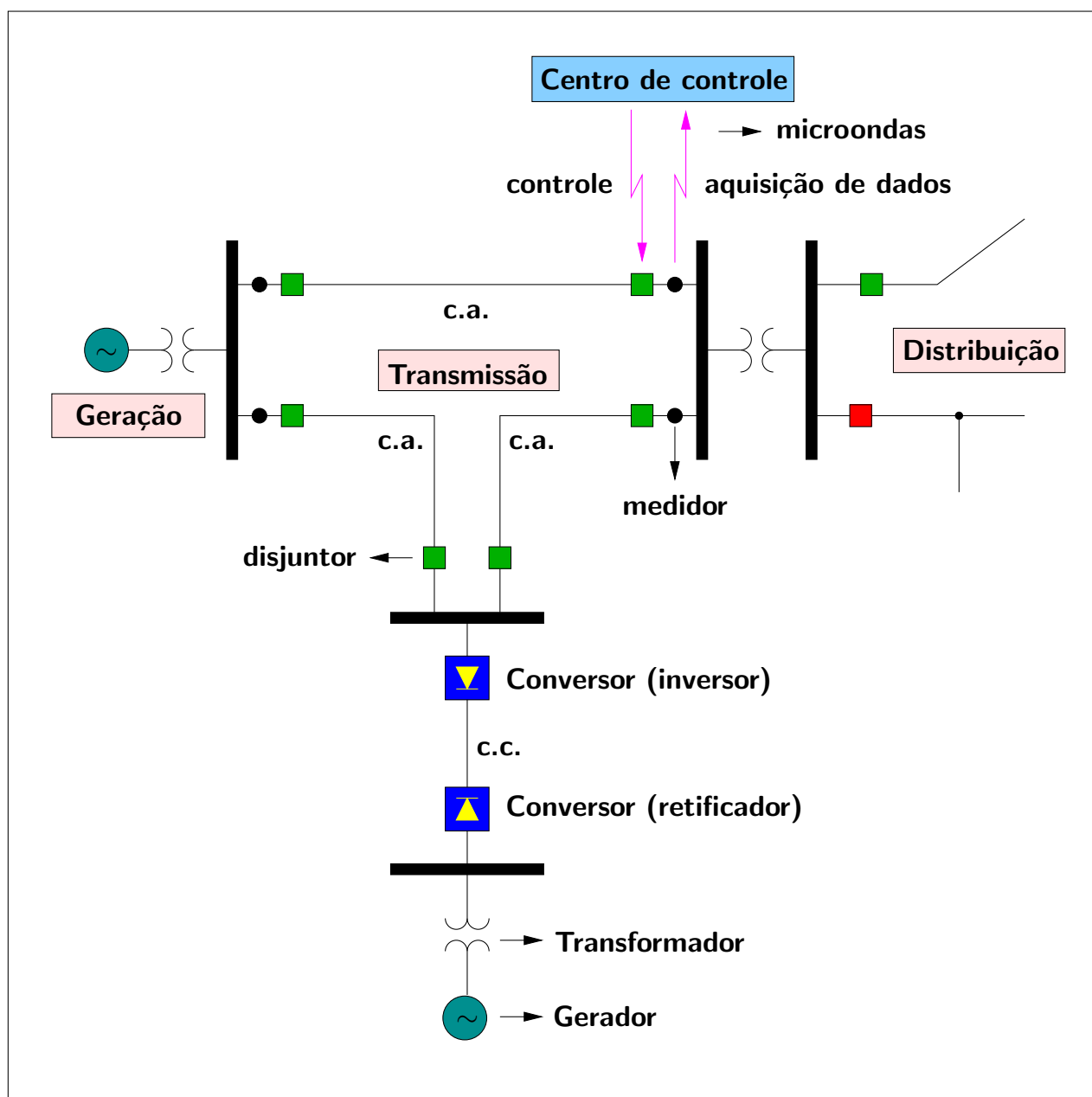


Capítulo 1

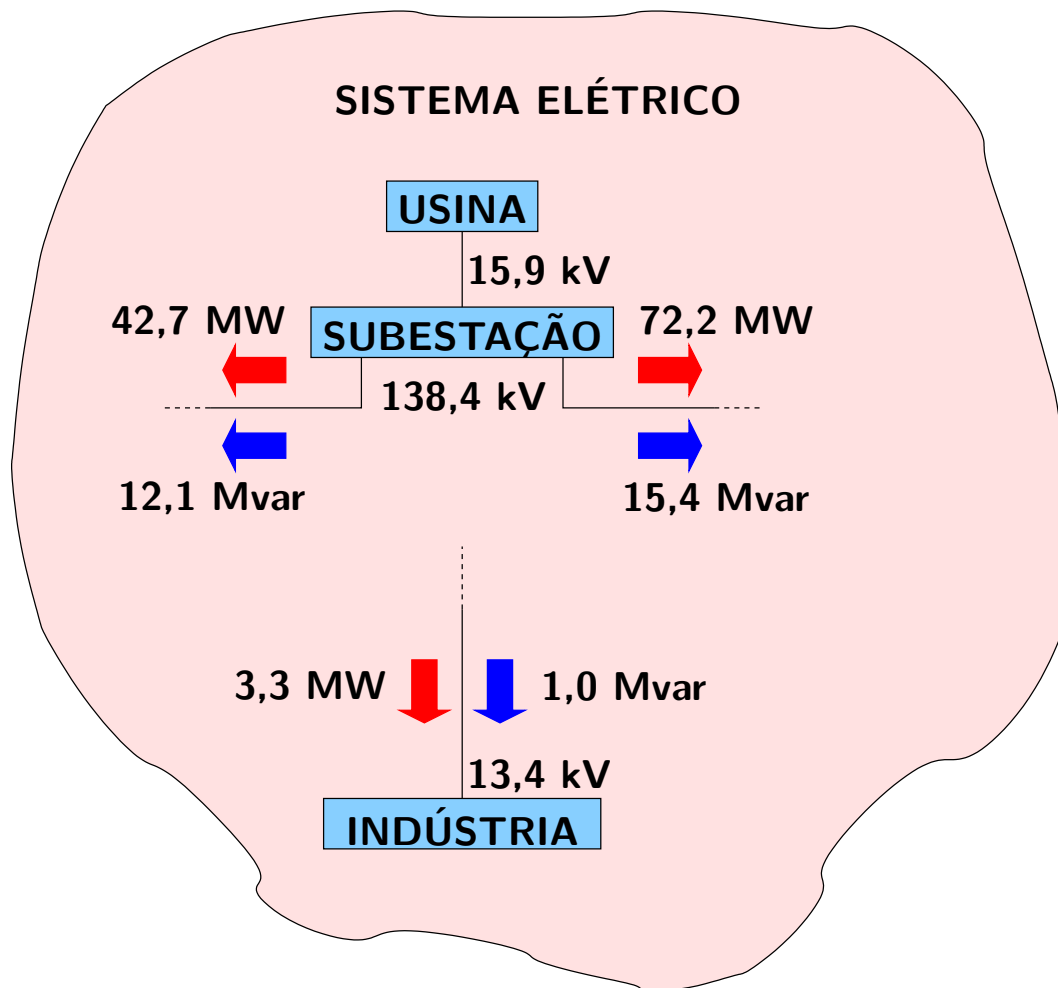
Introdução

1.1 Estrutura geral dos sistemas de potência



1.2 Definição do problema

- ▶ **FLUXO DE CARGA (FC)**: obtenção das condições de operação (tensões, fluxos de potência) de uma rede elétrica em função da sua topologia e dos níveis de demanda e geração de potência.



- ▶ **Modelagem estática** → rede representada por um conjunto de equações e inequações algébricas.

Análise estática: obtém-se o estado de operação da rede em regime permanente.

→ comportamento dinâmico não é considerado.

- ▶ **Fluxo de carga:** Modelagem dos componentes → obtenção do sistema de equações e inequações algébricas → métodos de solução → estado de operação da rede em regime permanente.

