



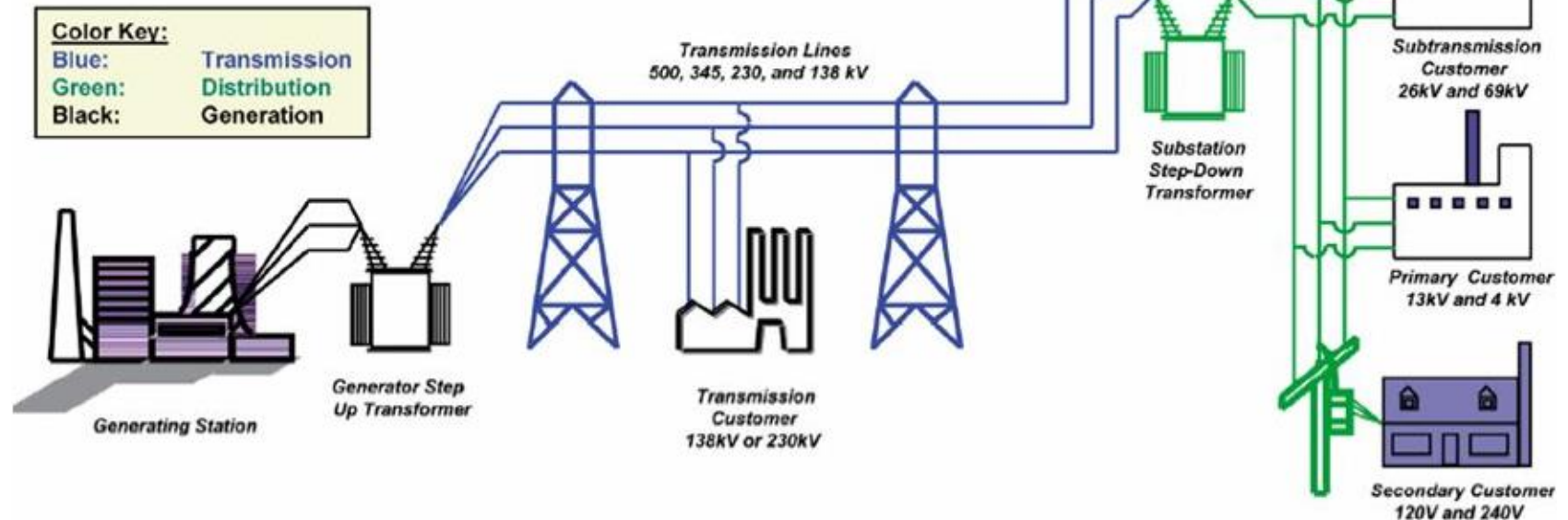
TE 339 – Sistemas Elétricos de Potência I

Representação dos Sistemas Elétricos de Potência;

Prof. Mateus Duarte
Teixeira

Sistemas Eléctricos de Potência (SEP)

Basic Structure of the Electric System



Principais Elementos de um SEP

- **Geradores**
 - Fontes
- **Transformadores**
 - Elevadores e Abaixadores
 - Subestações
- **Linhas de Transmissão**
 - CA
 - CC (elo CC)

Principais Elementos de um SEP

- **Alimentadores de Distribuição**
- **Cargas**
 - Consumidores Industriais,
 - Comerciais,
 - Residenciais.

A representação da rede é feita por:

- **Nós:**

- Barras, Barramentos, Postes, etc.

- **Fonte(s):**

- Gerador, Fontes de Tensão, Fontes de Corrente, etc.

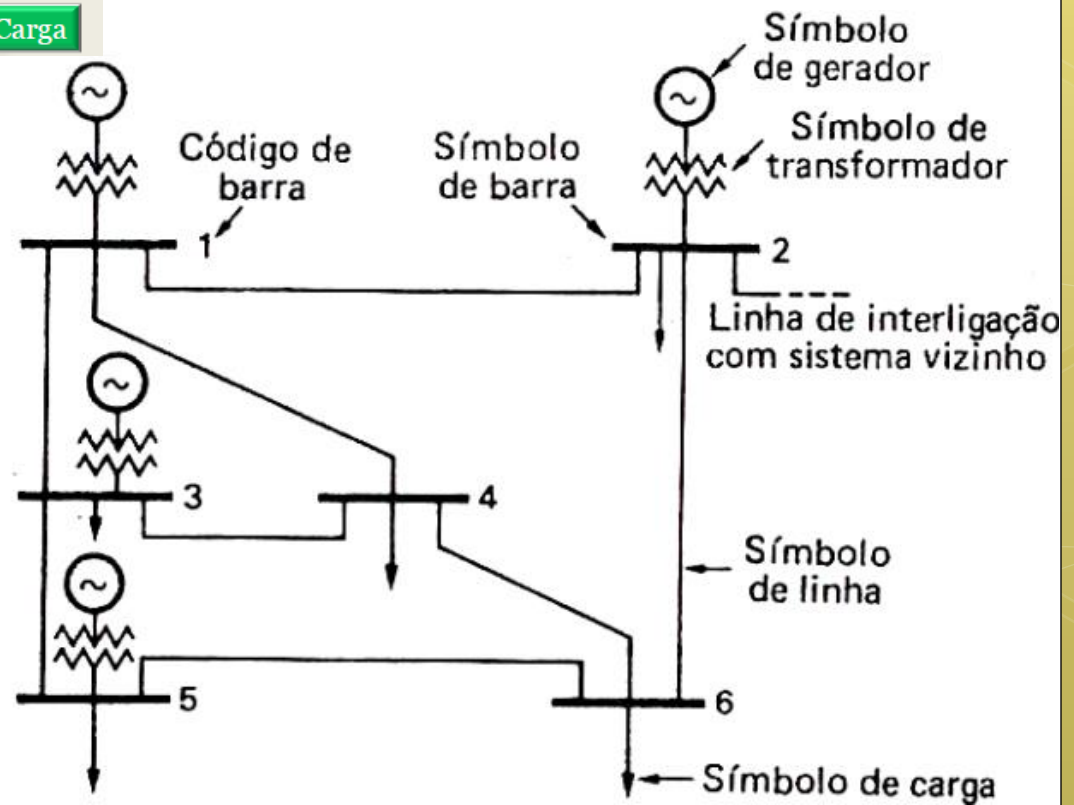
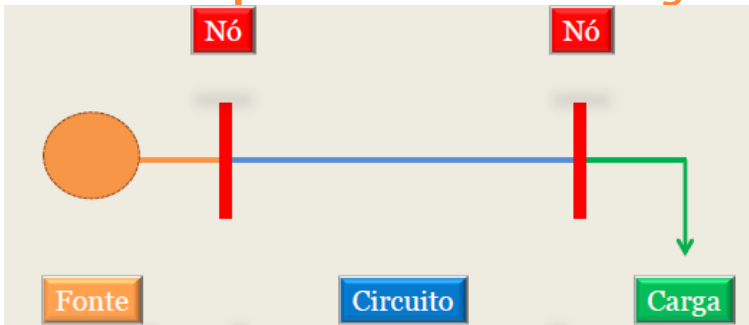
- **Circuitos:**

- Linha (Transmissão ou Distribuição), Alimentadores, Transformadores, etc.

