

Transformadores & Circuitos Trifásicos

- Por que precisamos estudar este tópico?
 - Os transformadores permitem a transmissão a grandes distâncias usando altos níveis de tensão e reduzindo as perdas elétricas dos sistemas.
 - Entender os aspectos básicos do campo magnético que estabelecem os fundamentos da operação dos transformadores.
 - Desenvolver circuitos equivalentes que representem o comportamento dos transformadores.

-Transformadores monofásicos



-Transformadores trifásicos

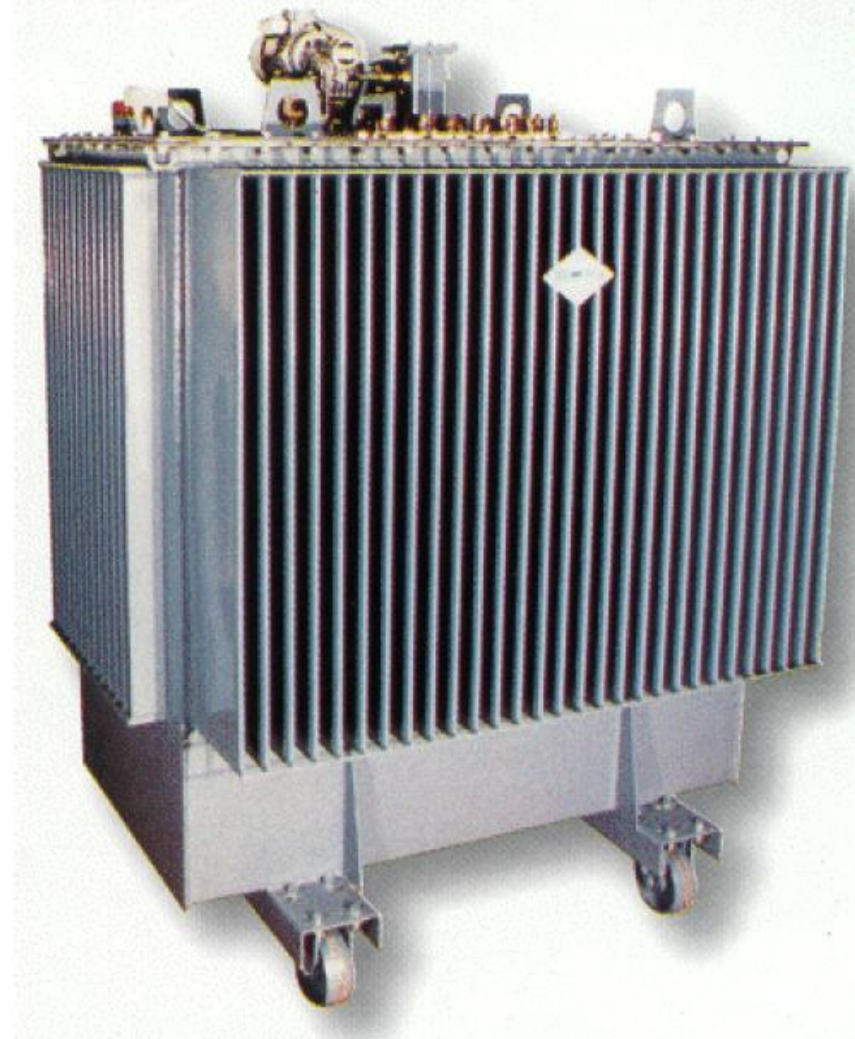


Fig. 22a/b: three-phase transformer 100 kVA (Ortea)

-Transformadores monofásico



-transformador utilizado em sistemas de distribuição

-Transformadores trifásico



-transformador utilizado em subestação de sistemas industriais

-Transformadores trifásico

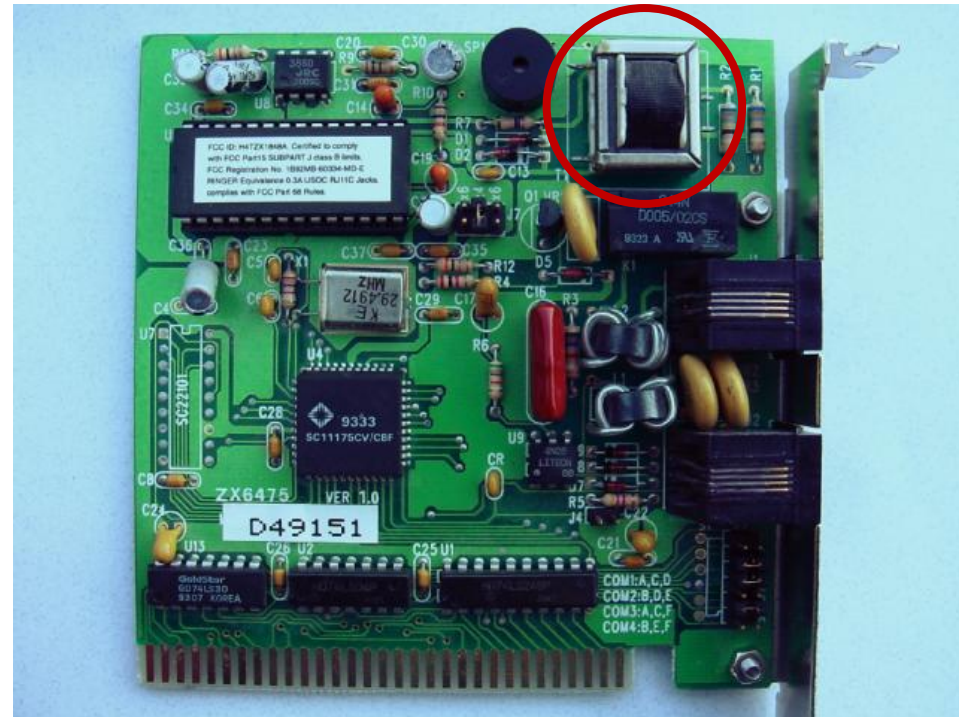
-transformador utilizado em subestação de sistemas de distribuição
(cerca de 3,5 metros de altura)



-Transformadores trifásicos



Fotos





Transformador utilizado em sistemas de distribuição (alimentação da rede secundária)

Transformador utilizado em subestação de sistemas de distribuição
(cerca de 3,5 metros de altura)





Transformador utilizado em subestação de sistemas industriais



Transformador
utilizado em
sistemas de
transmissão

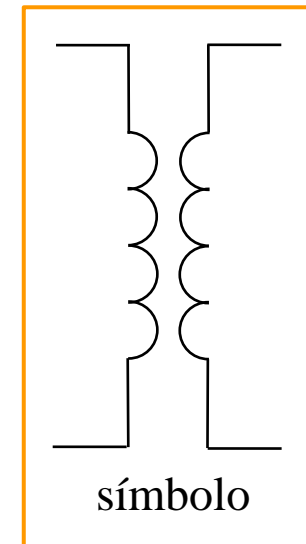
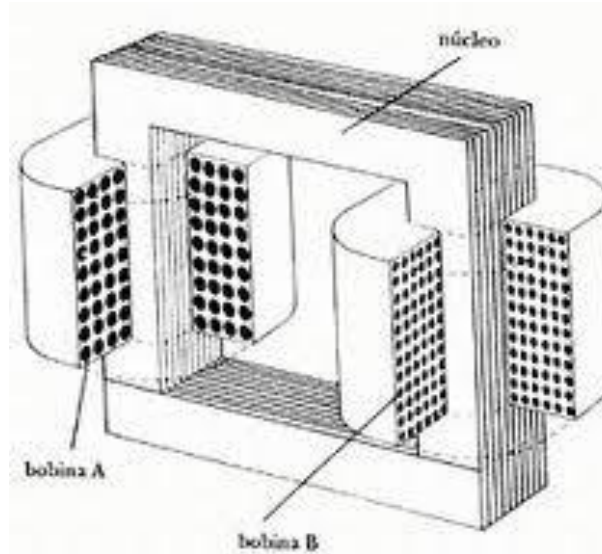


Transformadores utilizado em sistemas de transmissão

- O transformador é comumente utilizado em sistemas de conversão de energia e em sistemas elétricos.
- Seu princípio de funcionamento é baseado nas leis desenvolvidas para análise de circuitos magnéticos.
- Transformadores são utilizados para transferir energia elétrica entre diferentes circuitos elétricos através de um campo magnético, usualmente com diferentes níveis de tensão.

- As principais aplicações dos transformadores são:
 - Adequar os níveis de tensão em sistemas de geração, transmissão e distribuição de energia elétrica.
 - Isolar eletricamente sistemas de controle e eletrônicos do circuito de potência principal (toda a energia é transferida somente através do campo magnético).
 - Realizar casamento de impedância de forma a maximizar a transferência de potência.
 - Evitar que a corrente contínua de um circuito elétrico seja transferida para o outro circuito elétrico.
 - Realizar medidas de tensão e corrente. Um transformador pode fornecer isolamento entre linhas de distribuição e dispositivos de medição.

Introdução (5/6)



- O transformador tem a função de transformar energia elétrica em c.a. de um determinado nível de tensão para um outro nível de tensão através da ação de um campo magnético.
- Esse dispositivo consiste de duas ou mais bobinas enroladas em um núcleo ferromagnético.
- Normalmente, a única conexão entre essas bobinas é o fluxo magnético que circula pelo núcleo ferromagnético (com exceção do autotransformador).

Exemplo da necessidade do uso de transformadores em sistemas de potência

Seja um gerador com tensão terminal de 10 kV e capacidade de 300 MW, e que se deseja transmitir esta potência (energia) para um carga situada a um distância de 20 km.