1.3 Aplicações

- ▶ FC é utilizado tanto no planejamento como na operação de redes elétricas.
- ▶ Em geral é parte de um procedimento mais complexo.
- ▶ Alguns exemplos:

- **Operação**

análise de segurança: várias **contingências** (acidentes) são simuladas e o estado de operação da rede após a contingência deve ser obtido.

Eventuais violações dos limites de operação são detectados e ações de controle corretivo e/ou preventivo são determinadas.

- **Planejamento**

planejamento da expansão: novas configurações da rede são determinadas para atender ao aumento da demanda e o estado de operação da rede para a nova configuração deve ser obtido.

- ▶ Ao longo dos anos, vários métodos de solução do FC foram propostos. Para cada aplicação existem os métodos mais apropriados. Os fatores considerados na escolha são mostrados nas tabelas a seguir.

Tipos de solução	
Precisa	Aproximada
Sem controle de limites	Com controle de limites
Off-line	On-line
Caso simples	Casos múltiplos

Propriedades dos métodos de solução do FC	
Alta velocidade	redes de grandes dimensões aplicações em tempo real casos múltiplos aplicações interativas
Pequeno espaço de armazenamento	redes de grandes dimensões
Confiabilidade	computadores com pequena memória problemas mal-condicionados análise de contingências
Versatilidade	aplicações em tempo real habilidade para incorporação de características especiais (controle de limites operacionais, representação de diversos equipamentos etc.); facilidade de ser usado como parte de processos mais complexos
Simplicidade	facilidade de manutenção e melhoramento do algoritmo e do programa

- ▶ Em geral uma aplicação requer várias características.

Exemplo: na análise de segurança pode-se necessitar de um método de solução aproximado, sem controle de limites operacionais, on-line, com solução de casos múltiplos.

1.4 História

- ▶ Network analyzer – painéis em que os equipamentos do sistema eram emulados através de conjuntos de fontes, resistores, capacitores e indutores variáveis.

Para redes reais, network analyzers eram enormes (ocupando várias salas), consumiam muita energia e modificações na rede exigiam alterações na fiação e ajustes nos valores dos componentes.

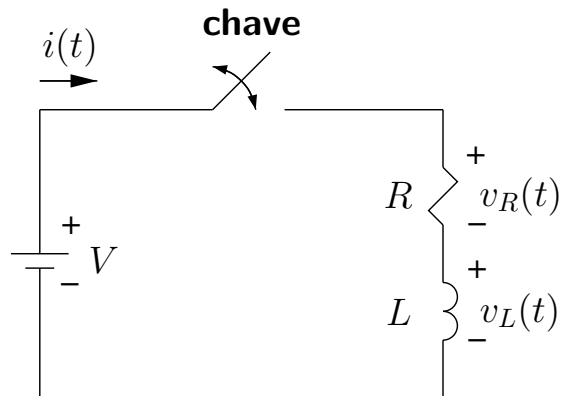
Network analyzers foram utilizados antes e também algum tempo depois da utilização de computadores digitais.

- ▶ Primeiro método prático de solução do problema do FC através de um computador digital → Ward e Hale, 1956 (método baseado na matriz Y)
- ▶ Métodos baseados na matriz Y : espaço de armazenamento pequeno (adequado aos computadores da época), convergência lenta.
- ▶ Começo da década de 60: métodos baseados na matriz Z (Gupta e Davies, 1961). Convergência mais confiável, requerem mais espaço de armazenamento, mais lentos.
- ▶ Na mesma época: método de Newton (Van Ness, 1959). Características de convergência excelentes. Computacionalmente não era competitivo.
- ▶ Meados da década de 60: técnicas de armazenamento compacto e ordenamento da fatoração (Tinney e Walker, 1967) tornaram o método de Newton muito mais rápido e exigindo pequeno espaço de memória, mantendo a característica de ótima convergência → método de Newton passou a ser considerado como o melhor método e foi adotado pela maioria das empresas de energia elétrica.
- ▶ Década de 70: métodos desacoplados (Stott e Alsac, 1974) baseados no método de Newton foram propostos → ainda mais rápidos, mantendo precisão e convergência. Somente em 1990 foi apresentado um estudo teórico aprofundado das características dos métodos desacoplados.
- ▶ Foram propostos ainda: variações dos métodos desacoplados básicos, métodos para redes mal-condicionadas, métodos para redes de distribuição (média e baixa tensões) etc.

