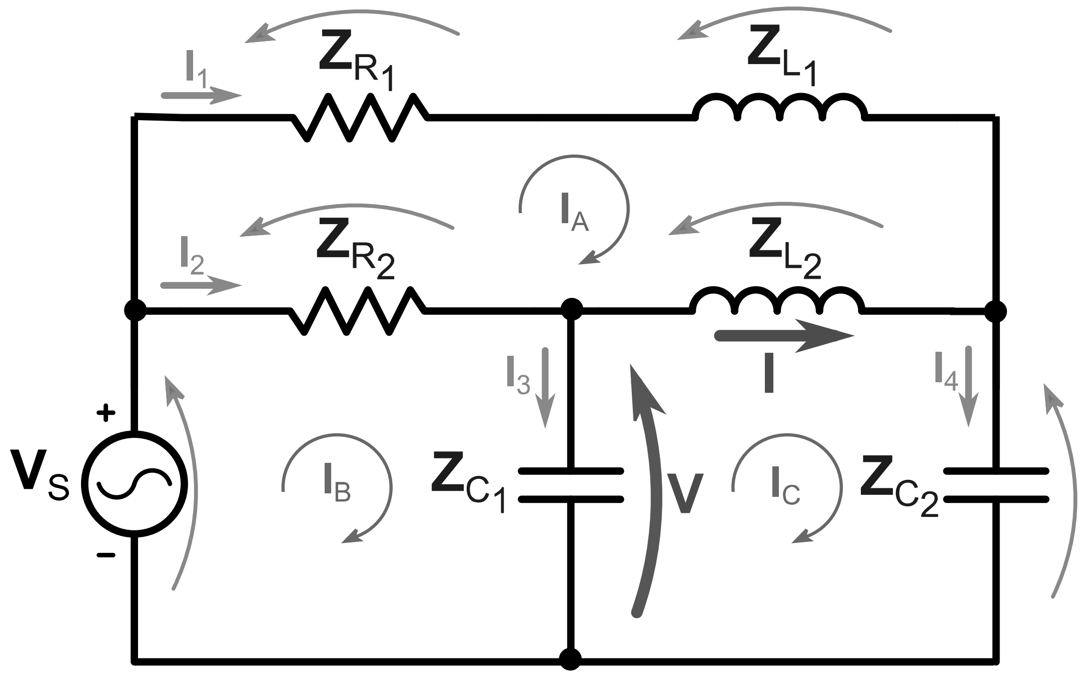
- Resistor R_1: $\mathbf{Z}_{R_1} = R_1 = 100\ \Omega$;
- Resistor R_2: $\mathbf{Z}_{R_2} = R_2 = 200\ \Omega$;
- Capacitor C_1: $\mathbf{Z}_{C_1} = -j\dfrac{1}{\omega C_1} = -j\dfrac{1}{500 \cdot 25 \times 10^{-6}} = -j80\ \Omega$;
- Capacitor C_2: $\mathbf{Z}_{C_2} = -j\dfrac{1}{\omega C_2} = -j\dfrac{1}{500 \cdot 12,5 \times 10^{-6}} = -j160\ \Omega$;
- Indutor L_1: $\mathbf{Z}_{L_1} = j\omega L_1 = j500 \cdot 80 \times 10^{-3} = j40\ \Omega$;
- Indutor L_2: $\mathbf{Z}_{L_2} = j\omega L_2 = j500 \cdot 50 \times 10^{-3} = j25\ \Omega$;

Tensão fasorial da fonte:

- Fonte de tensão independente: $\mathbf{V}_S = 45\underline{/0^\circ}$ V;

Exemplo 3 (continuação...)

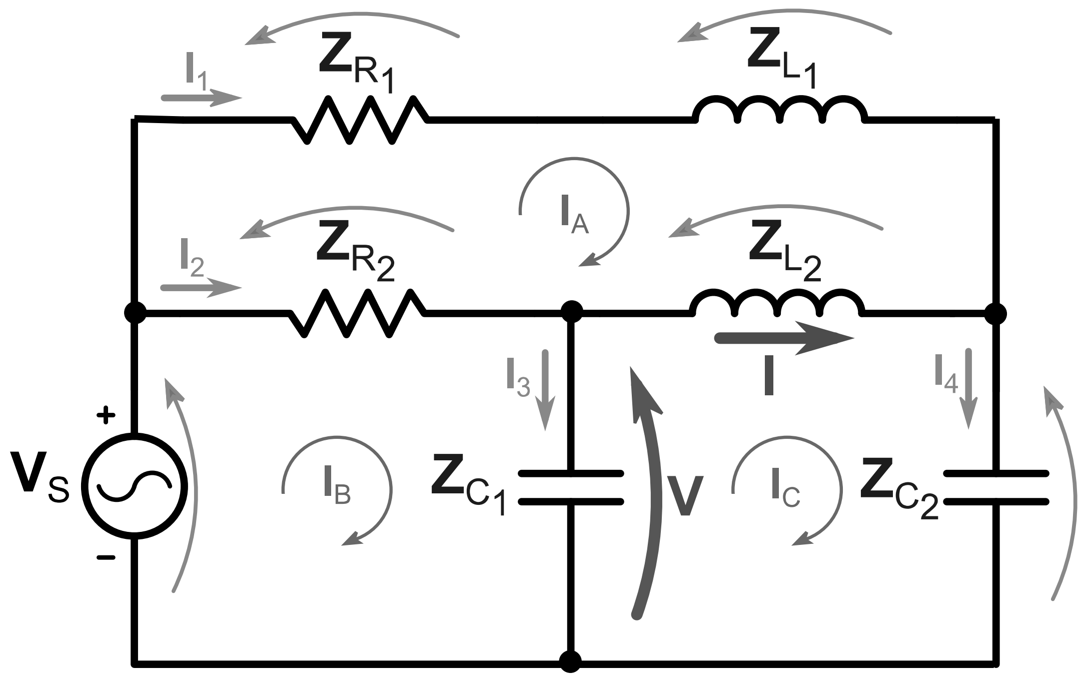
Representação do circuito no domínio da frequência:



$$\begin{cases} \text{(malha A): } -\mathbf{Z}_{R_1}\mathbf{I}_1 - \mathbf{Z}_{L_1}\mathbf{I}_1 + \mathbf{Z}_{L_2}\mathbf{I} + \mathbf{Z}_{R_2}\mathbf{I}_2 = 0 \\ \text{(malha B): } \mathbf{V}_S - \mathbf{Z}_{R_2}\mathbf{I}_2 - \mathbf{Z}_{C_1}\mathbf{I}_3 = 0 \\ \text{(malha C): } \mathbf{Z}_{C_1}\mathbf{I}_3 - \mathbf{Z}_{L_2}\mathbf{I} - \mathbf{Z}_{C_2}\mathbf{I}_4 = 0 \end{cases}$$

Exemplo 3 (continuação...)

Representação do circuito no domínio da frequência:



$$\begin{cases} \text{(malha A):} \; -\mathbf{Z}_{R_1}\mathbf{I}_A - \mathbf{Z}_{L_1}\mathbf{I}_A + \mathbf{Z}_{L_2}(\mathbf{I}_C - \mathbf{I}_A) + \mathbf{Z}_{R_2}(\mathbf{I}_B - \mathbf{I}_A) = 0 \\ \text{(malha B):} \; \mathbf{V}_S - \mathbf{Z}_{R_2}(\mathbf{I}_B - \mathbf{I}_A) - \mathbf{Z}_{C_1}(\mathbf{I}_B - \mathbf{I}_C) = 0 \\ \text{(malha C):} \; \mathbf{Z}_{C_1}(\mathbf{I}_B - \mathbf{I}_C) - \mathbf{Z}_{L_2}(\mathbf{I}_C - \mathbf{I}_A) - \mathbf{Z}_{C_2}\mathbf{I}_C = 0 \end{cases}$$

Exemplo 3 (continuação...)

$$\begin{cases} \text{(malha A): } -\mathbf{Z}_{R_1}\mathbf{I}_A - \mathbf{Z}_{L_1}\mathbf{I}_A + \mathbf{Z}_{L_2}(\mathbf{I}_C - \mathbf{I}_A) + \mathbf{Z}_{R_2}(\mathbf{I}_B - \mathbf{I}_A) = 0 \\ \text{(malha B): } \mathbf{V}_S - \mathbf{Z}_{R_2}(\mathbf{I}_B - \mathbf{I}_A) - \mathbf{Z}_{C_1}(\mathbf{I}_B - \mathbf{I}_C) = 0 \\ \text{(malha C): } \mathbf{Z}_{C_1}(\mathbf{I}_B - \mathbf{I}_C) - \mathbf{Z}_{L_2}(\mathbf{I}_C - \mathbf{I}_A) - \mathbf{Z}_{C_2}\mathbf{I}_C = 0 \end{cases}$$

Desenvolvendo as equações de malha:

$$\begin{cases} \mathbf{I}_A(-\mathbf{Z}_{R_1} - \mathbf{Z}_{L_1} - \mathbf{Z}_{L_2} - \mathbf{Z}_{R_2}) + \mathbf{I}_B(\mathbf{Z}_{R_2}) + \mathbf{I}_C(\mathbf{Z}_{L_2}) = 0 \\ \mathbf{I}_A(-\mathbf{Z}_{R_2}) + \mathbf{I}_B(\mathbf{Z}_{R_2} + \mathbf{Z}_{C_1}) + \mathbf{I}_C(-\mathbf{Z}_{C_1}) = \mathbf{V}_S \\ \mathbf{I}_A(\mathbf{Z}_{L_2}) + \mathbf{I}_B(\mathbf{Z}_{C_1}) + \mathbf{I}_C(-\mathbf{Z}_{C_1} - \mathbf{Z}_{L_2} - \mathbf{Z}_{C_2}) = 0 \end{cases}$$

Substituindo os valores das impedâncias e da tensão da fonte:

$$\begin{cases} \mathbf{I}_A(-100 - j40 - j25 - 200) + \mathbf{I}_B(200) + \mathbf{I}_C(j25) = 0 \\ \mathbf{I}_A(-200) + \mathbf{I}_B(200 + (-j80)) + \mathbf{I}_C(-(-j80)) = \mathbf{V}_S \\ \mathbf{I}_A(j25) + \mathbf{I}_B(-j80) + \mathbf{I}_C(-(-j80) - j25 - (-j160)) = 0 \end{cases}$$

Exemplo 3 (continuação...)

$$\begin{cases} \mathbf{I}_A(-300 - j65) + \mathbf{I}_B(200) + \mathbf{I}_C(j25) = 0 \\ \mathbf{I}_A(-200) + \mathbf{I}_B(200 - j80) + \mathbf{I}_C(j80) = \mathbf{4}5 \\ \mathbf{I}_A(j25) + \mathbf{I}_B(-j80) + \mathbf{I}_C(j215) = 0 \end{cases}$$