- **Carga(s):**

- potência constante consumida, impedância constante , etc.

A representação da rede elétrica



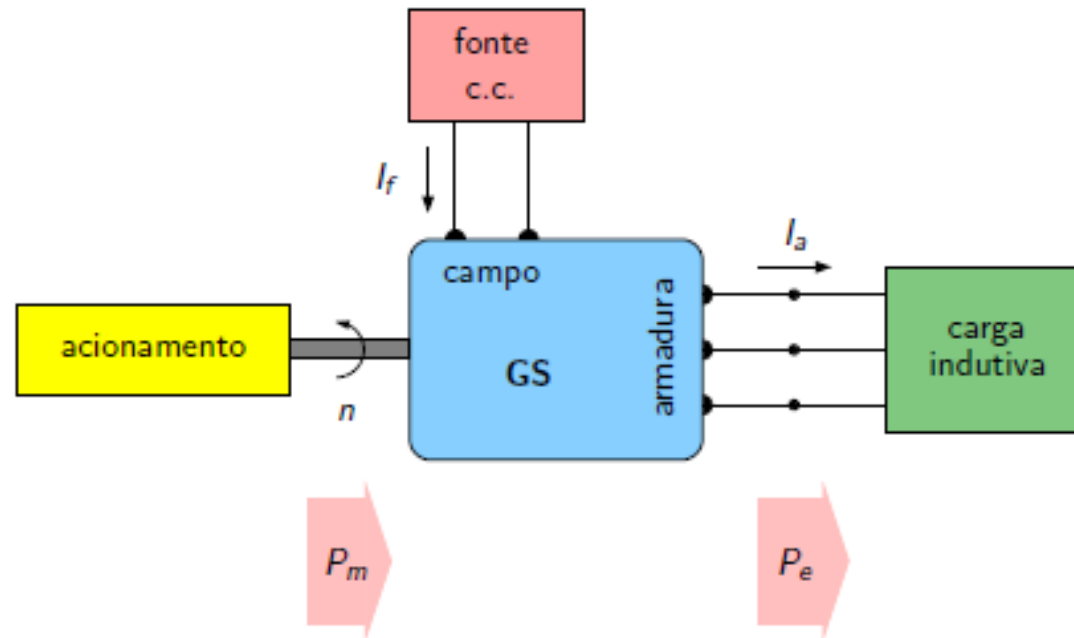
Representação de Geradores em SEP

- **Valores Especificados:**

- Módulo,
- Fase (ângulo),
- Potência Ativa Gerada,
- Potência Reativa Gerada ou Consumida.
- Frequência.

Representação de Geradores em SEP

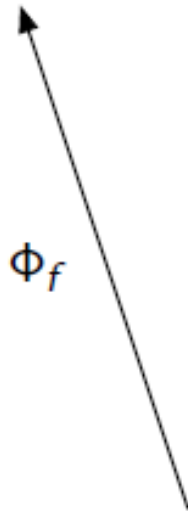
- Considere que um gerador alimenta diretamente uma carga indutiva → corrente atrasada em relação à tensão aplicada (tensão terminal do gerador).



- A sequência de raciocínio é a seguinte . . .