Tem-se que:

$$I_f = P_f / V_f \quad \text{A}$$

Sabemos que: $P_f = 300,0 \text{ MW}$

$$V_f = 10,0 \text{ kV}$$

Assim, temos:

$$I_f = 300,0/10,0 = 30,0 \text{ kA}$$

Exemplo da necessidade do uso de transformadores em sistemas de potência

- Sendo a resistividade do cobre $\rho = 1,75 \times 10^{-8} \Omega/\text{m}$, a resistência será:

$$R_L = \rho l/A \quad \Omega$$

- Para $l = 20 \text{ km}$ e considerando que o condutor tem uma bitola de 25 mm^2 , temos:

$$R_L = (1,75 \times 10^{-8} \times 20 \times 10^3) / (\pi(25 \times 10^{-3})^2) = 0,1783 \Omega$$

- Assim, a perda ôhmica de potência (dissipada na LT) será:

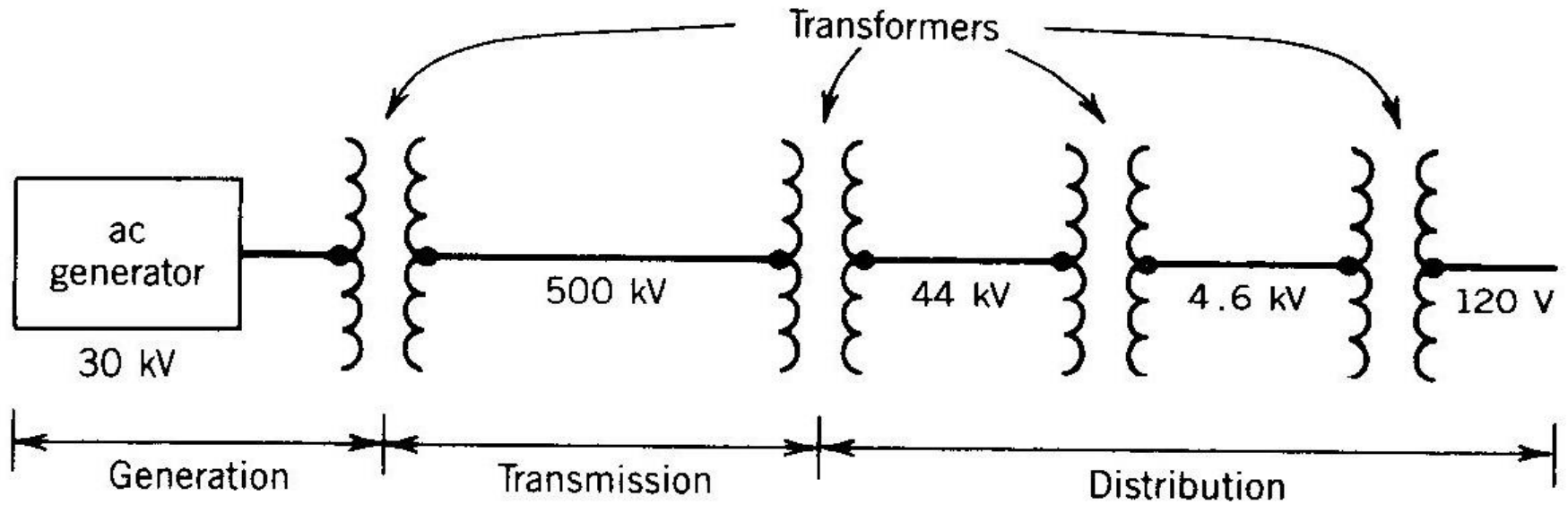
$$P_{\text{loss}} = R_L I^2 = 0,1783 \times (30,0)^2 = 160 \text{ MW}$$

- Esta perda representa:

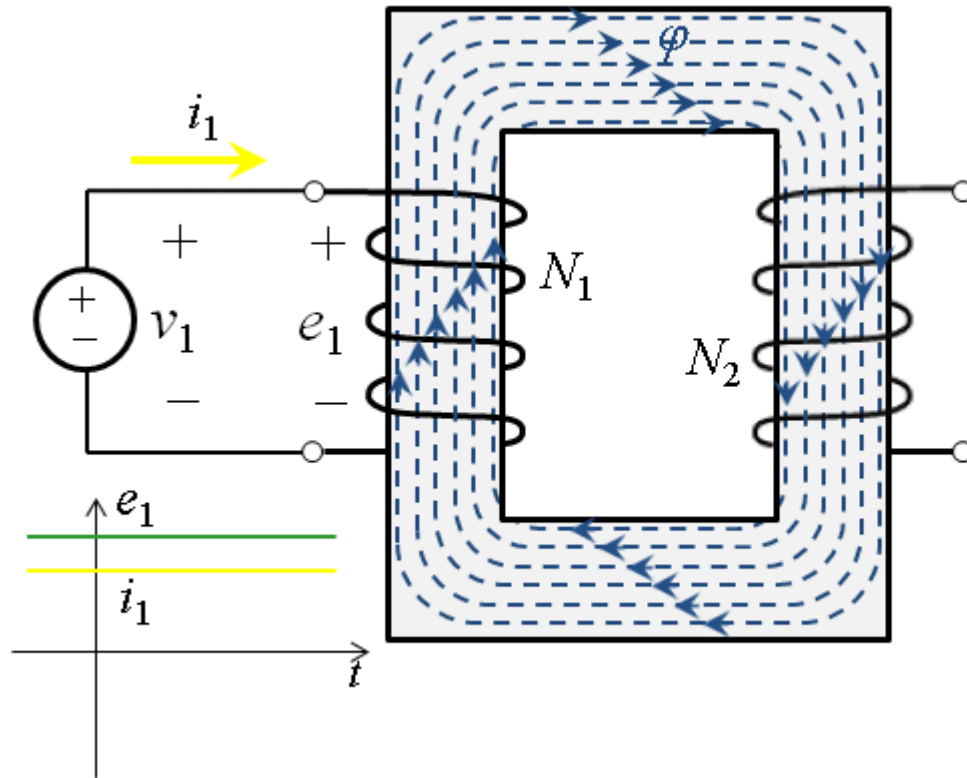
$$(160/300,0) \times 100 = \mathbf{53,3\%}$$

Ou seja, mais da metade da potência (energia) gerada seria perdida na transmissão.

Uso de transformadores em sistemas de potência

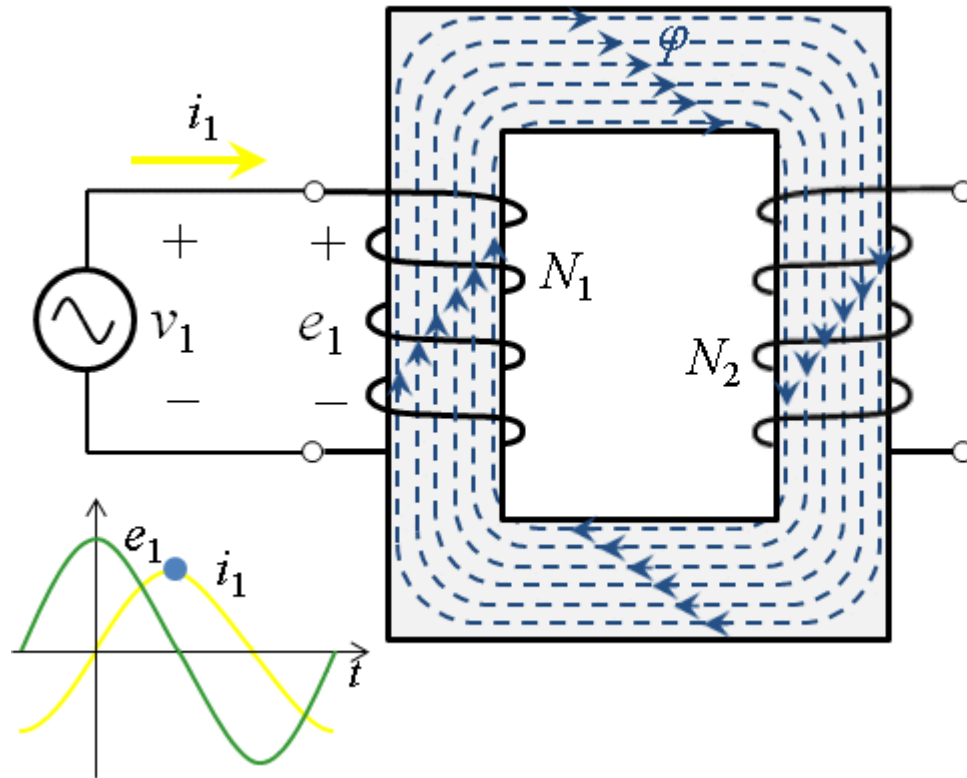


Princípio de funcionamento (1/4)



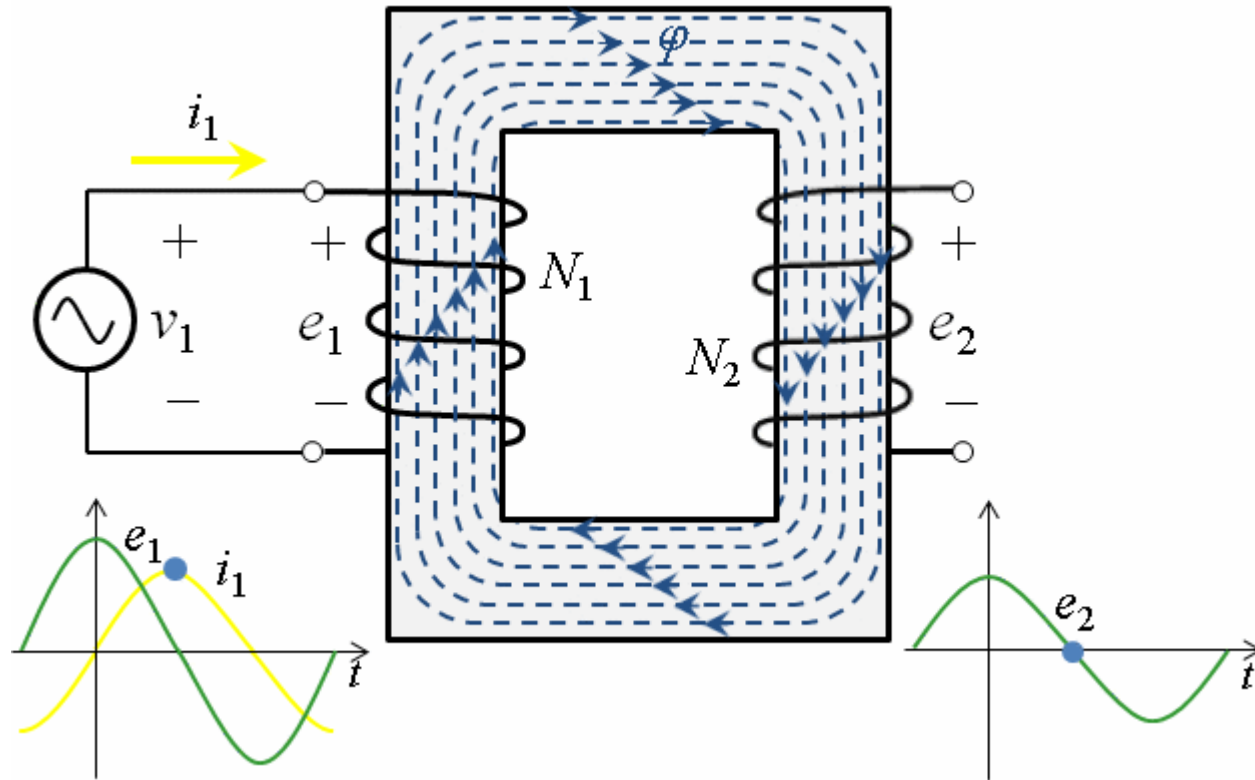
- O que acontece se energizamos a bobina 1 com uma fonte de corrente contínua?
- O que observa a bobina 2?

Princípio de funcionamento (2/4)



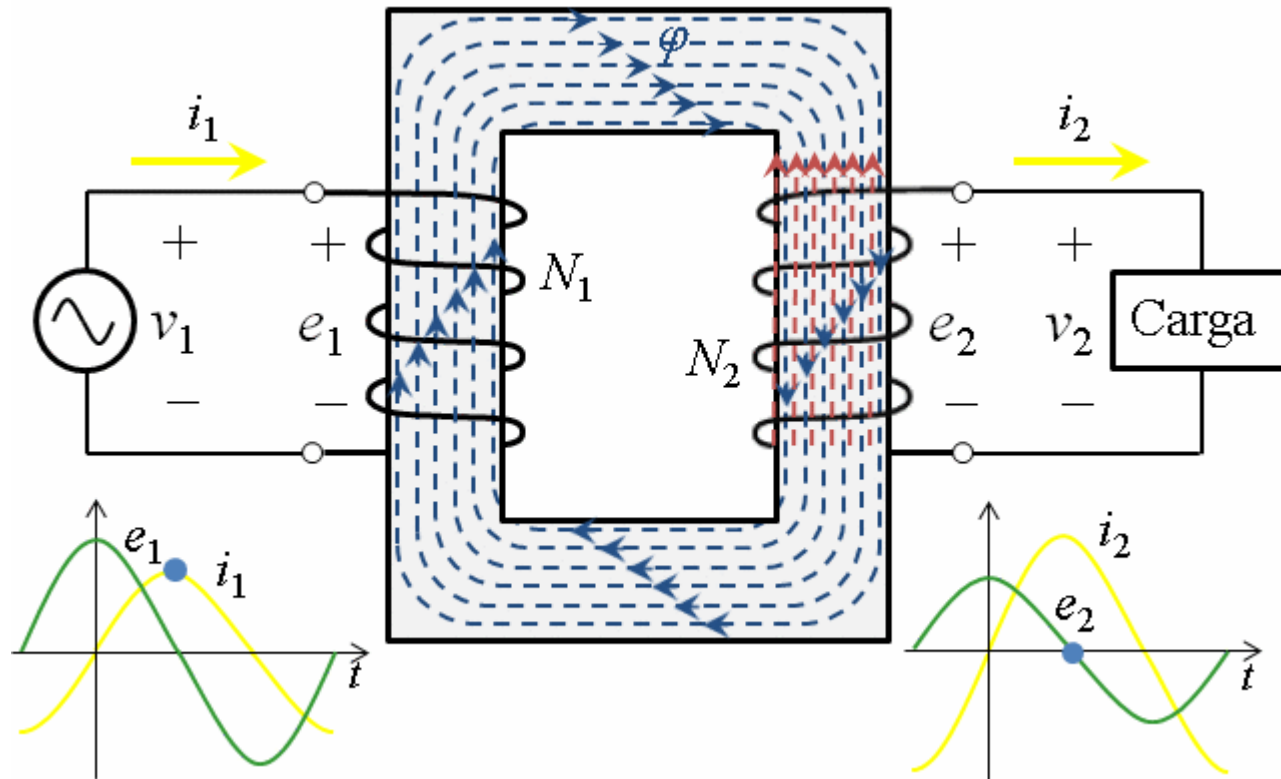
- O que acontece se energizamos a bobina 1 do transformador com uma fonte de corrente alternada?
- O que observa a bobina 2 do transformador?

Princípio de funcionamento (3/4)



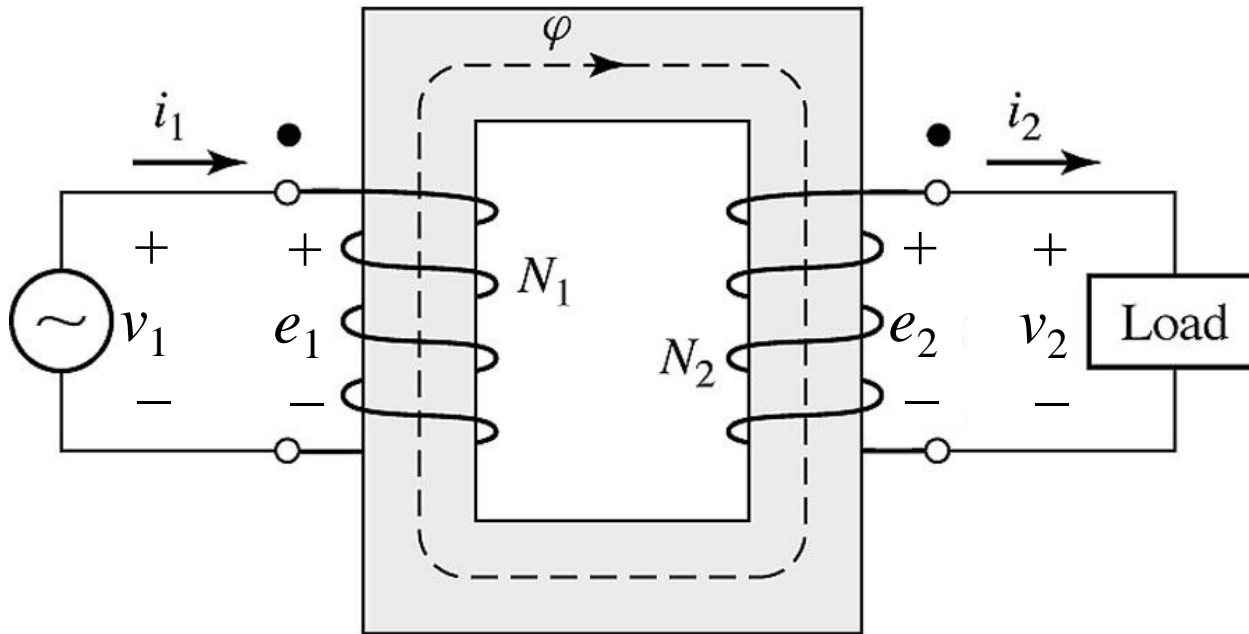
- Pela lei de indução de Faraday, surge uma tensão induzida na bobina 2 do transformador.

Princípio de funcionamento (4/4)



- Se uma carga é conectada na bobina 2 do transformador, uma corrente i_2 circulará pelo mesmo.
- Pela lei de Lenz, o sentido da corrente i_2 é de forma a se opor á variação do fluxo magnético que a criou.

Transformador ideal



■ Transformador ideal (sem perdas):

- A resistência dos enrolamentos são desprezíveis
- A permeabilidade do núcleo é infinita (portanto a corrente de magnetização é nula)
- Não há dispersão
- Não há perdas no núcleo

Equação fundamental do transformador

■ Equação fundamental do transformador

$$\begin{cases} v_1 = e_1 = N_1 \frac{d\phi}{dt} \\ v_2 = e_2 = N_2 \frac{d\phi}{dt} \end{cases}$$

■ Em valor eficaz temos:

$$e_1 = N_1 \frac{d\phi}{dt} \quad \rightarrow \quad E_1 = 4,444 \cdot N_1 \cdot f \cdot B_m \cdot A$$

$$e_2 = N_2 \frac{d\phi}{dt} \quad \rightarrow \quad E_2 = 4,444 \cdot N_2 \cdot f \cdot B_m \cdot A$$

$$E = 4,444 \cdot N \cdot f \cdot B_m \cdot A$$

Relação de transformação

- Considerando o transformador ideal em vazio ($i_2 = 0$)

$$\begin{cases} v_1 = e_1 = N_1 \frac{d\varphi}{dt} \\ v_2 = e_2 = N_2 \frac{d\varphi}{dt} \end{cases}$$

- Desta forma temos:

$$\frac{v_1}{v_2} = \frac{e_1}{e_2} = \frac{N_1 \frac{d\varphi}{dt}}{N_2 \frac{d\varphi}{dt}} = \frac{N_1}{N_2} = a$$

Em que, a é relação de espiras do transformador, denominada relação de transformação.

Primeira equação do transformador

- Tal relação é denominada relação de transformação.
- Para tensões senoidais, em termos de fasores, temos a primeira eq. do transformador

$$\frac{\dot{V}_1}{\dot{V}_2} = \frac{\dot{E}_1}{\dot{E}_2} = \frac{N_1}{N_2} = a$$

Portanto:

$$\dot{V}_1 = a\dot{V}_2$$

$a < 1 \quad \Rightarrow \quad |\dot{V}_2| > |\dot{V}_1| \quad \Rightarrow \quad$ transformador elevador

$a > 1 \quad \Rightarrow \quad |\dot{V}_2| < |\dot{V}_1| \quad \Rightarrow \quad$ transformador abaixador



Transformador - Princípio de Funcionamento

<http://www.youtube.com/watch?v=CUIIT-wEExU>

Balço de potências

- A potência instantânea no primário é dada por:

$$p_1(t) = v_1 \cdot i_1$$

- A potência instantânea no secundário é dada por:

$$p_2(t) = v_2 \cdot i_2$$

- Sabemos:

$$p_1(t) = v_1 \cdot i_1 = av_2 \cdot \frac{i_2}{a} = v_2 \cdot i_2 = p_2(t)$$

- O que era esperado, visto que todas as perdas foram desprezadas. Em termos fasoriais, temos:

$$S_1 = \dot{V}_1 \cdot \dot{I}_1^* = a\dot{V}_2 \cdot \frac{\dot{I}_2^*}{a} = \dot{V}_2 \cdot \dot{I}_2^* = S_2$$

Em que S é a potência aparente (VA).

Exercícios (Não é para entregar!., não é uma atividade!)

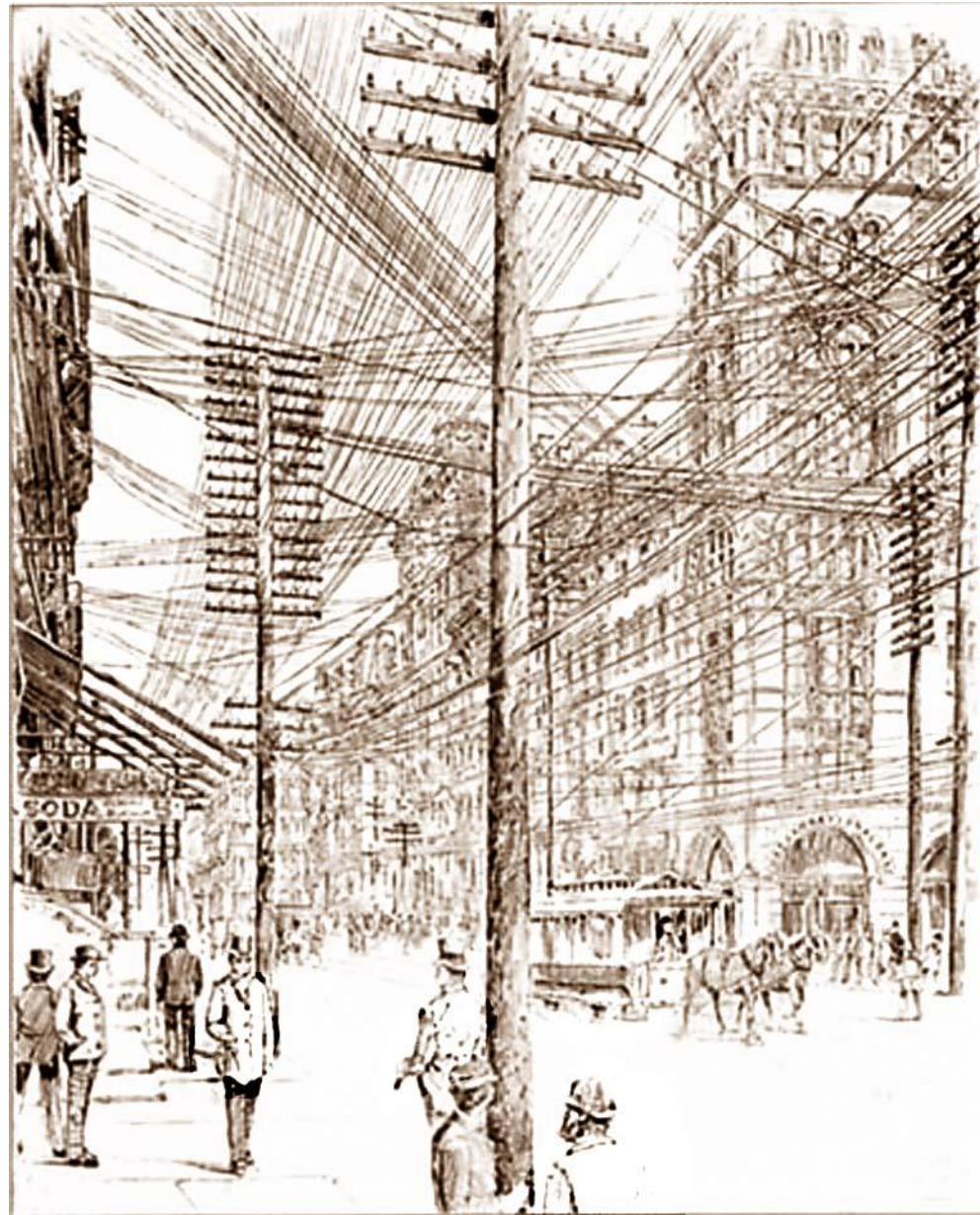
1. Explique forma simples a lei de indução de Faraday e para que é utilizado.
2. Usando lei circuital de Ampère e a lei de indução de Faraday, explique o principio de funcionamento de um transformador.
3. Por que é importante o transformador em um sistema de energia elétrica.
4. Por que é importante desenvolver um circuito equivalente que represente o comportamento do transformador em regime permanente.
5. Desenhe o circuito equivalente T do transformador, identifique e explique o que representa cada um de seus componentes.

Introdução (1/3)

- As primeiras linhas de transmissão de energia elétrica surgiram no final do século XIX.
- Destinavam-se exclusivamente ao suprimento do sistema de iluminação, pequenos motores e sistema de tração (*railway*) e operavam em **corrente contínua** a baixa magnitude de tensão.
- A geração e transmissão usando os mesmos níveis de tensão das diferentes cargas restringiu a distância entre a planta de geração e os consumidores.
- A tensão da geração em **corrente contínua** não podia ser facilmente aumentada para a transmissão a grandes distâncias.
- Classes diferentes de cargas exigem diferentes níveis de tensões, e diferentes geradores e circuitos eram usados especificamente para cada conjunto de carga.

Introdução (2/3)

Ruas da cidade de New York em 1890. Além das linhas de telégrafo, múltiplas linhas elétricas foram exigidas para cada tipo de carga, que trabalhavam a diferentes níveis de tensões.



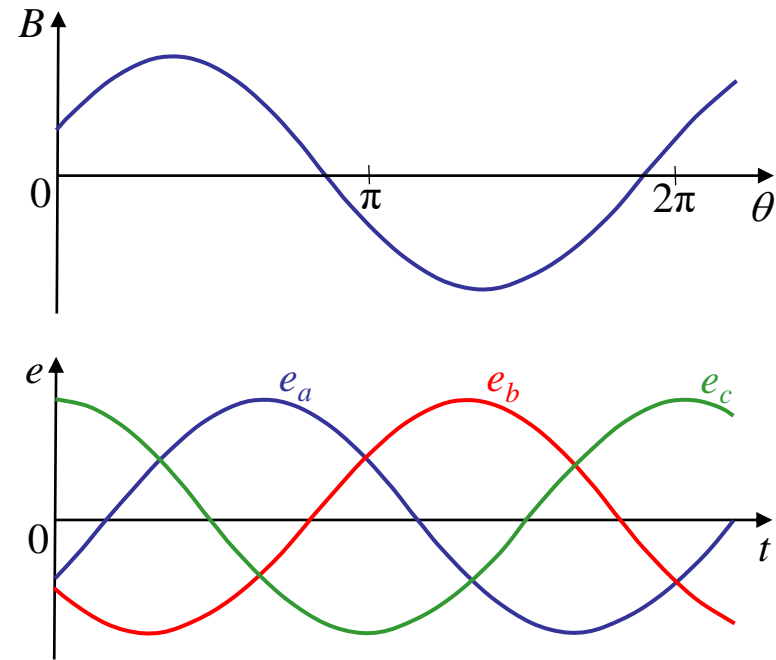
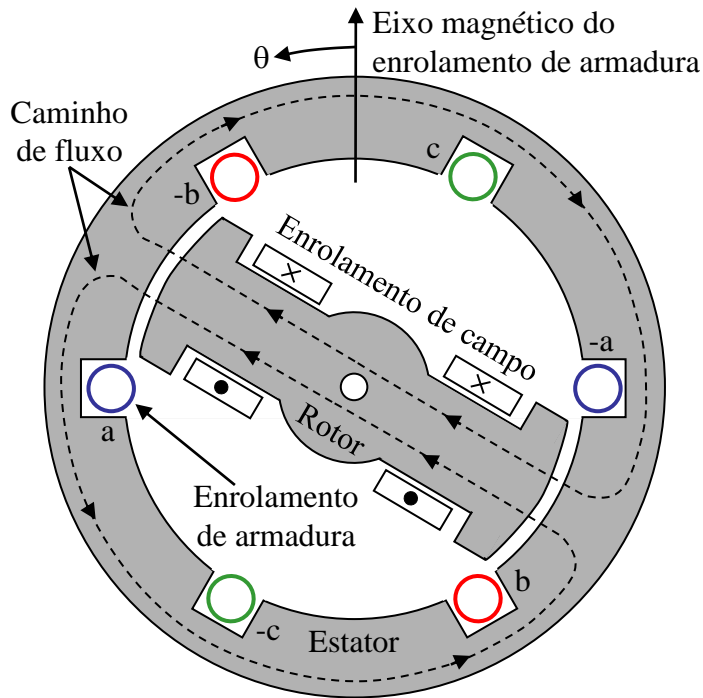
http://en.wikipedia.org/wiki/Electric_power_transmission

- Para realizar uma transmissão de energia elétrica a grandes distâncias era necessário um nível elevado de magnitude de tensão, e essa tecnologia de conversão para **corrente contínua** não era viável naquela época.
- A mudança da transmissão de **corrente contínua** para **corrente alternada** foi devido principalmente aos seguintes motivos:
 - O desenvolvimento e uso dos transformadores, permitindo a transmissão a grandes distâncias usando altos níveis de tensão, reduzindo as perdas elétricas dos sistemas e a queda de tensão;
 - A elevação/redução da magnitude de tensão é realizado com uma alta eficiência e a baixo custo através dos transformadores.
 - Surgimento de geradores e motores em corrente alternada, construtivamente mais simples, eficientes e baratos que as máquinas em corrente contínua;

■ Porque usar um sistema trifásico?

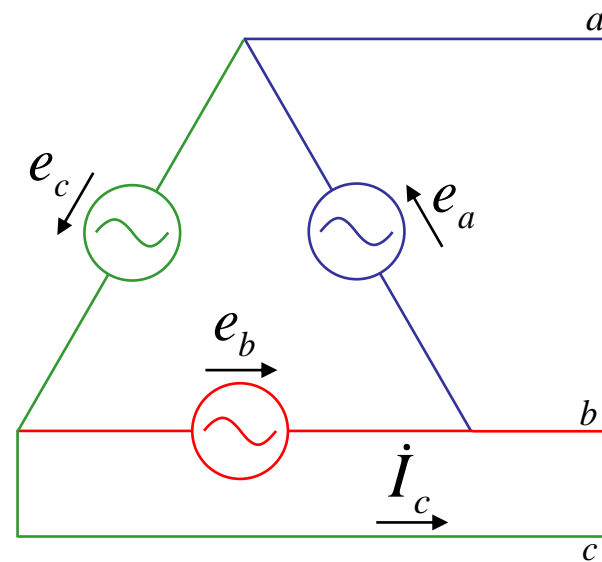
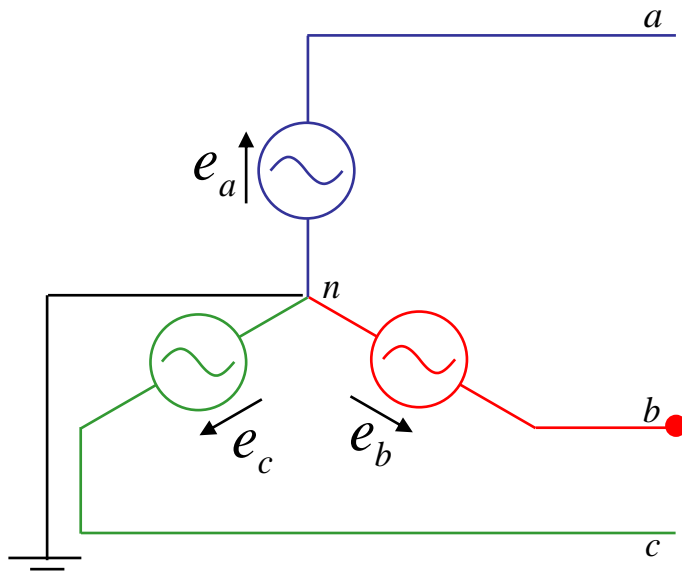
- Um gerador trifásico aproveita melhor o espaço físico, resultando em um gerador de tamanho reduzido e mais barato, comparado com os geradores monofásicos de igual potência.
- Um sistema monofásico precisa de dois condutores; e um sistema trifásico (perfeitamente balanceado) precisa de três condutores, porém conduz três vezes mais potência. Na prática, devido a pequenos desequilíbrios inevitáveis, os sistemas trifásicos contam com um quarto condutor, o neutro.
- Duas alternativas de distribuição: monofásico e trifásico, permitindo o fornecimento a consumidores domiciliares e industriais.
- Os motores trifásicos são superiores aos motores monofásicos em rendimento, tamanho, fator de potência e capacidade de sobrecarga.

Geração em corrente alternada (Trifásico)



- Três bobinas defasadas em 120 graus elétricos no espaço geram um conjunto de três tensões de mesmo valor máximo, defasadas de 120 graus elétricos no tempo.
- As três tensões são conhecidas como FASES.
- No caso de conexão em Y, há dois valores de tensões distintas: tensão de fase e tensão entre duas fases qualquer.

Geração em corrente alternada



- Denominação: os condutores a , b e c são as fases o condutor conectado no ponto n é o neutro.



Tensões trifásicas

<http://www.youtube.com/watch?v=22434JHXYjs>

■ Sistemas de tensões trifásicas

Representação temporal

$$e_a(t) = \sqrt{2}E \cos(\omega t)$$

$$e_b(t) = \sqrt{2}E \cos\left(\omega t - \frac{2\pi}{3}\right)$$

$$e_c(t) = \sqrt{2}E \cos\left(\omega t + \frac{2\pi}{3}\right)$$

Representação fasorial

$$\dot{E}_a = E \angle 0$$

$$\dot{E}_b = E \angle -120^\circ$$

$$\dot{E}_c = E \angle 120^\circ$$

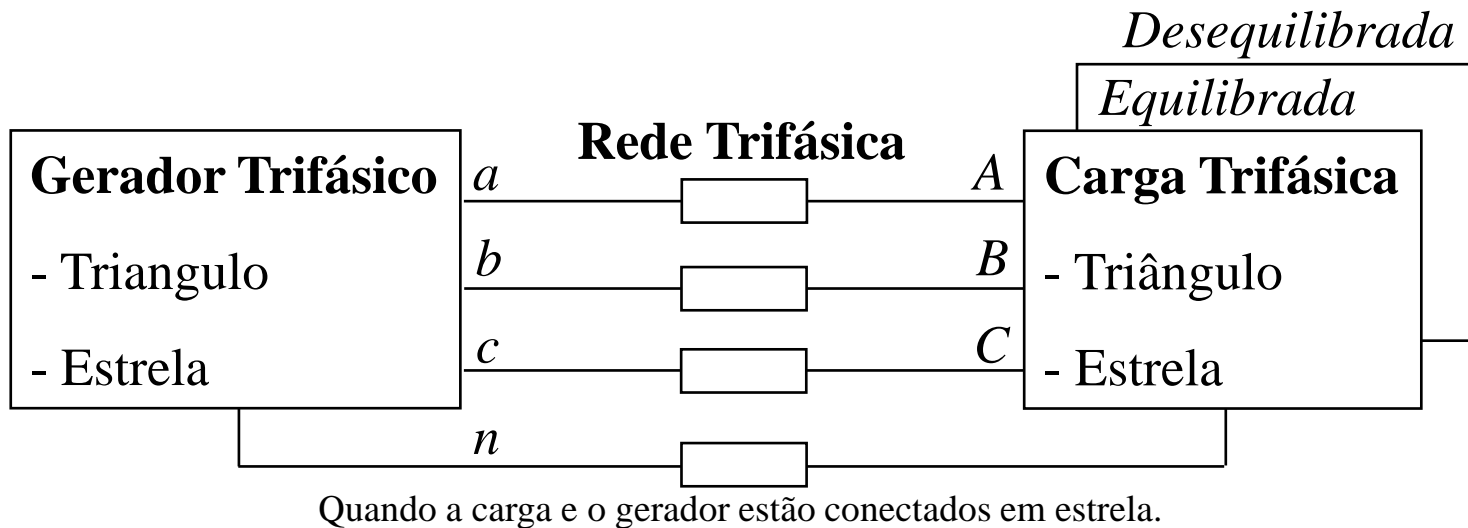
- Em que, $e_a(t)$, $e_b(t)$ e $e_c(t)$ são os valores instantâneos das tensões trifásicas, E é o valor eficaz das tensões e ω é a frequência angular; e
- \dot{E}_a , \dot{E}_b e \dot{E}_c são os fasores das tensões trifásicas.
- A tensão a é a origem (ou referência) das fases.

Definições

- Linha (ou rede) trifásica desequilibrada: Linha (ou rede) trifásica em que não se verifica alguma das condições de equilíbrio ;
- Carga trifásica equilibrada: Carga trifásica constituída por três impedâncias iguais ligadas em estrela (Y) ou triângulo (Δ). ;
- Carga trifásica desequilibrada: Carga trifásica em estrela (Y) ou triângulo (Δ) em que não se verifica pelo menos umas das condições de equilíbrio.

Ligações triângulo e estrela

- Nos sistemas trifásicos podem ocorrer dois tipos de ligações:
 - Ligação em triângulo (Δ)
 - Ligação em estrela (Y)

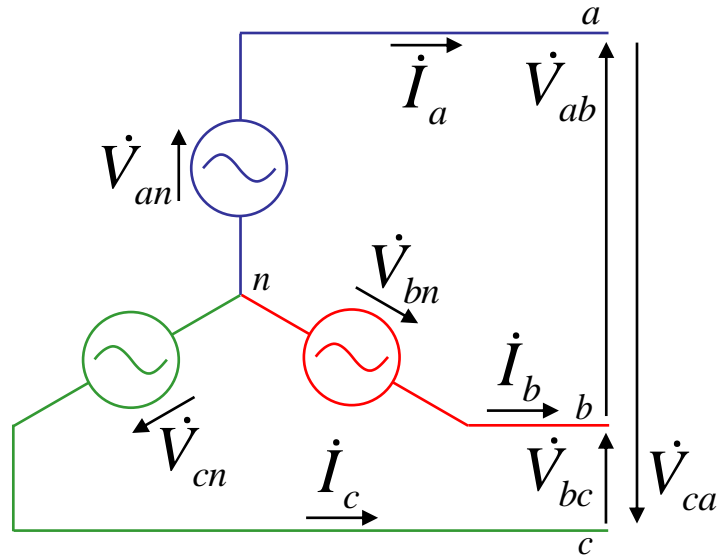


- Na carga trifásica é medida:
 - A potência trifásica.
 - As tensões de linha (entre duas fases) ou tensões de fases (entre uma fase e o neutro).
 - As correntes de linha (percorrendo a linha) ou corrente de fases (percorrendo a carga).

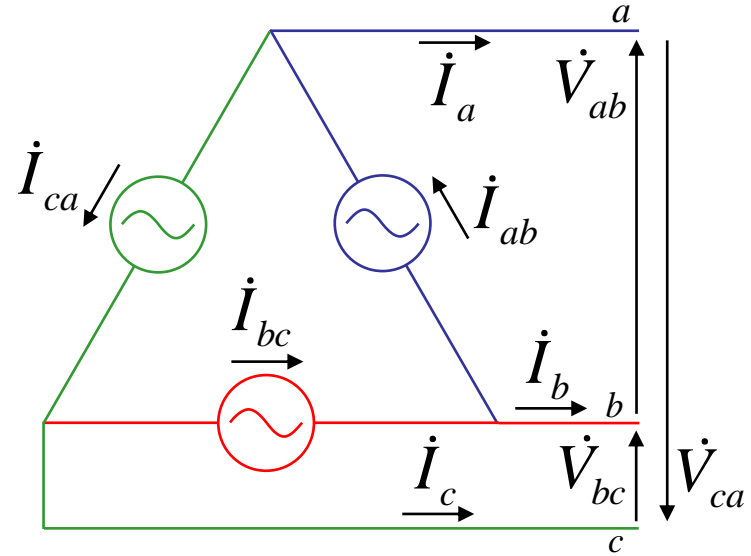
1. Tensão de fase: medida entre qualquer terminal do gerador ou carga e o centro-estrela;
2. Tensão de linha: medida entre quaisquer dois terminais do gerador ou da carga, nenhum deles sendo o centro-estrela;
3. Corrente de fase: corrente que percorre cada das bobinas do gerador ou da impedância da carga
4. Corrente de linha: corrente que percorre os condutores que conectam o gerador á carga, excetuado o neutro.

Ligações triângulo e estrela – Geração

Ligação em Estrela



Ligação em Triângulo



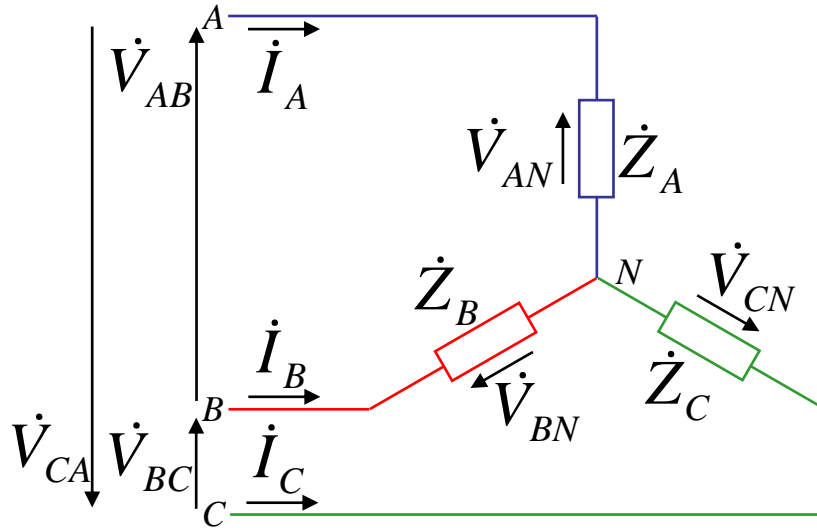
- n é o neutro (centro-estrela) do gerador.
- Para um sistema trifásico simétrico:

$$|\dot{V}_a| = |\dot{V}_b| = |\dot{V}_c|$$

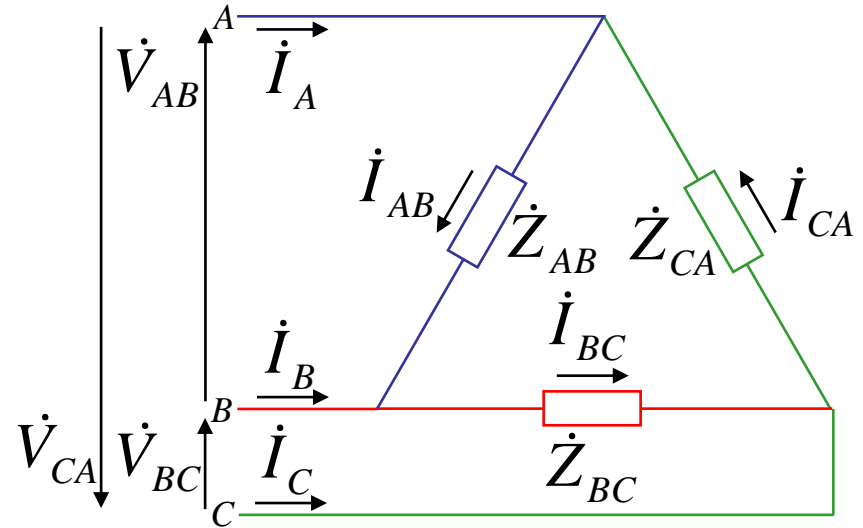
$$\dot{V}_a + \dot{V}_b + \dot{V}_c = 0$$

Ligações triângulo e estrela - Carga

Ligação em Estrela



Ligação em Triângulo



■ n é o neutro (centro-estrela) da carga.

■ Para uma carga trifásica equilibrada:

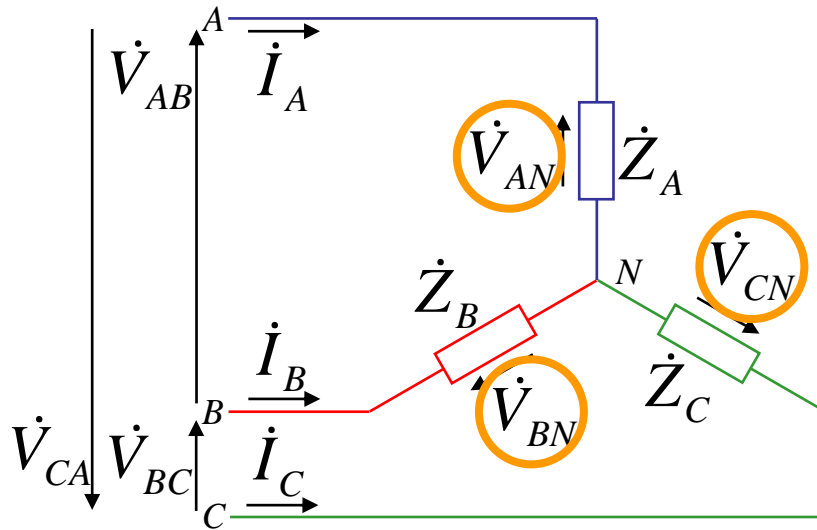
$$\dot{Z}_A = \dot{Z}_B = \dot{Z}_C$$

$$\dot{Z}_{AB} = \dot{Z}_{BC} = \dot{Z}_{CA}$$

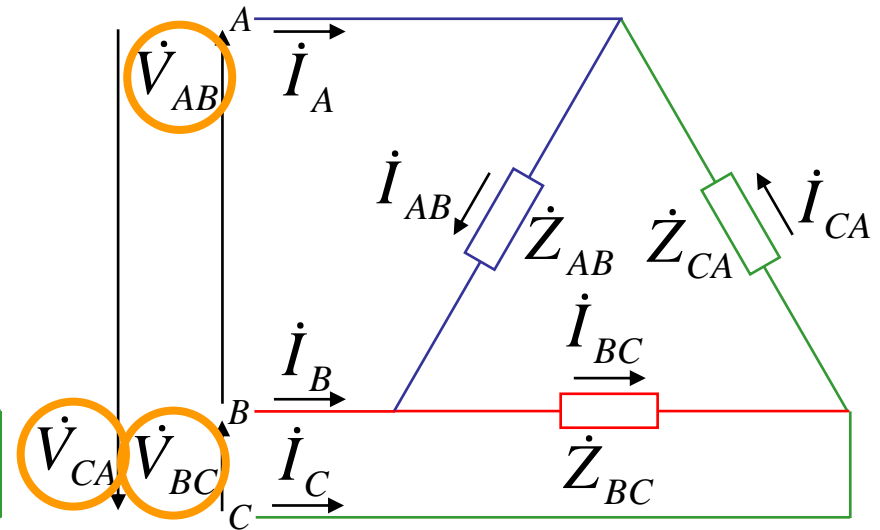
Relações entre os valores de fase e linha (1/12)

- Tensão de fase – tensão medida em cada um dos ramos monofásicos de um sistema trifásico.

Ligação em Estrela



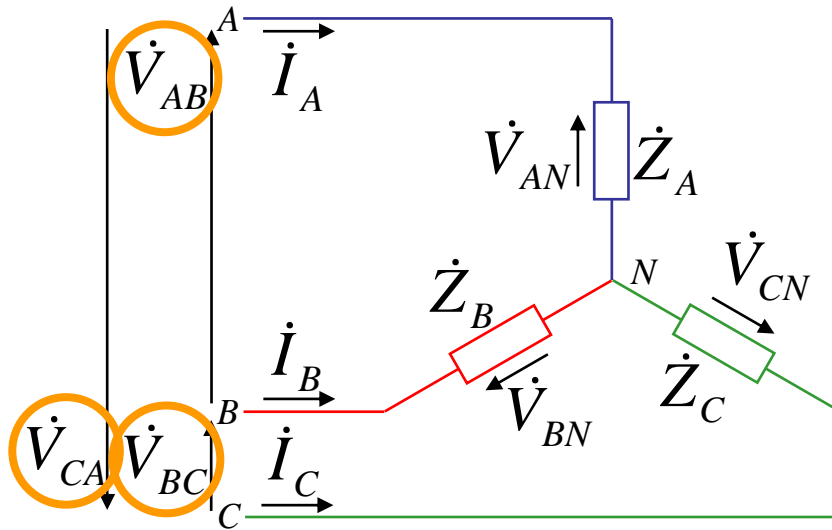
Ligação em Triângulo



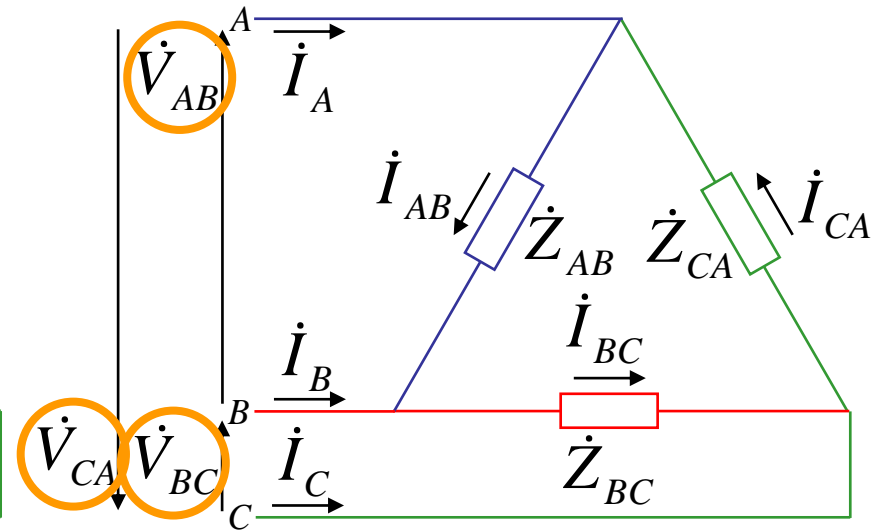
Relações entre os valores de fase e linha

- Tensão de linha – tensão medida entre dois condutores terminais de fase.

Ligação em Estrela



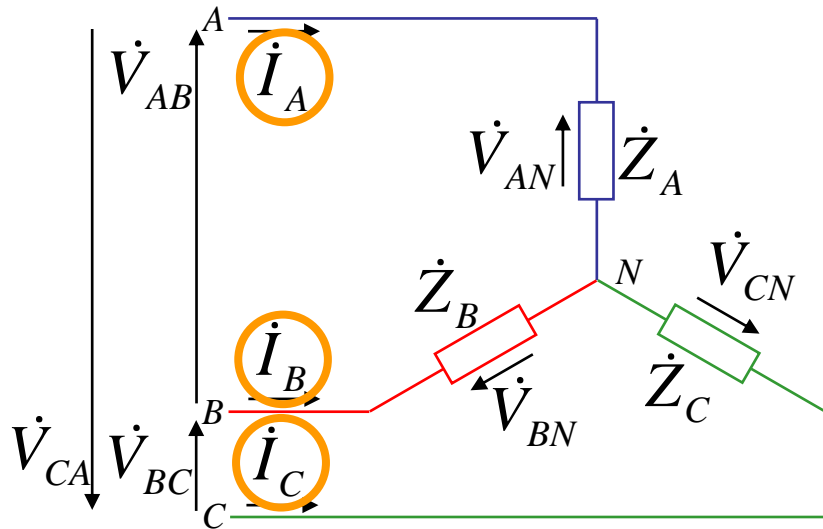
Ligação em Triângulo



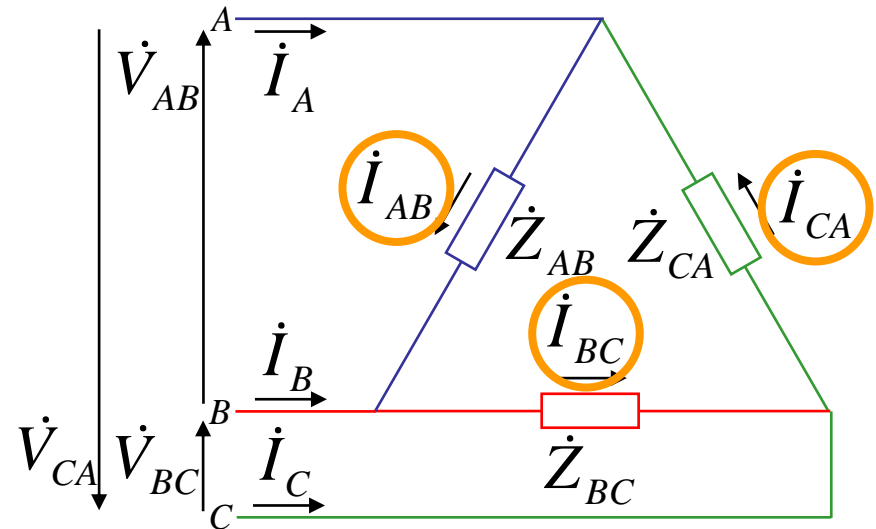
Relações entre os valores de fase e linha

- Corrente de fase – corrente que percorre cada ramo monofásico de um sistema trifásico.

Ligação em Estrela



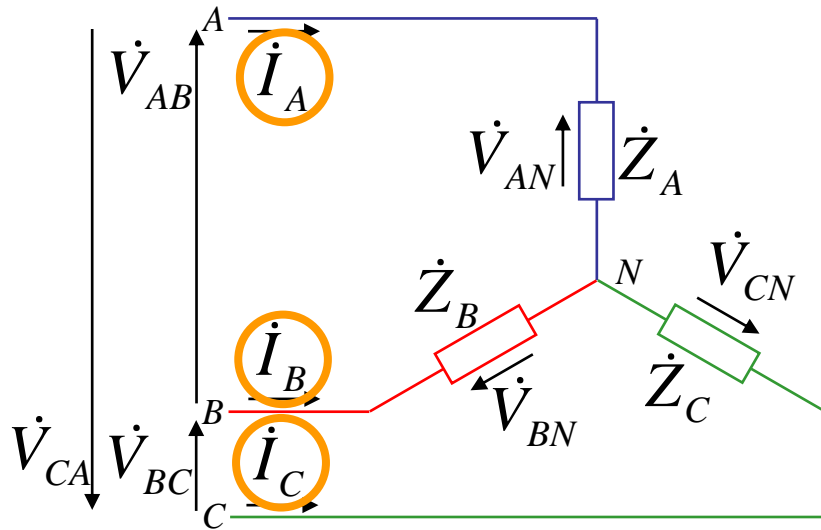
Ligação em Triângulo



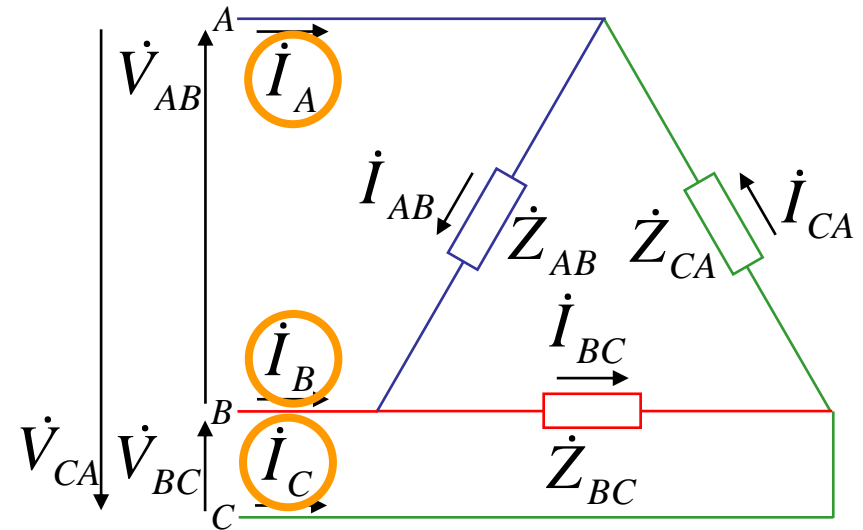
Relações entre os valores de fase e linha

- Corrente de linha – corrente que percorre por cada condutor de linha.

Ligação em Estrela



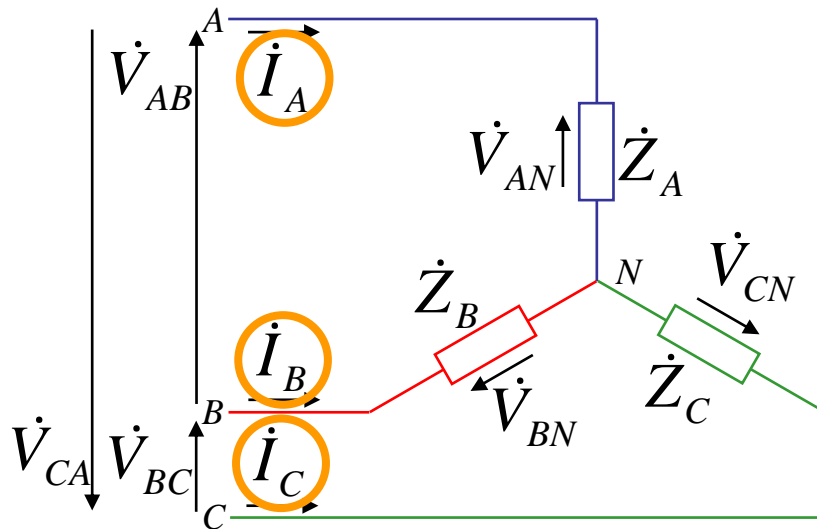
Ligação em Triângulo



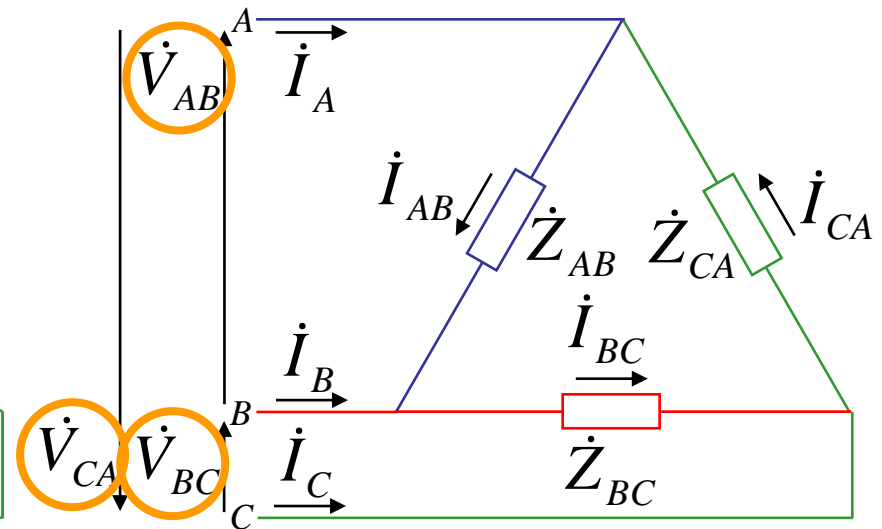
Relações entre os valores de fase e linha

- Em uma ligação em estrela, as correntes de fase coincidem com as correntes de linha.
- Em uma ligação em triângulo, as tensões de fase coincidem com as tensões de linha.

Ligação em Estrela



Ligação em Triângulo



■ Resumo

	Seqüência positiva
Ligação em estrela	$\dot{I}_{linha} = \dot{I}_{fase}$ $\begin{bmatrix} \dot{V}_{ab} \\ \dot{V}_{bc} \\ \dot{V}_{ca} \end{bmatrix} = \sqrt{3} \angle 30^\circ \begin{bmatrix} \dot{V}_{an} \\ \dot{V}_{bn} \\ \dot{V}_{cn} \end{bmatrix}$
Ligação em triângulo	$\dot{V}_{linha} = \dot{V}_{fase}$ $\begin{bmatrix} \dot{I}_a \\ \dot{I}_b \\ \dot{I}_c \end{bmatrix} = \sqrt{3} \angle -30^\circ \begin{bmatrix} \dot{I}_{ab} \\ \dot{I}_{bc} \\ \dot{I}_{ca} \end{bmatrix}$

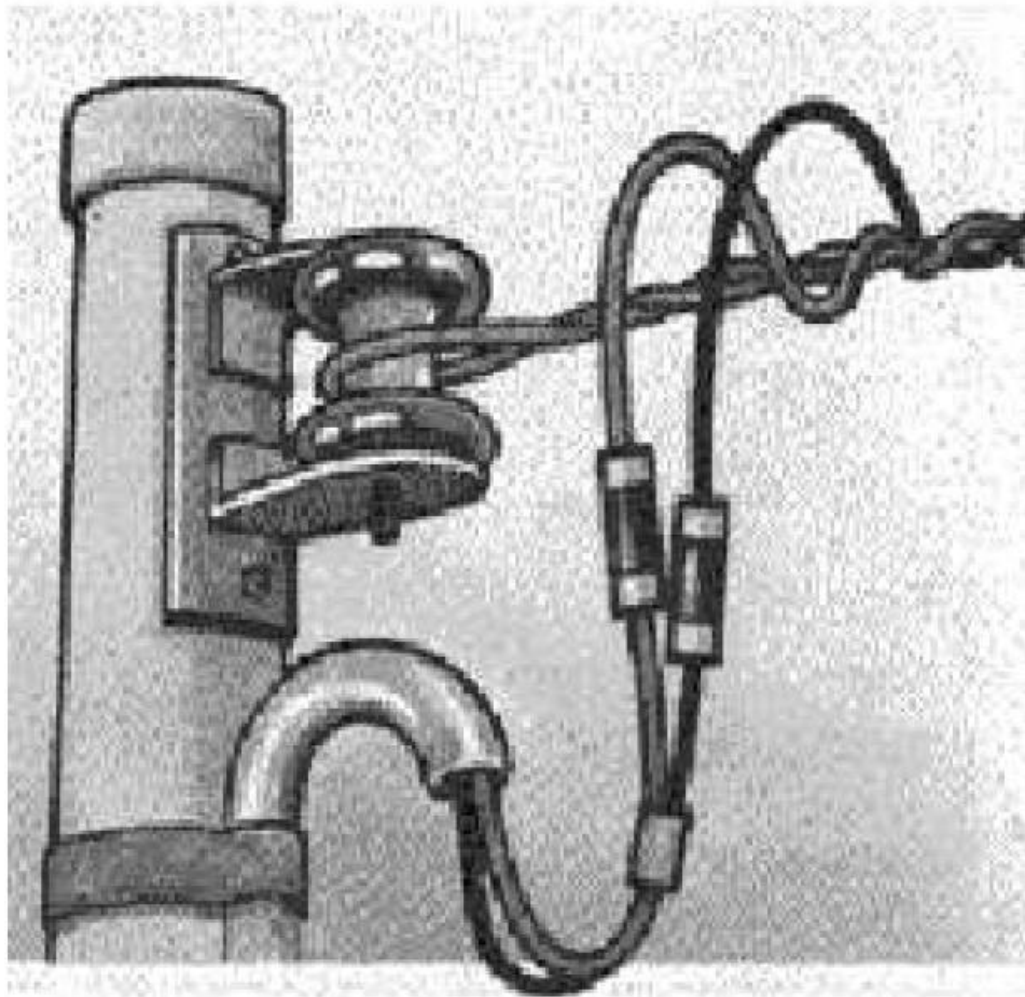


Conexões Residenciais na Rede Elétrica

<http://www.youtube.com/watch?v=ettHn5GRbgI>

Ligações domiciliares (1/3)

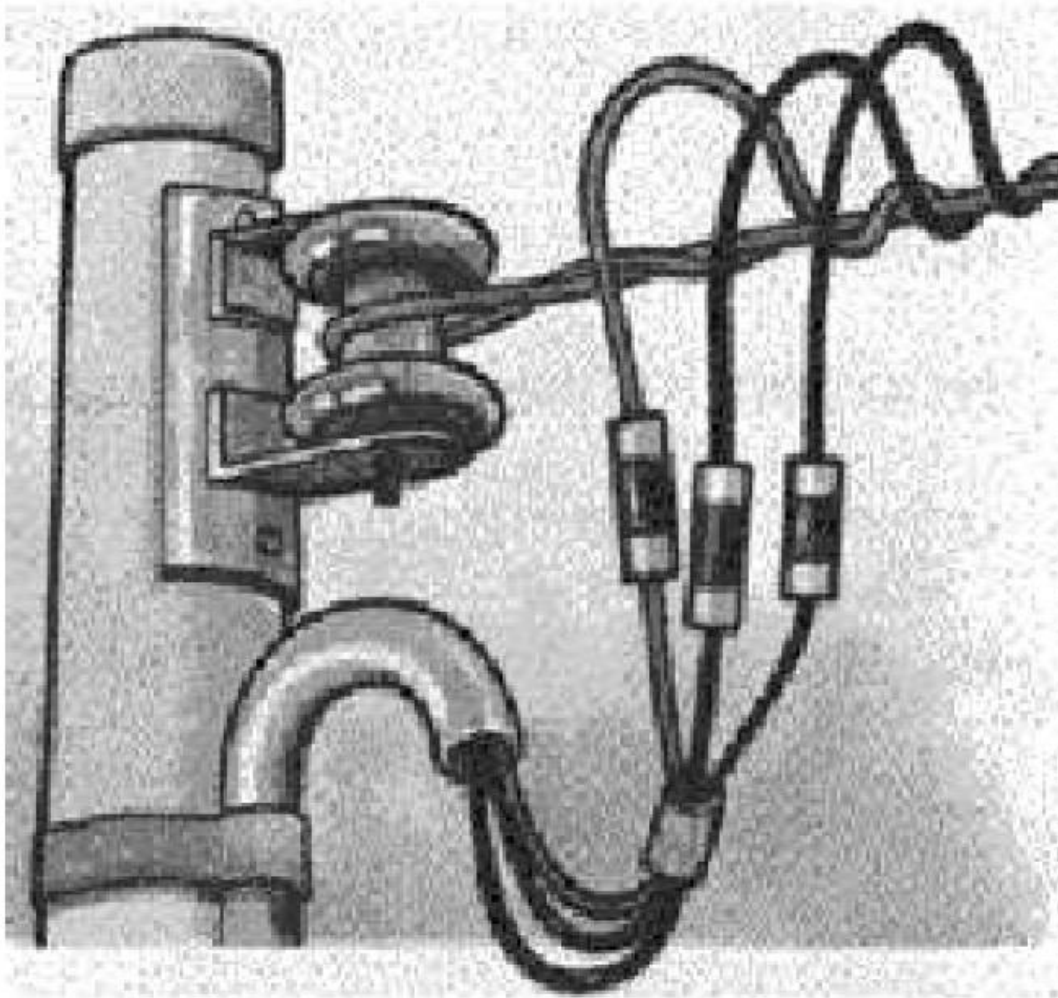
- Nas áreas de concessão das empresas do estado de São Paulo, tem-se três tipos de atendimento:



Fase e Neutro

Ligações domiciliares (2/3)

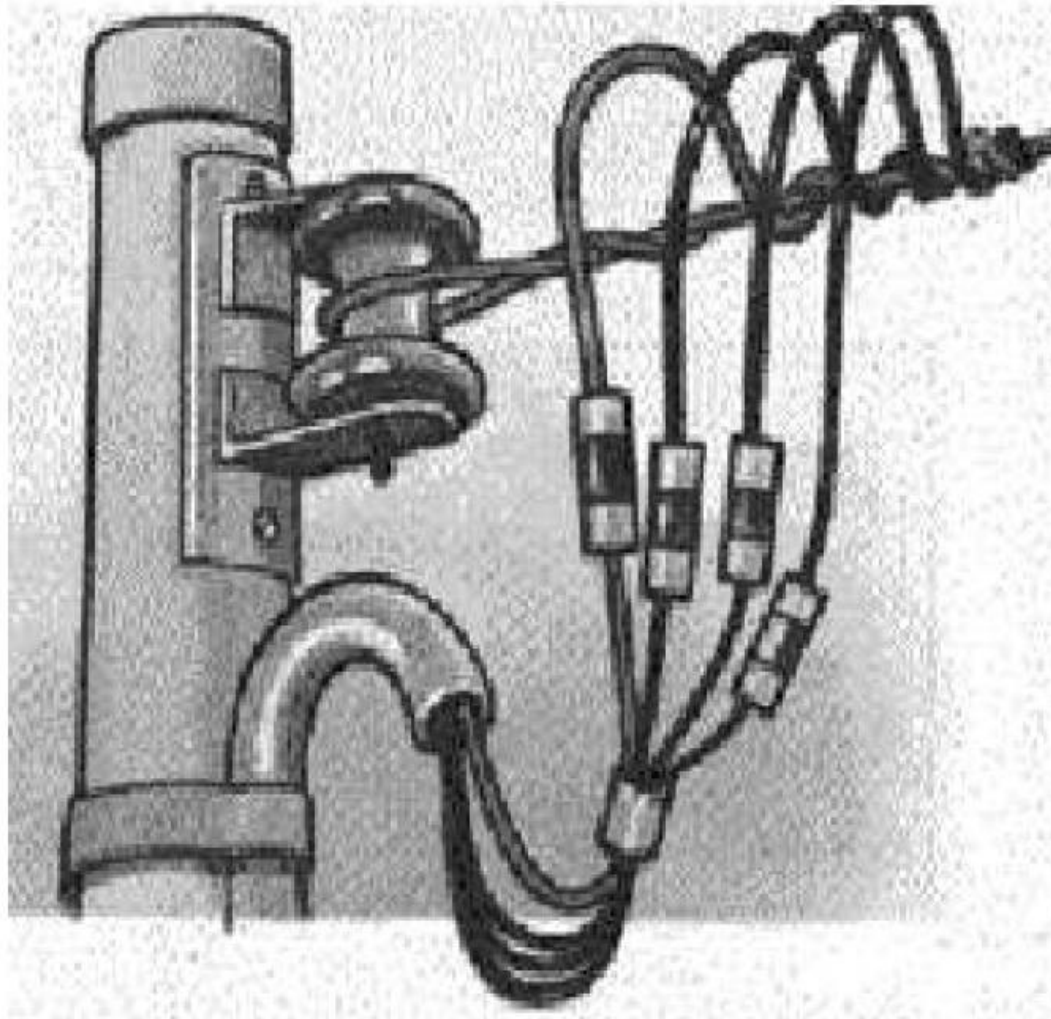
- Nas áreas de concessão das empresas do estado de São Paulo, tem-se três tipos de atendimento:



2 Fases e Neutro

Ligações domiciliares (3/3)

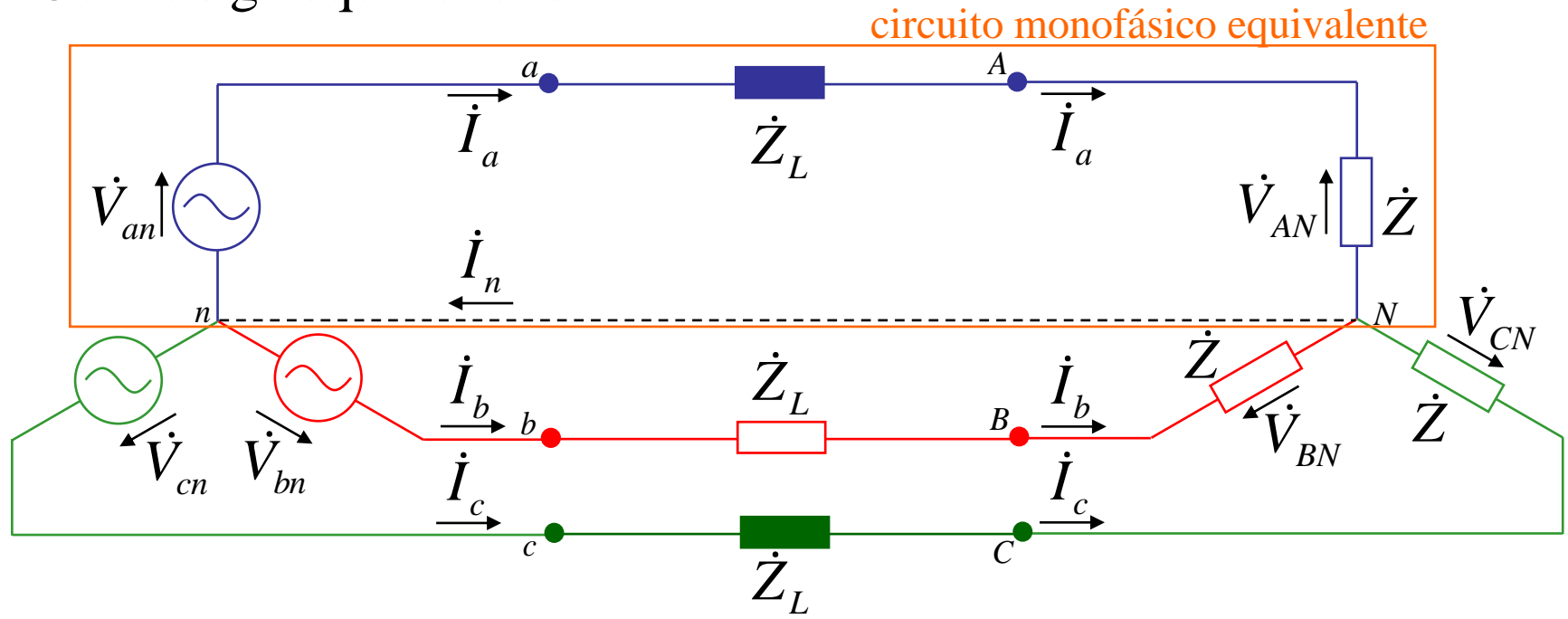
- Nas áreas de concessão das empresas do estado de São Paulo, tem-se três tipos de atendimento:



3 Fases e Neutro

Sistemas trifásicos simétricos e equilibrados (1/3)

■ Com carga equilibrada



■ Os centros-estrelas $n - N$ estão ao mesmo potencial.

■ A corrente pelo condutor neutro

$$\dot{I}_n = \dot{I}_a + \dot{I}_b + \dot{I}_c = 0$$

■ Um circuito monofásico equivalente.

Potência em sistemas trifásicos (1/7)

- A potência aparente complexa monofásica é dada por:

$$\dot{S} = \dot{V} \dot{I}^*$$

- Nos circuitos trifásicos, a potência aparente total é a soma das potências aparentes individuais das três fases:

$$\dot{S}_{3\phi} = 3 \dot{V}_F \dot{I}_F^*$$

Esta expressão nos dá a potência trifásica em função dos valores de fase

- Em termos retangulares temos:

$$\dot{S}_{3\phi} = P_{3\phi} \pm j Q_{3\phi}$$

Potência em sistemas trifásicos (2/7)

■ Em corrente alternada, definem-se as seguintes potências:

■ Potência aparente $S = 3V_{an} I_a (VA)$

■ Potência ativa $P = 3V_{an} I_a \cos \varphi (W)$

■ Potência reativa $Q = 3V_{an} I_a \sin \varphi (VAr)$

■ Em termos retangulares temos:

$$\dot{S}_{3\phi} = P_{3\phi} \pm Q_{3\phi}$$

Potência em sistemas trifásicos (3/7)

- Usando os valores de tensão e corrente de linha.

Ligação em Estrela

$$I_{AN} = I_A ; V_{AN} = \frac{V_{AB}}{\sqrt{3}}$$

$$S = \sqrt{3}V_{AB}I_A$$

$$P = \sqrt{3}V_{AB}I_A \cos \varphi$$

$$Q = \sqrt{3}V_{AB}I_A \sin \varphi$$

Ligação em Triângulo

$$I_{AN} = \frac{I_A}{\sqrt{3}} ; V_{AN} = V_{AB}$$

$$S = \sqrt{3}V_{AB}I_A$$

$$P = \sqrt{3}V_{AB}I_A \cos \varphi$$

$$Q = \sqrt{3}V_{AB}I_A \sin \varphi$$

- Num sistema simétrico e equilibrado com carga equilibrada (qualquer que seja o tipo de ligação) as fórmulas de potência ativa, reativa e aparente são as mesmas.
- O fator de potência de uma carga trifásica equilibrada é o cosseno do ângulo de defasagem entre a tensão e a corrente numa fase.