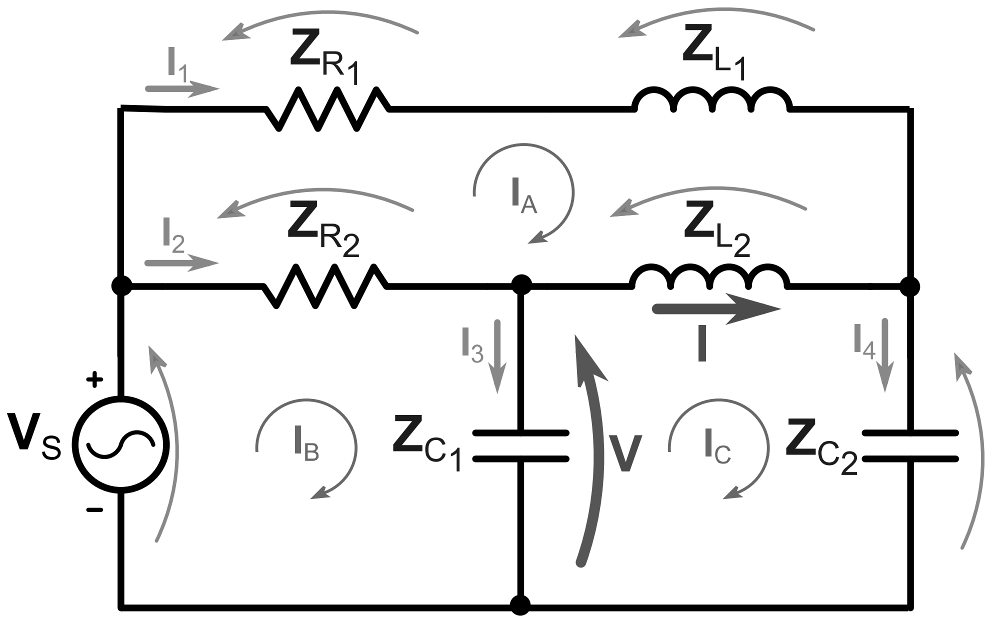
Escrevendo o sistema de equações na forma matricial:

$$\begin{bmatrix} -300 - j65 & 200 & j25 \\ -200 & 200 - j80 & j80 \\ j25 & -j80 & j215 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{I}_A \\ \mathbf{I}_B \\ \mathbf{I}_C \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 45 \\ 0 \end{bmatrix}$$

Resolvendo o sistema de equações, tem-se a solução:

$$\begin{bmatrix} \mathbf{I}_A \\ \mathbf{I}_B \\ \mathbf{I}_C \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0{,}374 \angle 15,16^\circ \\ 0{,}575 \angle 25,25^\circ \\ 0{,}171 \angle 27,81^\circ \end{bmatrix}$$

Exemplo 3 (continuação...)



$$\begin{bmatrix} \mathbf{I}_A \\ \mathbf{I}_B \\ \mathbf{I}_C \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0{,}374 \angle 15,16^\circ \\ 0{,}575 \angle 25,25^\circ \\ 0{,}171 \angle 27,81^\circ \end{bmatrix}$$

A corrente $\mathbf{I}$ é:

$\mathbf{I} = \mathbf{I}_C - \mathbf{I}_A = 0,171\angle 27,81^\circ - 0,374\angle 15,16^\circ \Rightarrow \boxed{\mathbf{I}{=}0{,}211 \angle -175,09^\circ \ \mathrm{A}}$

A tensão $\mathbf{V}$ é:

$\mathbf{V} = \mathbf{Z}_{C_1}\mathbf{I}_3 = \mathbf{Z}_{C_1}(\mathbf{I}_B - \mathbf{I}_C) = -j80(0,575\angle 25,25^\circ - 0,171\angle 27,81^\circ) \Rightarrow$
$\boxed{\mathbf{V}{=}32{,}32 \angle 114,17^\circ \ \mathrm{V}}$

$i(t) = 0,211\cos(500t - 175,09^\circ)$ A e $v(t) = 32,32\cos(500t + 114,17^\circ)$ V

Atividades

Leitura Complementar

[Svoboda; Dorf, 2016]: Capítulo 10, Seções 10.5 e 10.6.

Atividade 1

Resolva os Exercícios **12 a 17** do **Caderno de Exercícios**.

Sugestões de Exercícios Complementares

[Svoboda; Dorf, 2016]: Capítulo 10, Problemas P 10.5-13, P 10.5-18, P 10.5-29, P 10.6-6, P 10.6-22, PP 10-2, PP 10-3.

Lição 5

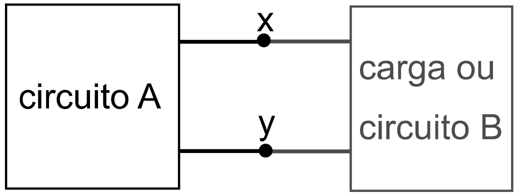
Teoremas na análise de circuitos CA

Os circuitos CA contendo elementos R, L e C são circuitos lineares.

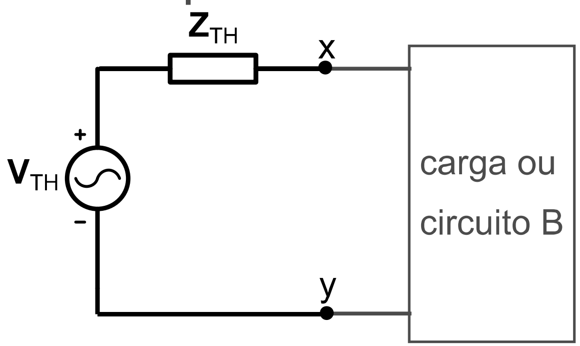
Desta forma, assim como nos circuitos CC, pode-se utilizar métodos de análise empregando os **Teoremas de Thévenin e Norton**, a **transformação de fontes** e o **princípio da superposição**.