1.5 Aspectos da análise de circuitos elétricos

■ Exemplo

Considere o circuito RL alimentado por uma fonte de **corrente contínua** mostrado a seguir.



Aplicando a lei das tensões de Kirchhoff ao circuito, tem-se:

$$\begin{aligned}v_L(t) + v_R(t) &= V \\L \cdot \frac{d}{dt}i(t) + R \cdot i(t) &= V \\ \frac{d}{dt}i(t) + \frac{R}{L} \cdot i(t) &= \frac{V}{L}\end{aligned}$$

que é uma equação diferencial ordinária de primeira ordem. Considerando condição inicial nula, ou seja, que no momento em que a chave é fechada ($t = 0$) tem-se $i(0) = 0$, a solução da equação acima é:

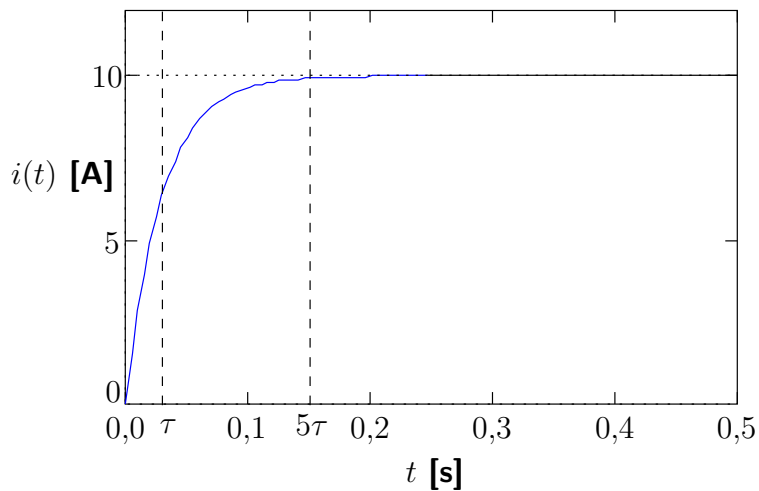
$$i(t) = \frac{V}{R} \cdot \left(1 - e^{-\frac{R}{L} \cdot t}\right)$$

A tensão sobre o indutor é dada por:

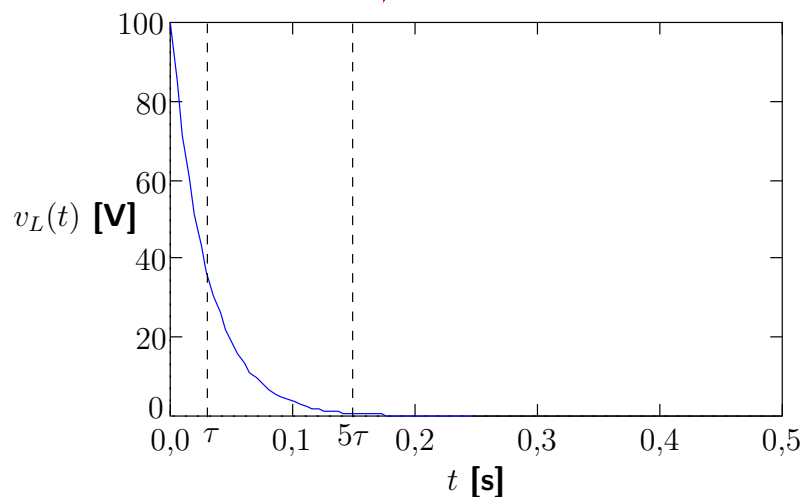
$$v_L(t) = V \cdot e^{-\frac{R}{L} \cdot t}$$

Gráficos de $i(t)$ e $v_L(t)$ para $R = 10 \Omega$, $L = 300 \text{ mH}$ e $V = 100 \text{ V}$:

➔ regime permanente



➔ regime permanente



Imediatamente após o fechamento da chave, ou seja, para $t = 0^+$, os valores de tensão no indutor e de corrente pelo circuito são:

$$v_L(0^+) = V \qquad i(0^+) = 0$$

indicando que neste instante o indutor se comporta como um circuito aberto. A tensão no indutor e corrente pelo circuito na condição de regime permanente podem ser obtidos calculando-se os limites dos mesmos quando o tempo tende a infinito:

$$v_L(t \rightarrow \infty) = 0 \qquad i(t \rightarrow \infty) = \frac{V}{R}$$

e conclui-se que em regime permanente o indutor se comporta como um curto-circuito.

Do ponto de vista da análise de regime permanente, a corrente pelo circuito é limitada somente pelo resistor e, neste exemplo, é igual a:

$$i(t \rightarrow \infty) = \frac{V}{R} = 10 \text{ A}$$

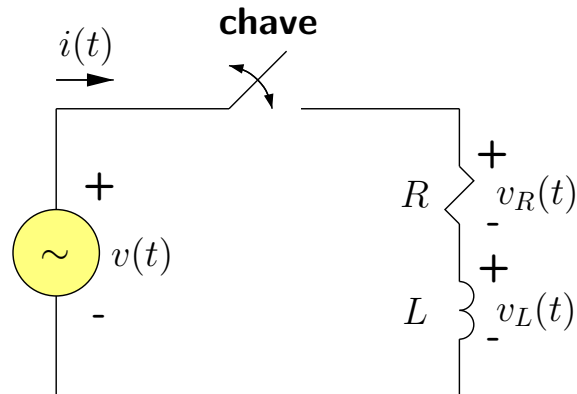
Para fins práticos, diz-se que para $t \geq 5\tau$ (em que τ é a **constante de tempo** do circuito) o circuito estará operando em regime permanente. No caso do circuito do exemplo:

$$t \geq 5\tau = 5 \cdot \frac{L}{R} = 0,15 \text{ s}$$



■ Exemplo

Considere o circuito RL alimentado por uma fonte de corrente alternada mostrado a seguir.



A tensão aplicada à carga agora é:

$$v(t) = V_p \cdot \text{sen}(\omega t + \theta)$$

em que V_p é o valor de pico, $\omega = 2\pi f$ é a frequência angular (f é a frequência) e θ é o ângulo de fase da tensão.

Aplicando a lei das tensões de Kirchhoff ao circuito, tem-se:

$$\frac{d}{dt}i(t) + \frac{R}{L} \cdot i(t) = \frac{v(t)}{L}$$

A solução da equação acima para $i(0) = 0$ é:

$$i(t) = \underbrace{-\frac{V_p}{Z} \cdot \text{sen}(\theta - \phi) \cdot e^{-\frac{R}{L}t}}_{i_t(t)} + \underbrace{\frac{V_p}{Z} \cdot \text{sen}(\omega t + \theta - \phi)}_{i_r(t)}$$

em que:

$$Z = \sqrt{R^2 + (\omega L)^2} \qquad \phi = \tan^{-1}\left(\frac{\omega L}{R}\right)$$

O termo:

$$i_t(t) = -\frac{V_p}{Z} \cdot \text{sen}(\theta - \phi) \cdot e^{-\frac{R}{L}t}$$