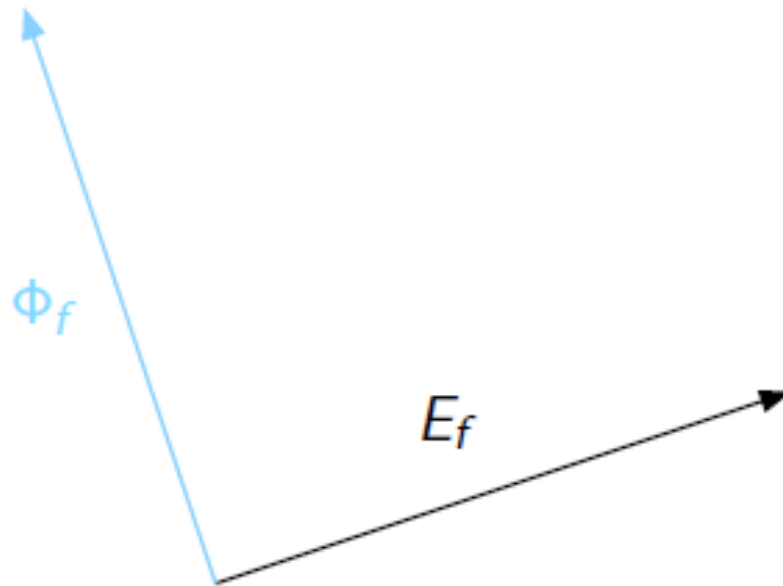
Representação de Geradores em SEP

- A corrente de campo produz um campo ϕ_f



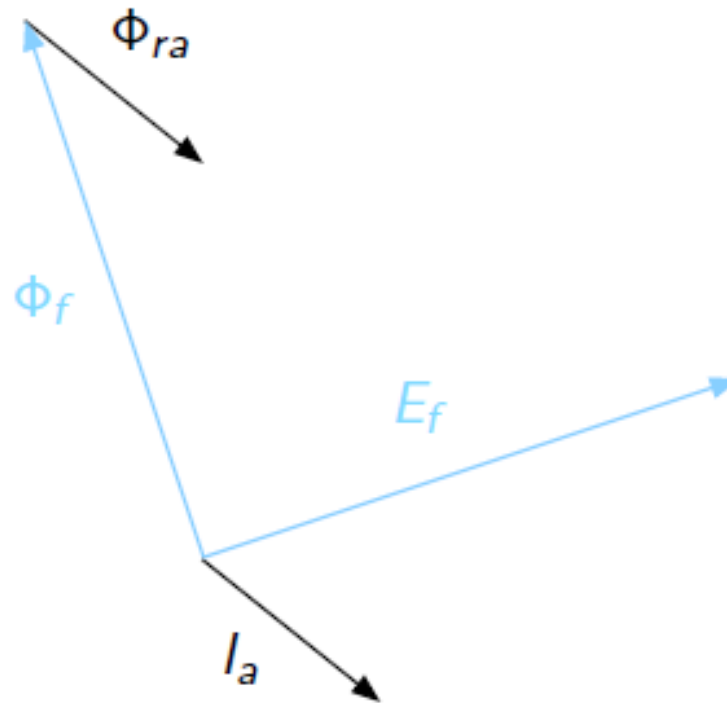
Representação de Geradores em SEP

- Φ_f induz uma tensão E_f (atrasada de 90°)



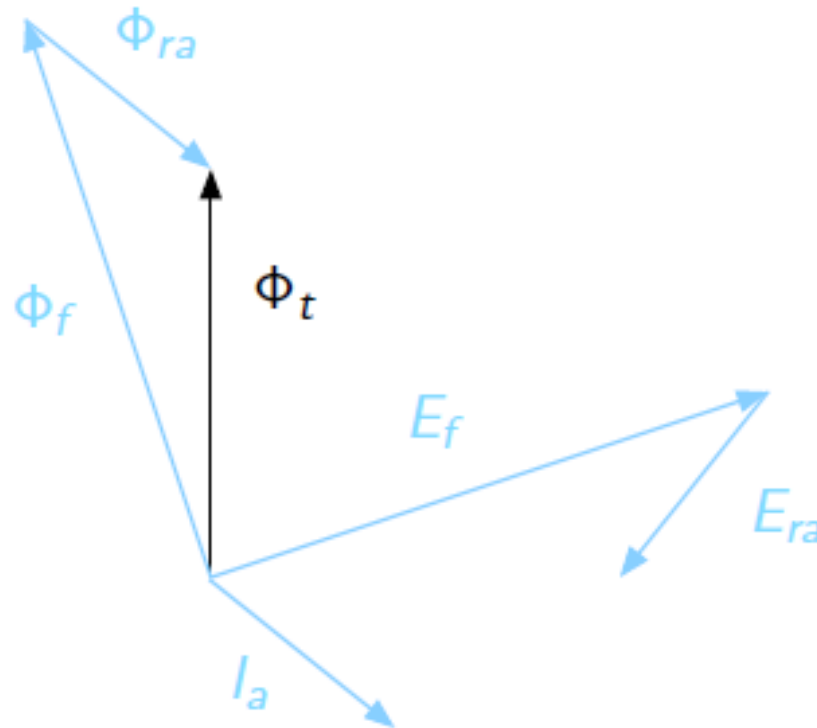
Representação de Geradores em SEP

- A corrente de carga I_a produz um campo de reação de armadura ϕ_{ra} (em fase)



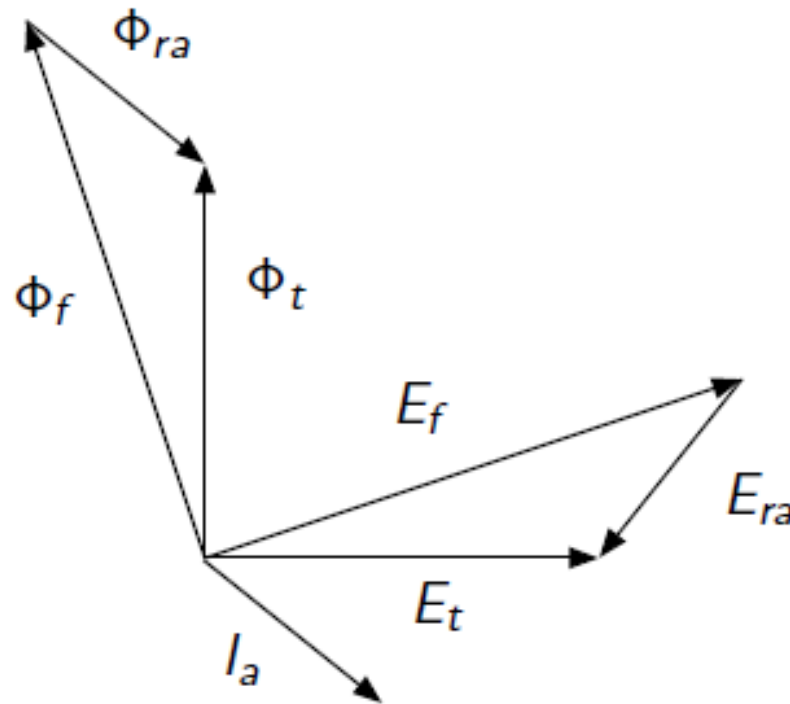
Representação de Geradores em SEP

- A soma de ϕ_f e ϕ_{ra} resulta no campo total de entreferro ϕ_t



Representação de Geradores em SEP

- A soma de E_f e E_{ra} resulta na tensão terminal do gerador E_t



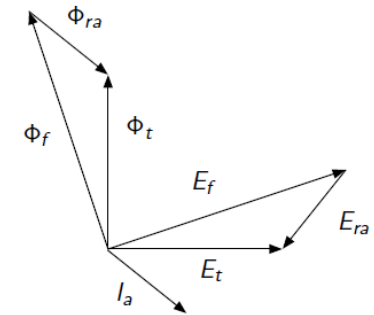
Representação de Geradores em SEP

- As principais causas de perdas são:
 - Perdas ôhmicas nos enrolamento → modeladas como uma resistência r_a → resistência de armadura
 - Dispersão de fluxo de armadura → modelada como uma reatância indutiva x_l → reatância de dispersão da armadura
 - (*) l → leakage

Representação de Geradores em SEP

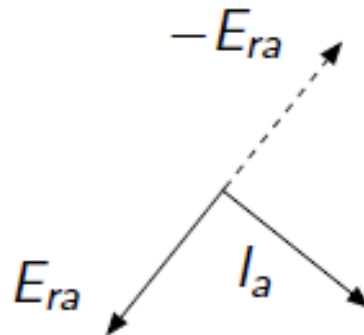
- Em termos das tensões pode-se escrever:

$$E_t = E_f + E_{ra}$$



- Verifica-se que:

- A corrente de armadura I_a está em fase com o fluxo ϕ_{ra} , logo, está adiantada de 90° em relação à tensão E_{ra}
- Ou, I_a está atrasada de 90° em relação $-E_{ra}$:



Representação de Geradores em SEP

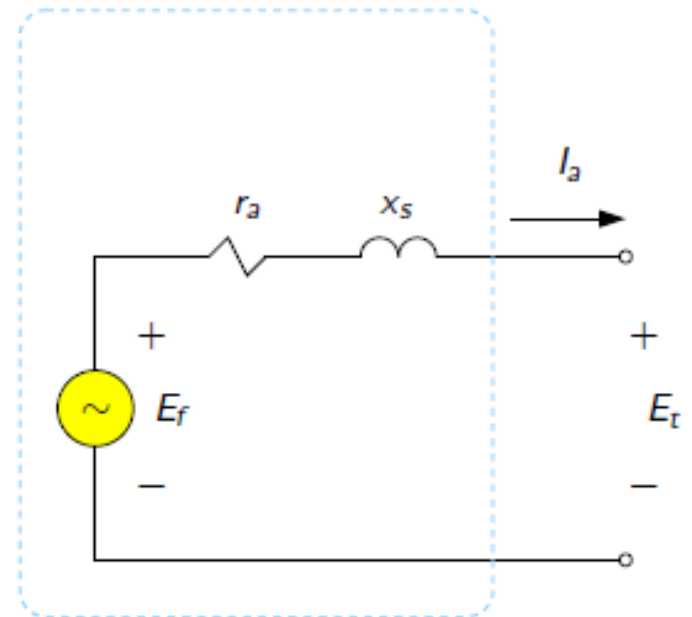
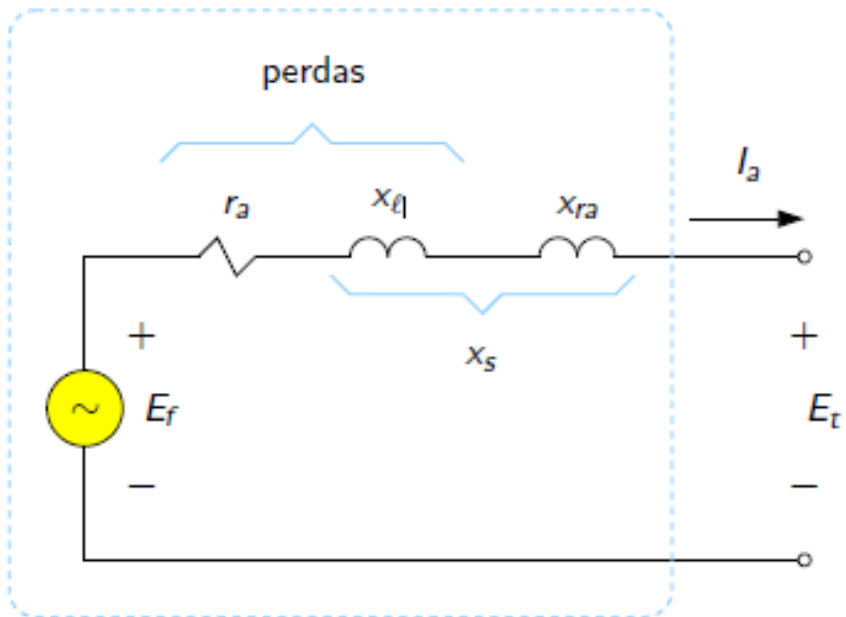
- É como se a tensão $-E_{ra}$ fosse aplicada sobre uma reatância e I_a fosse a corrente por essa reatância
- Efeito da reação de armadura modelada como uma reatância de reação de armadura ou reatância magnetizante
- Assim:

$$\begin{aligned} E_t &= E_f - (-E_{ra}) \\ &= E_f - j X_{ra} I_a \end{aligned}$$

- Semelhança com a expressão obtida para uma fonte de tensão real composta por uma fonte de tensão ideal e uma impedância interna.

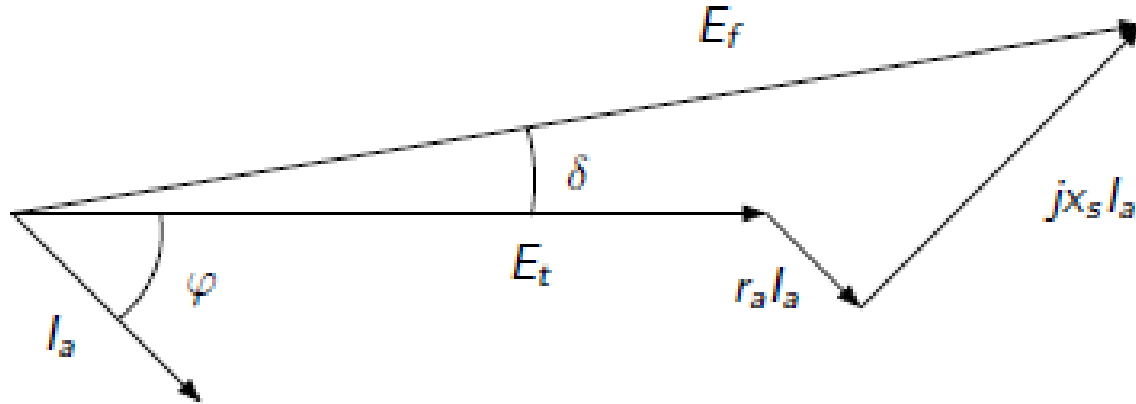
Representação de Geradores em SEP

- Incluindo os efeitos das perdas tem-se o circuito equivalente da máquina síncrona de polos lisos:



Representação de Geradores em SEP

- O diagrama fasorial e a equação básica são:



$$E_t = E_f - (r_a + jX_s) \cdot I_a$$

$$V_t = V_f \angle \delta - (r_a + jX_s) \cdot I_a \angle -\varphi$$

Representação de Geradores em SEP

- Este é o chamado modelo clássico e é adequado para análises de regime permanente senoidal
- Existem modelos mais elaborados para aplicações específicas
- Na prática, as impedâncias, dadas % ou em pu, são encontradas nos dados de placa. Valores em pu típicos podem também encontrados em tabelas. Seus valores estão nas bases determinadas por suas características nominais, isto é, V_{Nominal} e S_{Nominal} .

Representação de Geradores em SEP

○ Exercício

Um turbogerador trifásico apresenta os seguintes parâmetros:

- reatância síncrona $x_s = 1,0 \text{ pu}$
- reatância de dispersão $x_d = 0,1 \text{ pu}$
- resistência de armadura $r_a = \text{desprezada}$

e opera sob as seguintes condições:

- tensão terminal de fase $E_t = 1,0 \angle 0 \text{ pu}$
- corrente de armadura $I_a = 1,0 \angle (-30^\circ) \text{ pu}$

Obtenha a queda de tensão devido à reação da armadura, as potências ativa e reativa fornecidas pelo gerador.

Representação de Linhas de Transmissão em SEP

- Parâmetros Concentrados.
- Modelo Simplificado:
 - Ramo RL em série
- Modelo PI:
 - Ramo RL em série
 - Ramos Bsh (capacitivo) em derivação (shunt)
- Modelo PI equivalente:
 - Elementos RLC com correção hiperbólica em função do comprimento da linha.
 - Usado em LT devido as dimensões elevadas.

Representação de Linhas de Transmissão em SEP

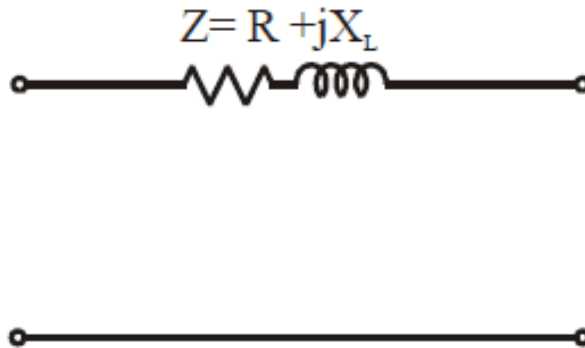
- Os parâmetros das linhas de transmissão são em geral:
 - parâmetros em série: indutância e resistência;
 - em shunt (paralelo ou derivação): condutância e capacitância.
- Como as linhas aéreas trifásicas são suficientemente equilibradas nos sistemas de energia, podem ser representadas por circuitos unipolares, constituídos de fase e neutro $\rightarrow I_N = 0$.
- Em linhas aéreas a condutância pode ser desprezada, restando na parte shunt apenas o efeito capacitivo.

Representação de Linhas de Transmissão em SEP

- As linhas de transmissão podem ser classificadas em linha curta, média e longa. Em (STEVENSON, 1986) a classificação é feita como:
 - a) linha curta: comprimentos até 80 km;
 - b) linha média: 80 a 240 km;
 - c) linha longa: mais de 240 km.
- Cada tipo de linha está associado a um modelo de circuito a parâmetros concentrados, ou seja, tem-se um modelo para linha curta, outro para linha média e outro para linha longa.
- Estes modelos atendem aos propósitos de estudos como, por exemplo, fluxo de carga, curto-circuito e estabilidade

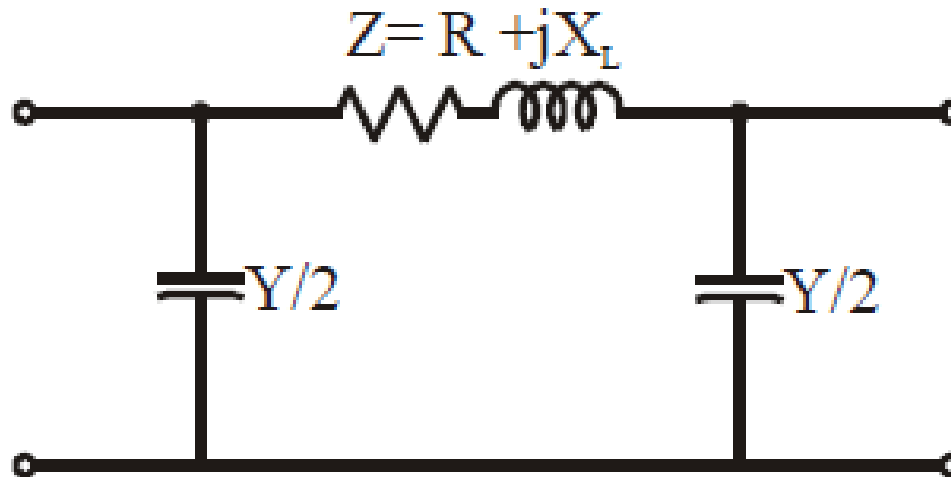
Representação de Linhas de Transmissão em SEP

- Modelo para linha curta:
 - A capacitância shunt para terra (também conhecida como line charging) das linhas curtas muito é pequena, e normalmente pode ser desprezada sem perda apreciável de precisão. Assim, considera-se como parâmetros concentrados a resistência em série R e a indutância em série L para todo o comprimento da linha, conforme ilustra a fig. na qual $X_L = \omega L$.



Representação de Linhas de Transmissão em SEP

- Modelo para linha média:
 - Uma linha aérea média pode ser representada por uma impedância composta por parâmetros concentrados R e L série e, por uma admitância em derivação que contempla o efeito capacitivo C. Um modelo muito utilizado é o modelo π -nominal, no qual a admitância total é dividida em duas partes iguais, colocadas nas extremidades.



Representação de Linhas de Transmissão em SEP

- Sendo a admitância total: $Y = j/X_c$, em siemens, então em cada extremo:

$$Y/2 = j/(2X_c)$$

Onde X_c é a reatância capacitiva total da linha (em ohms).

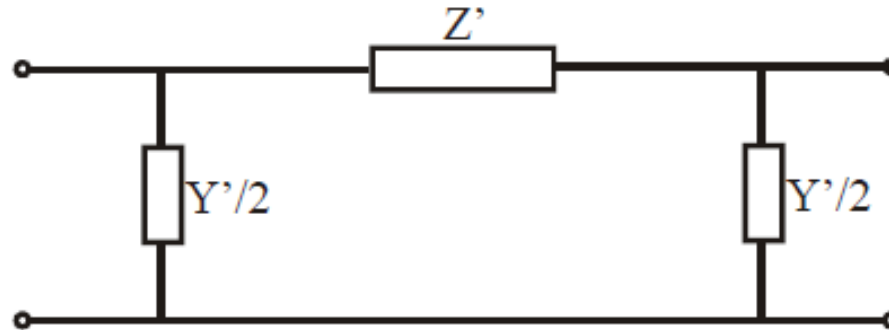
- Caso queira expressar usando a impedância (ohms) tem-se a impedância total da linha: $Z_{cTotal} = -jX_c$. Então, em cada extremo:

$$Z_c = -2jX_c$$

Representação de Linhas de Transmissão em SEP

- Modelo para linha longa:
 - Neste caso o circuito equivalente representa a linha com precisão desde que se esteja em interesse apenas as medidas dos valores de tensões, correntes, potências nas extremidades da linha. A maioria dos programas de computador adotam o modelo π para estudos de fluxo de potência, curto-circuito e estabilidade, mesmo para linhas longas. Nestas ocasiões, para manter-se a precisão, adota-se o circuito π -equivalente, o qual possui também uma impedância em série agora simbolizada por Z' e duas admitâncias em derivação $Y'/2$ em cada extremidade, como mostra a figura.

Representação de Linhas de Transmissão em SEP



- Este modelo é adequado para a representação das linhas longas em regime permanente, sendo:

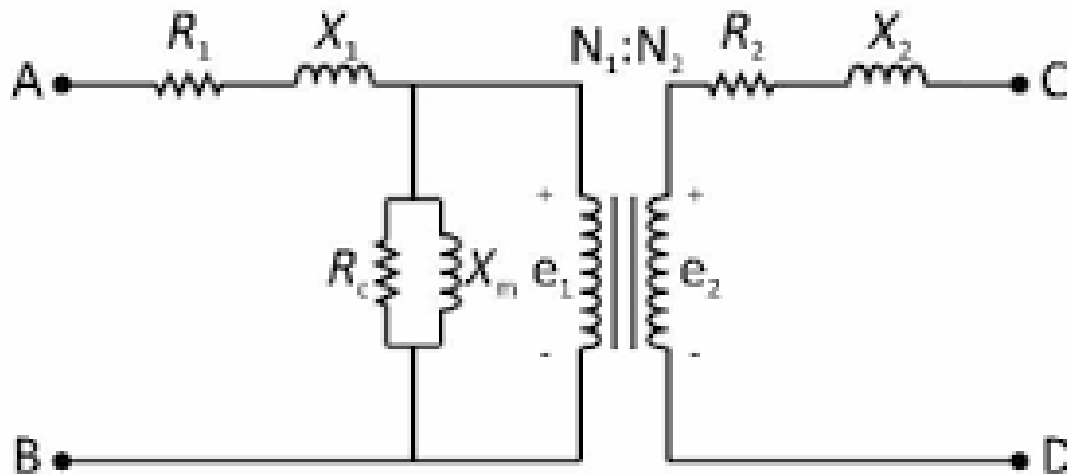
$$Z' = Z \frac{\sinh(\gamma \cdot l)}{\gamma \cdot l}$$

$$\frac{Y'}{2} = \frac{Y}{2} \frac{\tanh(\gamma \cdot l / 2)}{\gamma \cdot l / 2}$$

- onde: $\gamma \cdot l = \sqrt{zy} \cdot l = \sqrt{ZY}$; Z e Y são a impedância e admitância totais da linha, respectivamente.

Representação de Transformadores em SEP

- Um modelo tradicionalmente usado para representar transformadores do ponto de vista elétrico, é o circuito equivalente composto por elementos em série e um ramo em paralelo. Os valores dos parâmetros desse circuito são usualmente obtidos através dos ensaios a vazio e em curto-circuito.



Representação de Transformadores em SEP

- **O ensaio a vazio** determina a corrente de excitação e permite a avaliação aproximada da impedância do ramo paralelo, que engloba as potências de perda no núcleo (associadas ao elemento R_p) e de magnetização (associadas à reatância de magnetização X_m).
- **O ensaio em curto-circuito** permite determinar a impedância série do circuito, que representa as perdas no cobre através das resistências dos dois enrolamentos R_1 e R_2 , e as dispersões de fluxo magnético através das reatâncias de dispersão X_1 e X_2 .

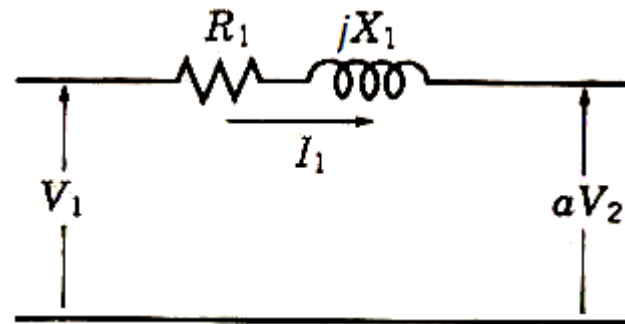
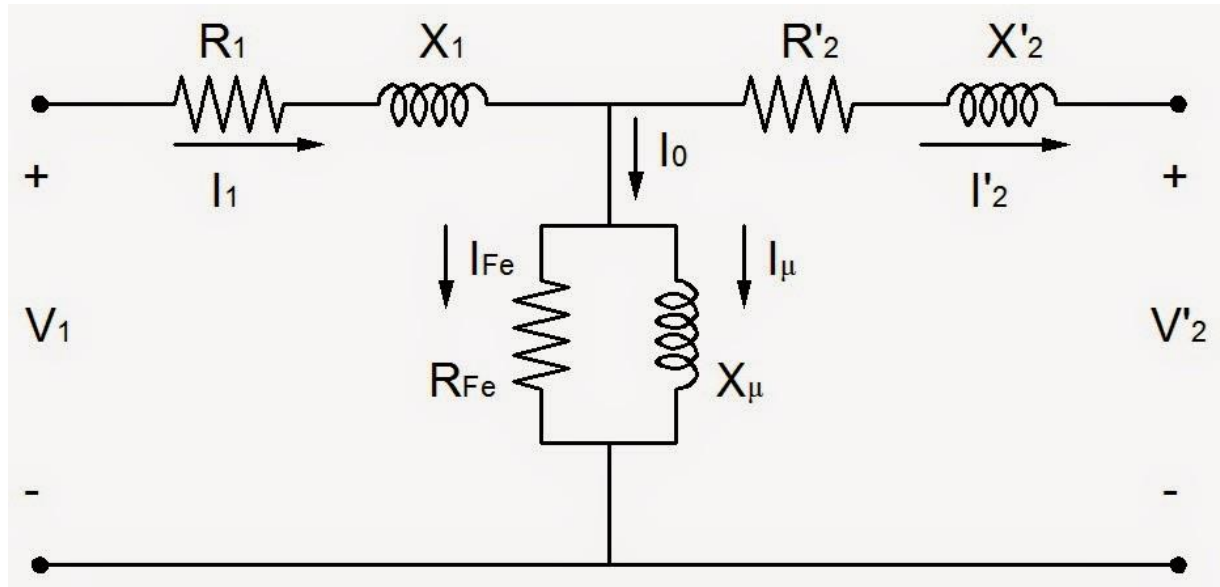
Representação de Transformadores em SEP

- Referindo os parâmetros ôhmicos ao lado 1, através da relação de espiras ao quadrado (ou relação das tensões nominais ao quadrado), pode-se omitir o transformador ideal. Além disso, é comum na maioria dos cálculos em Sistemas de Potência desprezar a corrente de excitação (influência do núcleo), por ser muito menor que correntes de carga usuais. Fazendo isso e equacionando as grandezas referidas ao lado 1, obtém-se:

$$R_{eq} = R_1 + a^2 R_2$$

$$X_{eq} = X_1 + a^2 X_2$$

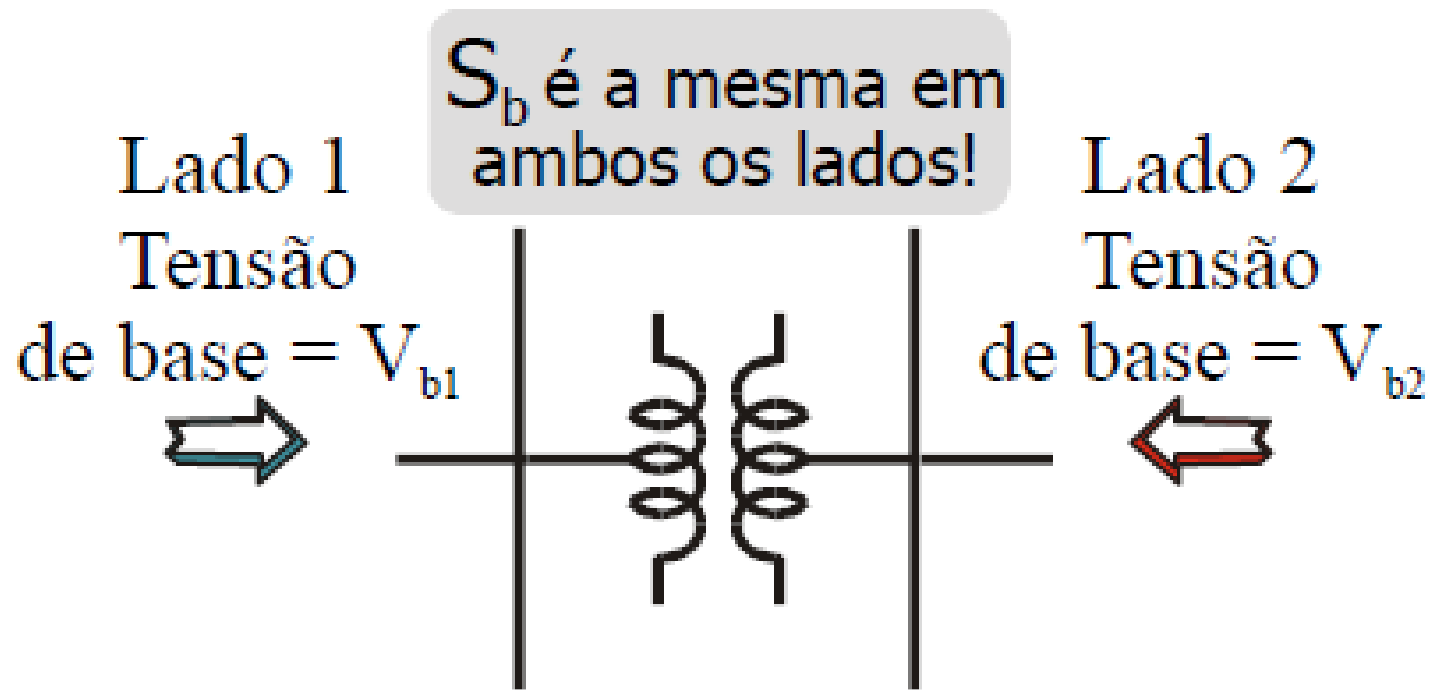
Representação de Transformadores em SEP



Representação de Transformadores em SEP

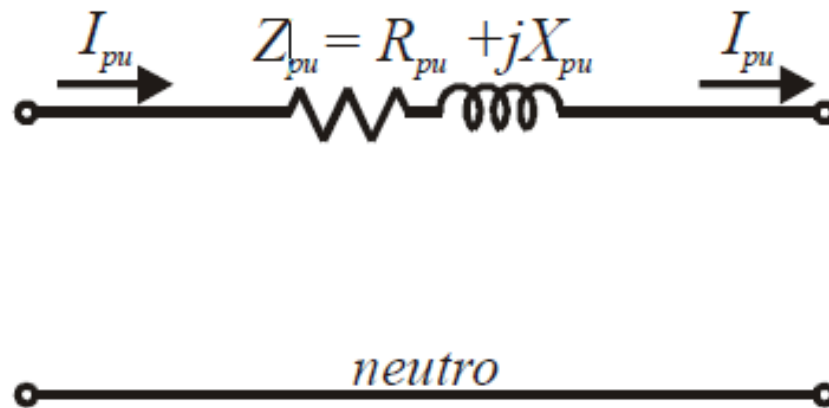
- Embora o modelo da seja simples, expressando a impedância do transformador em pu obtém-se uma simplificação ainda maior. Para isso considere:
 - Potência base: como sendo a potência nominal do transformador $S_{\text{Base}} = S_{\text{Nominal}}$;
 - Tensão base: depende do lado em que se fará os cálculos:
 - Se for escolhido o lado 1 usa-se como base a tensão nominal deste enrolamento: $V_{\text{base}} = V_{\text{NominalLado1}}$.
 - Se for selecionado o do lado 2, $V_{\text{base}} = V_{\text{NominalLado2}}$.

Representação de Transformadores em SEP



Representação de Transformadores em SEP

- Assim, o valor em pu da impedância do transformador será o mesmo, independente dos valores ôhmicos terem sido obtidos em referência ao lado 1 ou lado 2.
- Conclusão:** o transformador de potência é representado simplesmente por sua impedância em pu $Z_{pu} = R_{pu} + jX_{pu}$. Além disso, trabalhando com pu não há necessidade de transformação de tensão e a corrente em pu é a mesma nos dois lados. Esta é uma grande vantagem de se trabalhar com pu!



Representação de Transformadores em SEP

Exercício 2:

Um transformador trifásico de 100 MVA, 138 kV/13,8 kV tem valores percentuais de resistência e reatância dados por $R = 8\%$ e $X = 10\%$, respectivamente.

- a) Expressar R e X em pu.
- b) Expressar R e X em ohms, referidos aos lados de baixa tensão e de alta tensão.

Representação de Cargas em SEP

○ Tipos:

○ Potência Constante:

- Potência ativa e reativa consumida é constante e independente da tensão de alimentação.

○ Corrente Constante:

- A carga consome uma corrente constante independente da tensão de alimentação.

○ Impedância Constante:

- A carga se comporta (e pode ser representada) como uma impedância (com R , L e C constantes).

○ Mista:

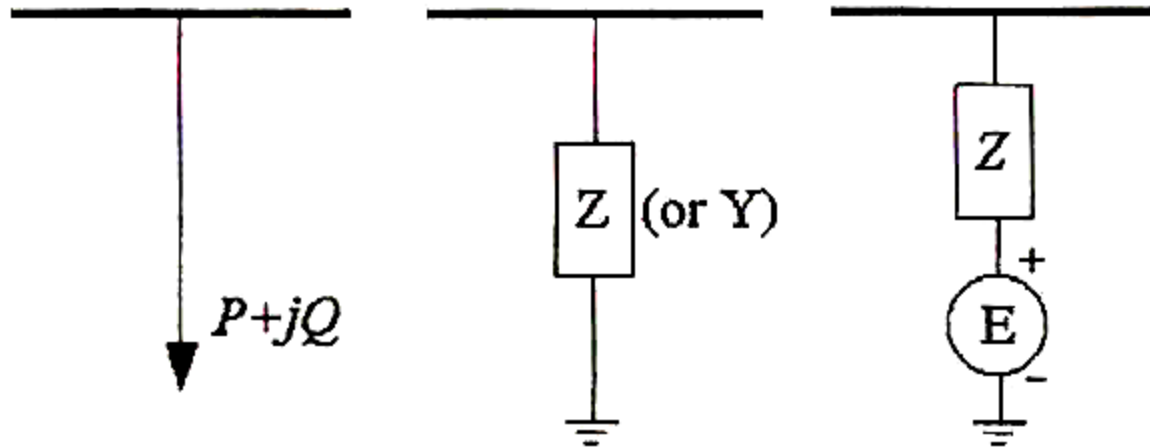
- Carga com parcelas de potência, corrente e impedância constante.

○ Outros.

Representação de Cargas em SEP

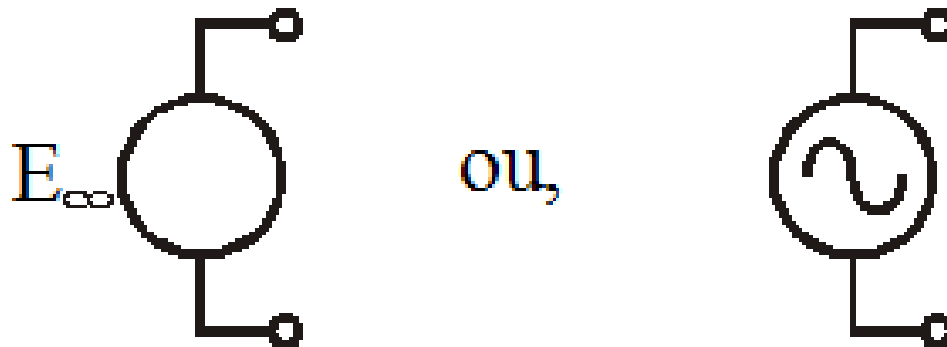
- Os modelos usuais para as cargas são:
 - modelo de potência constante, no qual utiliza-se valores constantes de potências ativa e reativa (usado em estudos de fluxo de potência por exemplo), como ilustra o primeiro diagrama da figura;
 - impedância (ou admitância) constante, representando cargas passivas;
 - impedância em série com força eletromotriz (representa máquinas rotativas as quais contribuem para alimentar correntes de curto-circuito);
 - de corrente constante (não ilustrado na figura).

Representação de Cargas em SEP



Representação de Barramento Infinito

- Uma barra infinita representa um grande sistema de potência de tal forma que a tensão e a frequência nesta barra são constantes. Em termos de circuitos elétricos é modelada por uma fonte de tensão ideal (sem impedância interna).



Representação de Barramento, Disjuntor e Chave

- Fisicamente, as barras ou barramentos são condutores elétricos com resistência desprezível, quando comparada com a impedância de linhas e transformadores. Isto justifica sua representação de circuito na forma de nós elétricos.
- Em geral as barras estão localizadas nas subestações e podem ser constituídas de várias seções de barras ligadas através de chaves seccionadoras ou disjuntores.

Representação de Barramento, Disjuntor e Chave

- Disjuntores e chaves são dispositivos que permitem conectar ou desconectar condutores de uma rede elétrica.
- Na modelagem de circuitos a posição aberta representa uma impedância infinita e fechada um curto-circuito.
- Embora tenham o mesmo papel lógico (abrir e fechar), sua construção e operações são bastante distintas:
 - **Disjuntor** está ligado ao sistema de proteção e opera automaticamente quando algum evento é detectado pelo relé a ele associado;
 - **Chaves**, manuais ou mecânicas, são usadas para reconfigurar o sistema e atender às necessidades de desenergização para manutenção.

Representação de Barramento, Disjuntor e Chave