Teoremas de Thévenin e Norton

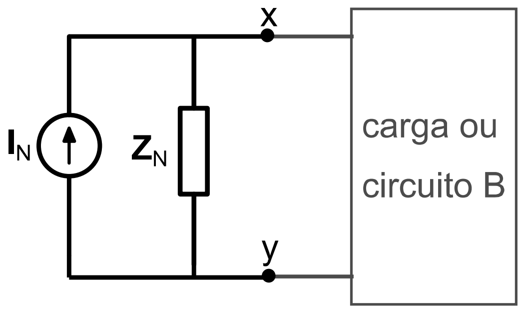
circuito original



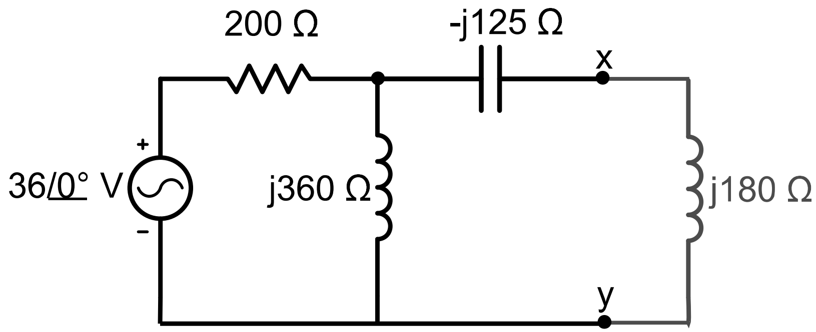
circuito equivalente de Thévenin

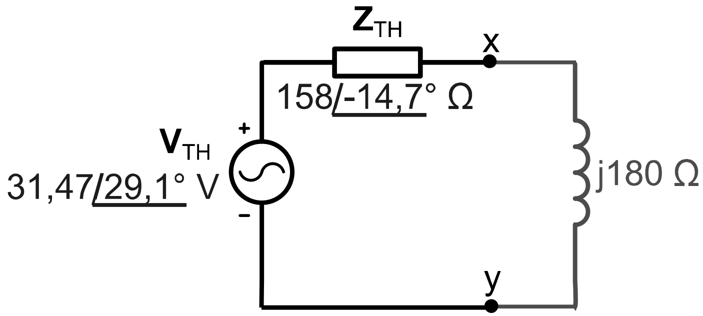


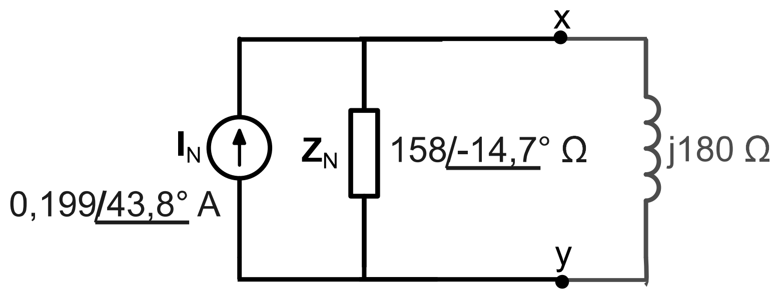
circuito equivalente de Norton



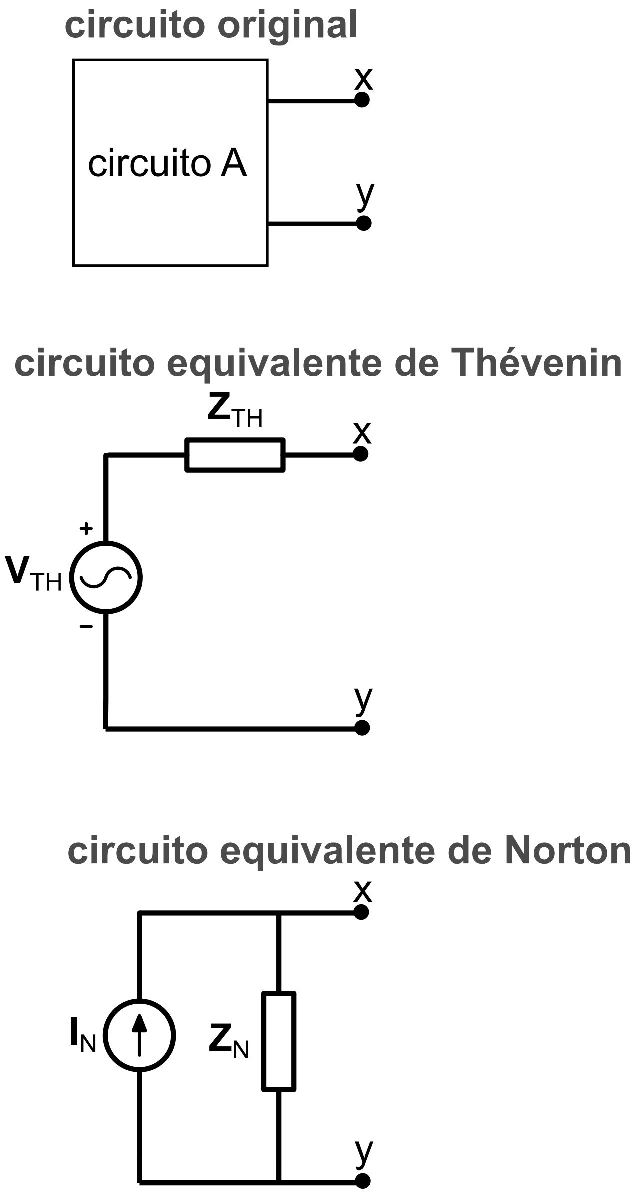
Exemplo







Teoremas de Thévenin e Norton



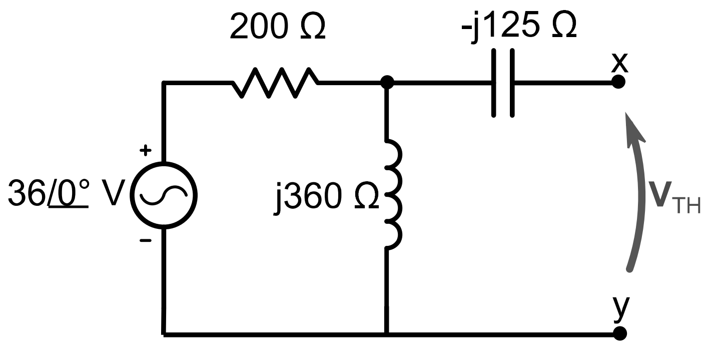
Determinação de $\mathbf{V}_{TH}$, $\mathbf{Z}_{TH}$, $\mathbf{I}_N$ e $\mathbf{Z}_N$:

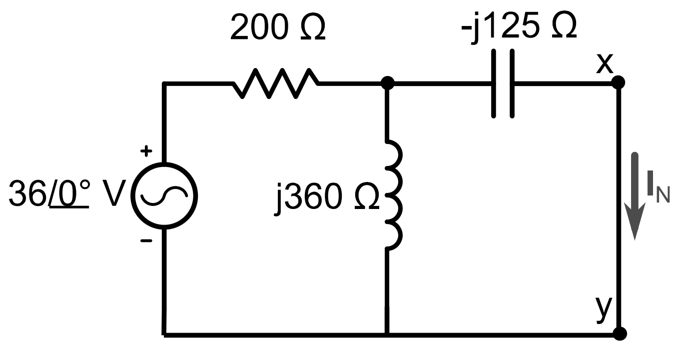
- $\mathbf{V}_{TH}$ é a tensão entre os terminais x e y abertos.
- $\mathbf{Z}_{TH}$ é a impedância equivalente entre os terminais x e y, eliminando-se todas as fontes independentes do circuito A. As fontes dependentes permanecem inalteradas.
- $\mathbf{I}_N$ é a corrente de curto-circuito que surge quando um curto-circuito é ligado aos terminais x e y.
- $\mathbf{Z}_{TH} = \mathbf{Z}_N$.

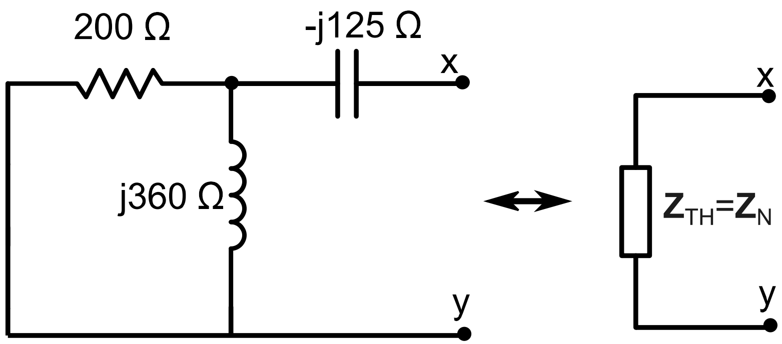
$$\mathbf{V}_{TH} = \mathbf{Z}_{TH} \cdot \mathbf{I}_N$$

$$\mathbf{V}_{TH} = \mathbf{Z}_N \cdot \mathbf{I}_N$$

Exemplo 1



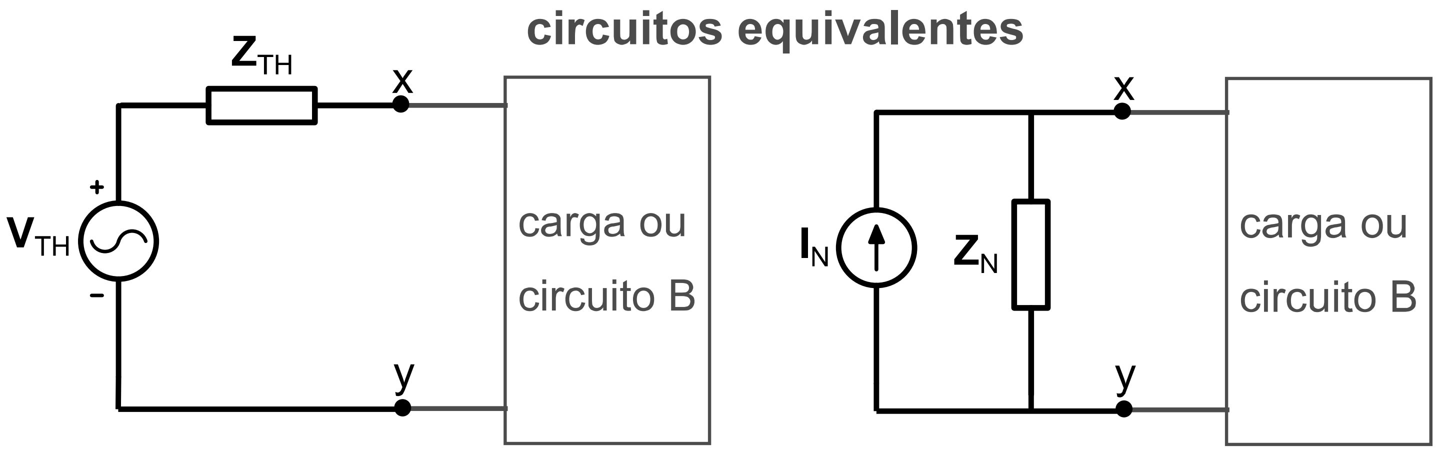




- No primeiro circuito, pode-se calcular que $V_{TH} = 31,47\underline{/29,1^\circ}$ V
- No segundo circuito, pode-se calcular que $I_N = 0,199\underline{/43,8^\circ}$ A
- No terceiro circuito, pode-se determinar a impedância equivalente $Z_{TH} = Z_N = 158\underline{/-14,7^\circ}$ Ω

Transformação de fontes

Em qualquer circuito, pode-se substituir uma **combinação em série de uma fonte de tensão e uma impedância** por uma **combinação em paralelo de uma fonte de corrente e uma impedância**, e vice-versa.



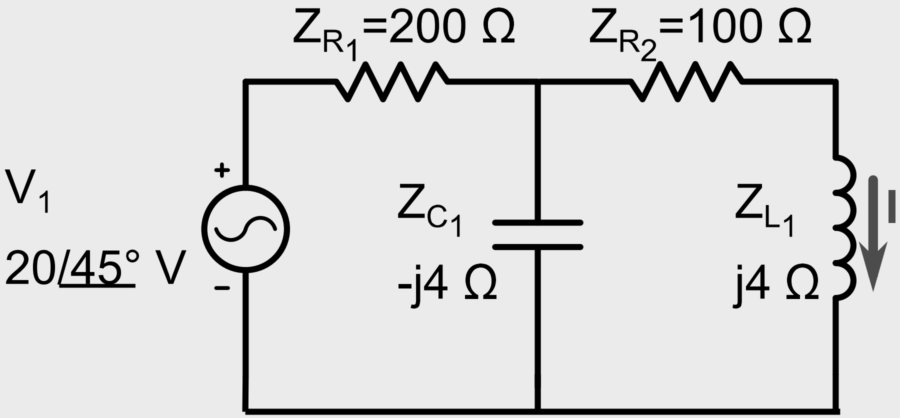
$$\mathbf{V}_{TH} = \mathbf{Z}_N \cdot \mathbf{I}_N$$

$$\mathbf{Z}_{TH} = \mathbf{Z}_N$$

Exemplo 2

Transformação de fontes

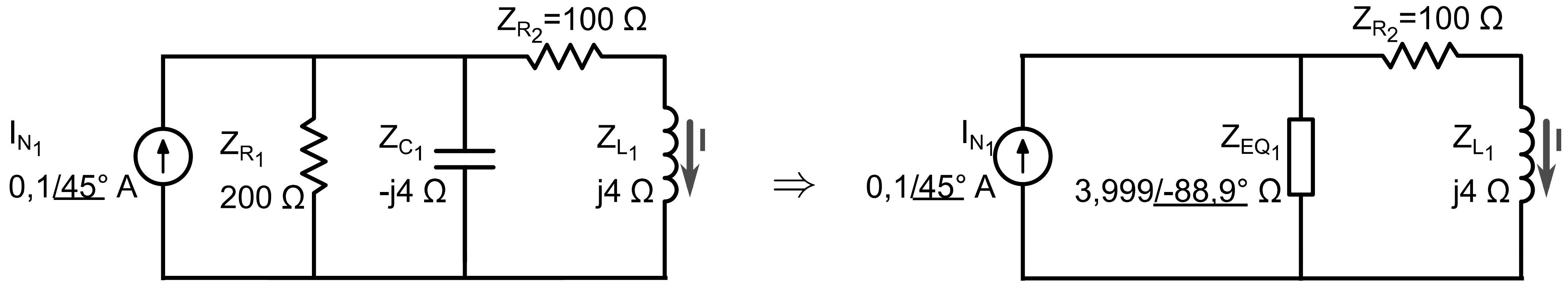
Determine a corrente fasorial **I** no circuito a seguir utilizando transformações de fontes.



Solução: A associação em série da fonte de tensão $\mathbf{V}_1$ com a impedância $\mathbf{Z}_{R_1}$ é equivalente a uma associação em paralelo de uma fonte de corrente com a mesma impedância $\mathbf{Z}_{R_1}$, sendo que a corrente da fonte é:

$$\mathbf{I}_{N_1} = \frac{\mathbf{V}_1}{\mathbf{Z}_{R_1}} = \frac{20\underline{/45^\circ}}{200} = 0,1\underline{/45^\circ}\ \text{A}$$

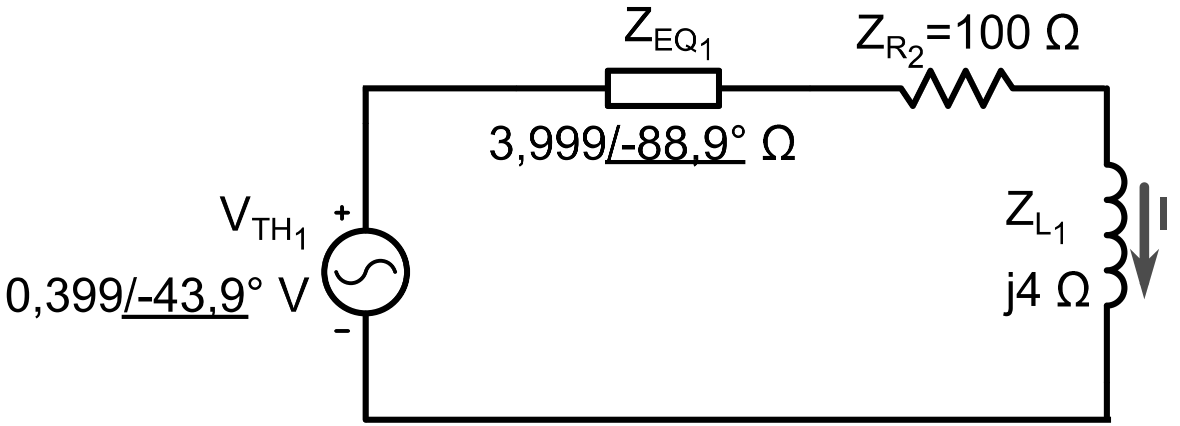
Exemplo 2 (continuação...)



Por sua vez, a associação em paralelo da fonte de corrente $\mathbf{I}_{N_1}$ com a impedância $\mathbf{Z}_{EQ_1}$ é equivalente a uma associação em série de uma fonte de corrente com a mesma impedância $\mathbf{Z}_{EQ_1}$, sendo que a tensão da fonte é:

$$\mathbf{V}_{TH_1} = \mathbf{Z}_{EQ_1} \cdot \mathbf{I}_{N_1} = 3,999\underline{/-88,9^\circ} \cdot 0,1\underline{/45^\circ} = 0,399\underline{/-43,9^\circ}\ \text{V}$$

Exemplo 2 (continuação...)



Assim, o circuito original é equivalente ao circuito em série da figura acima. A corrente **I** do circuito é:

$$\mathbf{I} = \frac{\mathbf{V}_{TH_1}}{(\mathbf{Z}_{EQ_1} + \mathbf{Z}_{R_2} + \mathbf{Z}_{L_1})} = \frac{0,399\underline{/-43,9^\circ}}{(3,999\underline{/-88,9^\circ} + 100 + j4)}$$

$$\boxed{\mathbf{I}{=}0{,}004\ \underline{/-43,9^\circ}\ \mathrm{A}}$$

Superposição

Princípio da superposição:

A saída de um circuito linear com **várias entradas** é igual à soma das saídas que seriam observadas para cada entrada individualmente.

- Circuito CA com várias fontes operando na **mesma frequência**: pode ser analisado em termos de fasores e impedâncias considerando todas as fontes simultâneamente. **A resposta do circuito é uma senoide.**
- Circuito CA com várias fontes operando em **frequências distintas**: deve-se empregar o **princípio da superposição** e determinar a resposta para cada fonte individualmente. Os resultados devem ser somados no **domínio do tempo**. **A resposta do circuito não é uma senoide!**

Superposição

Importante:

- As impedâncias dependem da frequência.
- Apenas circuitos com fontes em uma única frequência podem ser analisados em termos de fasores e impedâncias.
- Ao analisar a resposta de uma fonte individualmente, deve-se **eliminar** as demais fontes independentes do circuito.

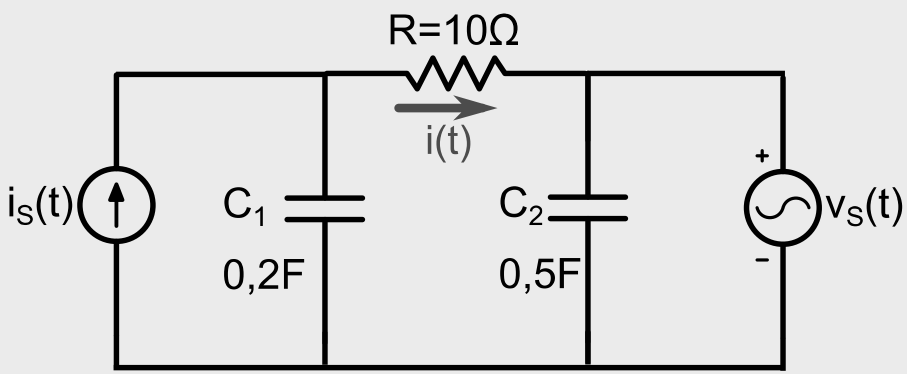
Eliminar uma fonte de tensão significa substituí-la por um **curto-circuito**.

Eliminar uma fonte de corrente significa substituí-la por um **circuito aberto**.

Exemplo 3

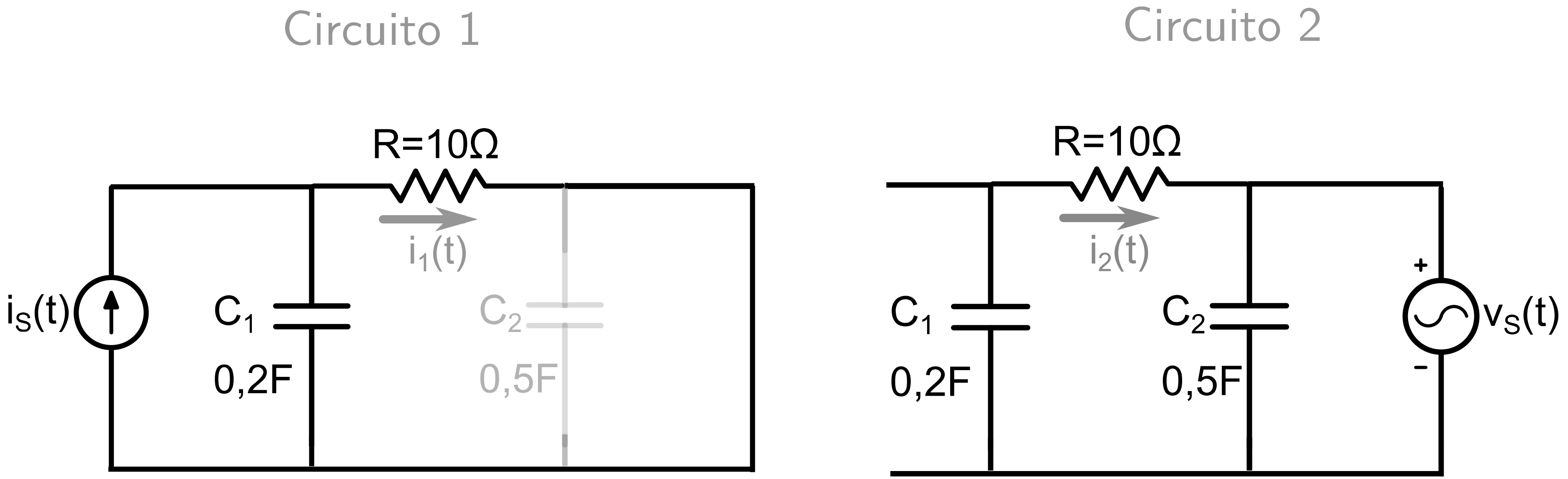
Circuito com fontes em frequências distintas

Determine a corrente $i(t)$ indicada no circuito a seguir, em que $i_S(t) = 5\cos(4t)$ A e $v_S(t) = 20\cos(5t)$ V.



Solução: O circuito possui fontes com frequências distintas: a fonte de corrente tem frequência $\omega_1 = 4$ rad/s e a fonte de tensão tem frequência $\omega_2 = 5$ rad/s.
Aplicando o princípio da superposição, o circuito original pode ser separado em dois circuitos com fontes senoidais únicas.

Exemplo 3 (continuação...)



Cada circuito pode ser analisado individualmente em termos de fasores e impedâncias, a fim de se obter $i_1(t)$ e $i_2(t)$.

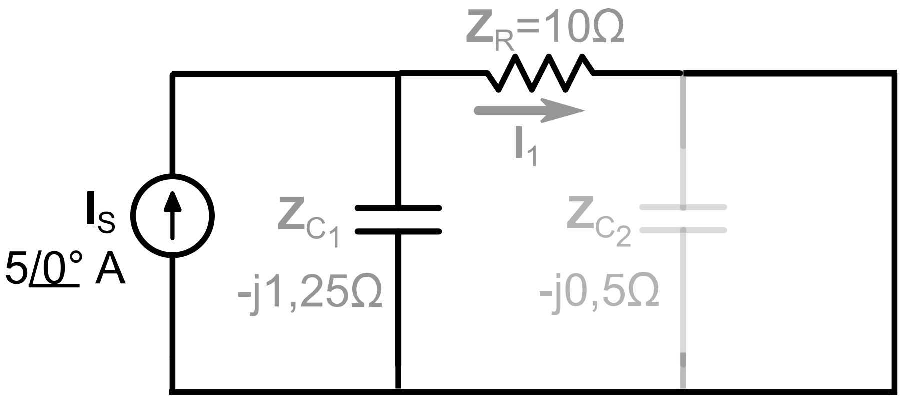
A resposta $i(t)$ será:

$$i(t) = i_1(t) + i_2(t)$$

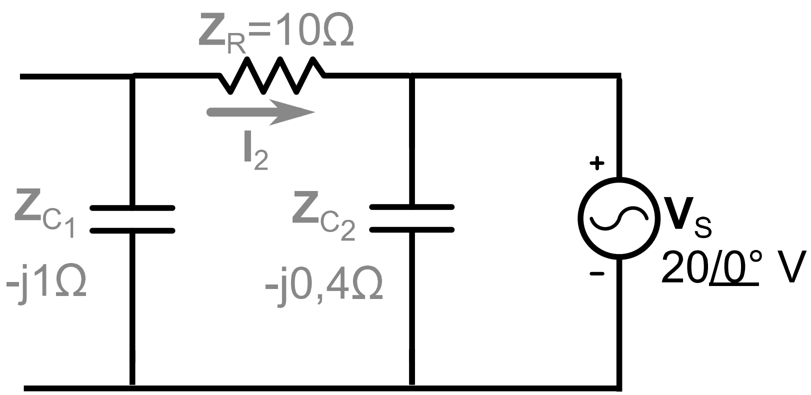
Exemplo 3 (continuação...)

Circuitos representados no domínio da frequência:

Circuito 1 ($\omega_1 = 4$ rad/s)



Circuito 2 ($\omega_2 = 5$ rad/s)



Analisado-se os circuitos individualmente, obtém-se os fasores $\mathbf{I}_1$ e $\mathbf{I}_2$.

Note que as impedâncias são distintas nos dois circuitos!

Atenção: não somar os resultados $\mathbf{I}_1$ e $\mathbf{I}_2$ no domínio da frequência!!

Atividades

Leitura Complementar

[Svoboda; Dorf, 2016]: Capítulo 10, Seções 10.7 e 10.8.

Atividade 1

Determine a resposta $i(t)$ no Exemplo 3 desta Lição.

Atividade 2

Resolva os Exercícios **18 a 23** do **Caderno de Exercícios**.

Sugestões de Exercícios Complementares

[Svoboda; Dorf, 2016]: Capítulo 10, Problemas P 10.7-6, P 10.7-8, P 10.8-8.