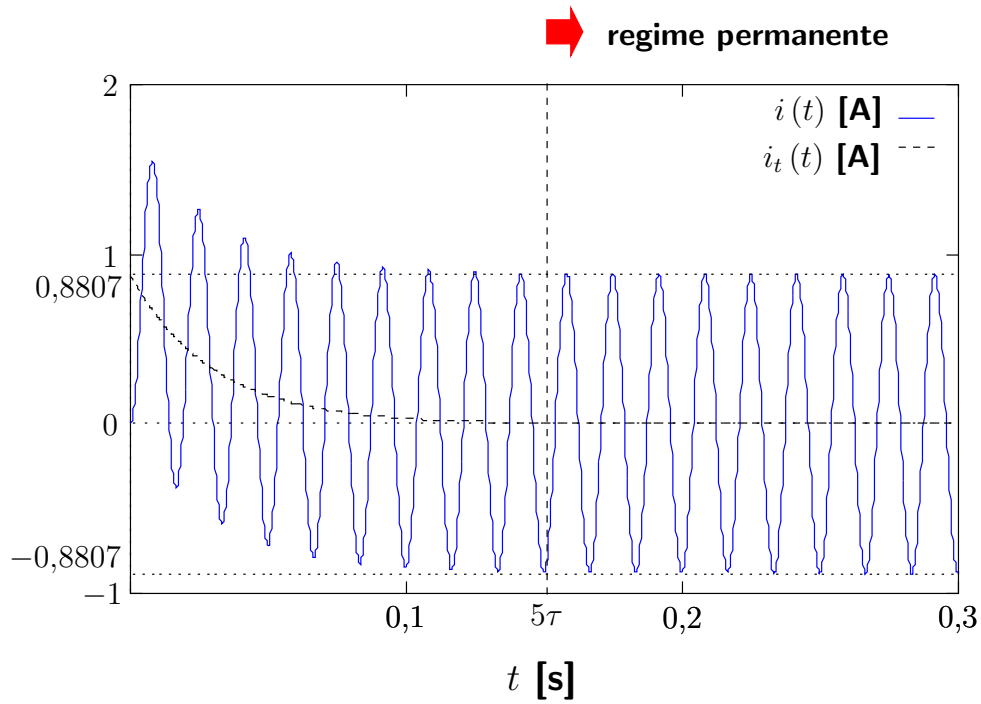
corresponde à parcela transitória e tende a zero como o passar do tempo. O termo:

$$i_r(t) = \frac{V_p}{Z} \cdot \text{sen}(\omega t + \theta - \phi)$$

corresponde à parcela de regime permanente. Matematicamente:

$$\begin{cases} \lim_{t \rightarrow \infty} i_t(t) = 0 \\ \lim_{t \rightarrow \infty} i(t) = i_r(t) \end{cases}$$

Gráficos de $i(t)$ e $i_t(t)$ para $R = 10 \Omega$, $L = 300 \text{ mH}$, $V_p = 100 \text{ V}$ e $f = 60 \text{ Hz}$:



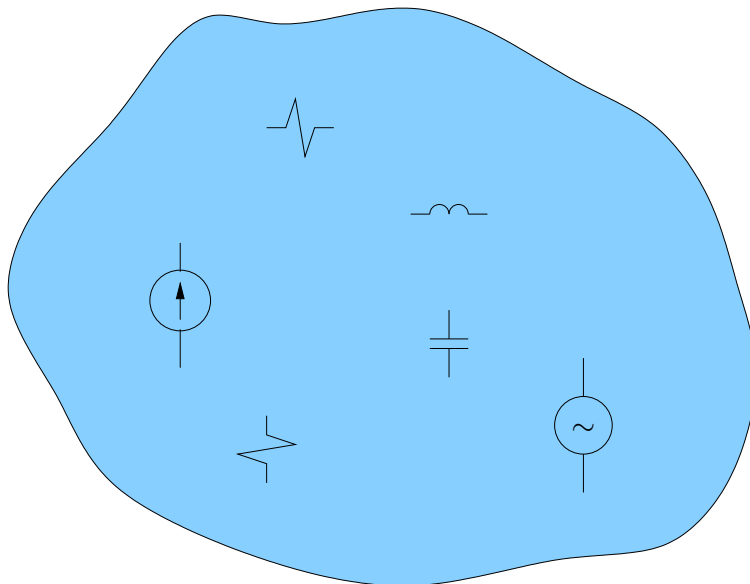
Considera-se que para $t \geq 5\tau = 0,15 \text{ s}$ a corrente $i(t)$ atinge seu valor de regime permanente, e a parcela transitória $i_t(t)$ vale praticamente zero.

O valor de pico da corrente de regime é:

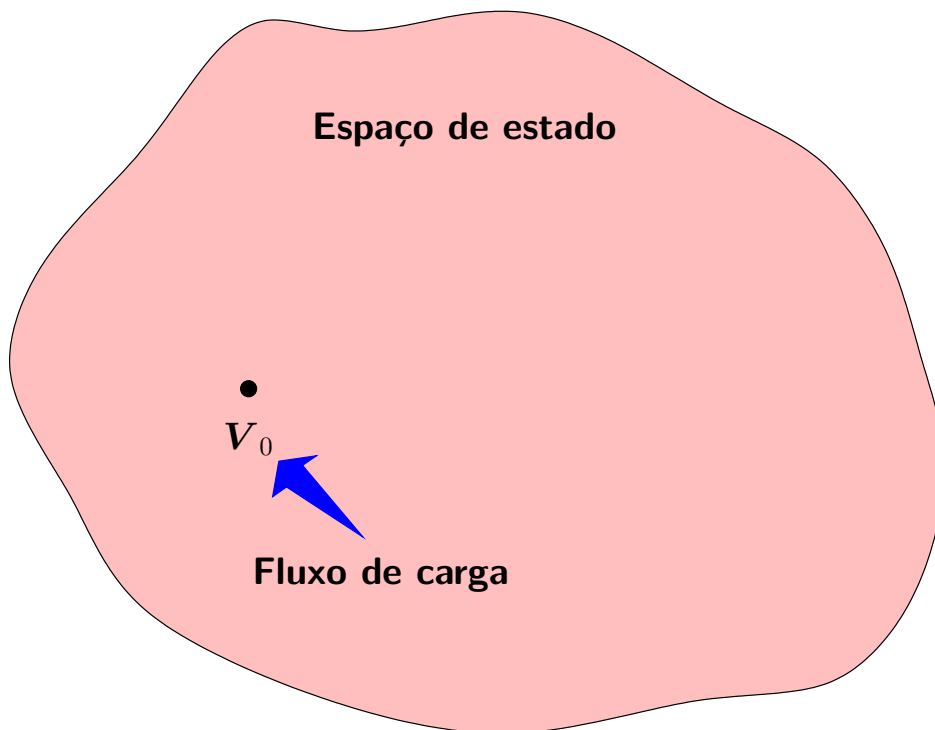
$$I_p = \frac{V_p}{Z} = \frac{V_p}{\sqrt{R^2 + (\omega L)^2}} = 0,8807 \text{ A}$$



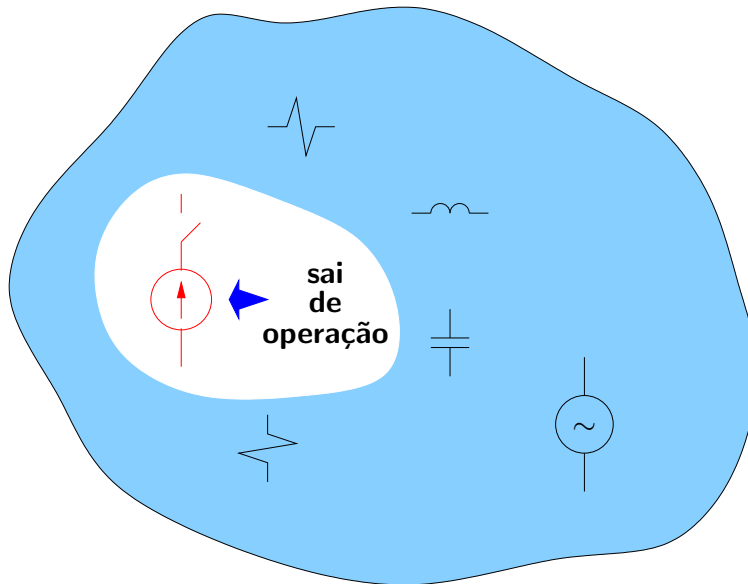
Considerar o circuito genérico mostrado a seguir.



O estado de operação do circuito em regime permanente pode ser representado pelo espaço de estado (tensões nodais):



Circuito sofre uma alteração:



Há uma alteração no estado de operação do circuito em regime permanente:

