

Aula 01 – Apresentação da disciplina e Introdução

Introdução

Conteúdo:

Circuitos trifásicos: definições. Circuitos trifásicos equilibrados. Circuitos trifásicos desequilibrados. Medidas de potências ativas e reativas em circuitos polifásicos. Representação de sistemas elétricos de potência.

Referências Bibliográficas:

1 – ROBBA, J. E. Introdução a sistemas elétricos de potência - componentes simétricos. Edgard Blucher Ltda., 2000.

2 - CASTRO. C.A.; TANAKA, M. R. Circuitos de Corrente Alternada: Um Curso Introdutório.

Introdução

Avaliações:

- 1ª Prova: 02/04 às 10h (30 pontos);
- 2ª Prova: 14/05 às 10h (30 pontos);
- 3ª Prova: 25/06 às 10h (30 pontos);
- 2 Testes - 10 pontos.

AULAS PRÁTICAS (ELT 229):

- Levar notebook (quem tiver) com o matlab/simulink instalado!

Os relatórios serão feitos durante as aulas práticas, ao final do experimento (simulação ou ensaios).

Introdução

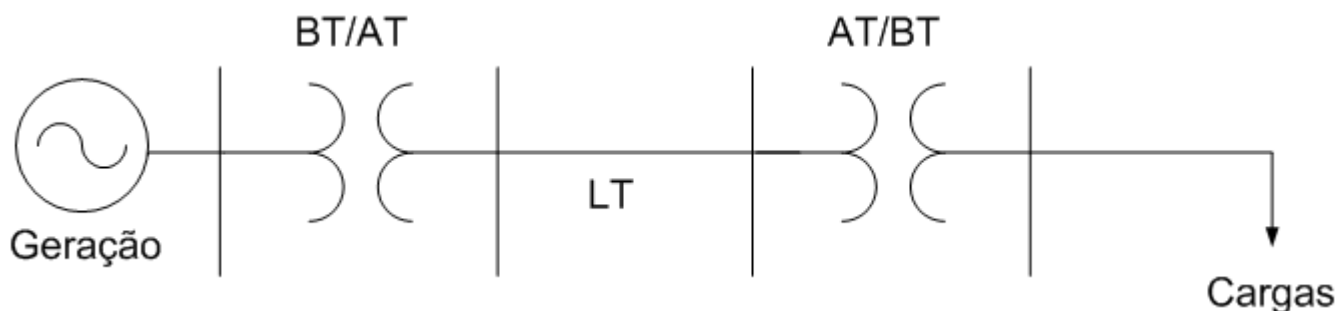
Introdução

As Linhas de Transmissão surgiram no final do século XIX, destinavam para iluminação e acionamentos de motores CC;

Depois foram substituídas por linhas monofásicas CA, devido:

- Uso de transformadores, que possibilitaram transmissão de energia em níveis de tensão muito maiores, reduzindo as perdas e permitindo a transmissão em longas distâncias;
- Surgimento de motores e geradores CA, construtivamente mais baratos que as CC;

Dentre os sistemas CA, o trifásico tornou-se o mais conveniente, por razões técnicas e econômicas.



Introdução

O Sistema Elétrico de Potência (SEP) é predominantemente **trifásico**, por razões técnicas e econômicas:

- Condutores de menor diâmetro podem ser usados para transmitir a mesma potência à mesma tensão, o que reduz os custos de instalação e manutenção das linhas.

$$P_{3\phi} = \sqrt{3}VI \cos \theta$$

$$P_{1\phi} = VI \cos \theta$$

- Linhas mais leves são mais fáceis de instalar, sendo que as torres de sustentação podem ser mais delgadas e mais espaçadas.
- Um motor trifásico é menor que seu correspondente monofásico de mesma potência;

É fácil notar pelas expressões acima que, para a mesma potência a ser transferida, na mesma tensão, a corrente é $\sqrt{3}$ vezes menor, correspondendo a cerca de 25% menos a quantidade de cobre necessário nas linhas de transmissão

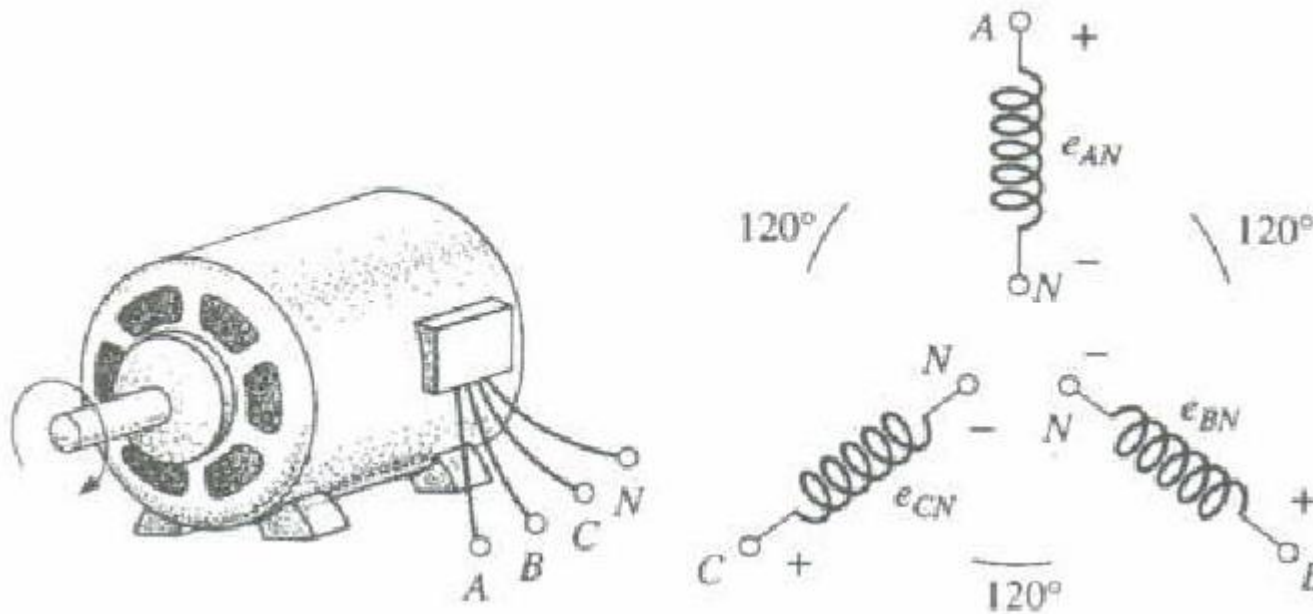
Introdução

O Sistema Elétrico de Potência (SEP) é predominantemente **trifásico**, por razões técnicas e econômicas:

- Motores trifásicos, devido ao campo girante produzido pelas três fases, partem sem a necessidade de dispositivos especiais. Já o campo pulsante dos motores monofásicos exige um enrolamento extra de partida;
- Motores trifásicos produzem um torque constante, o que não é possível nos motores monofásicos; Assim, são menos sujeitos a vibrações.
- A potência instantânea total, em um sistema trifásico equilibrado é constante, ou seja, não varia no tempo. No sistema monofásico anula-se sempre que a tensão ou a corrente passam pelo zero (os motores monofásicos só continuam girando graças à inércia);

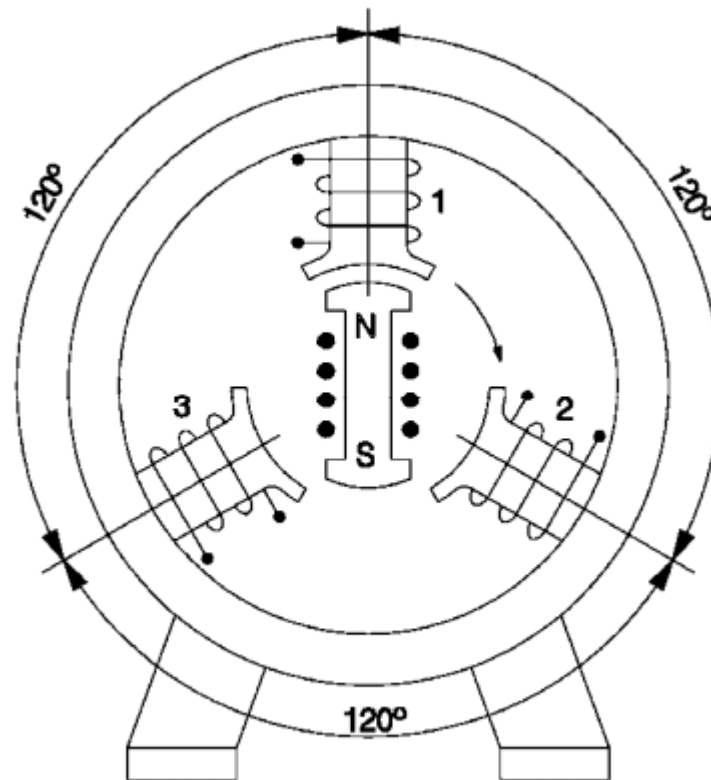
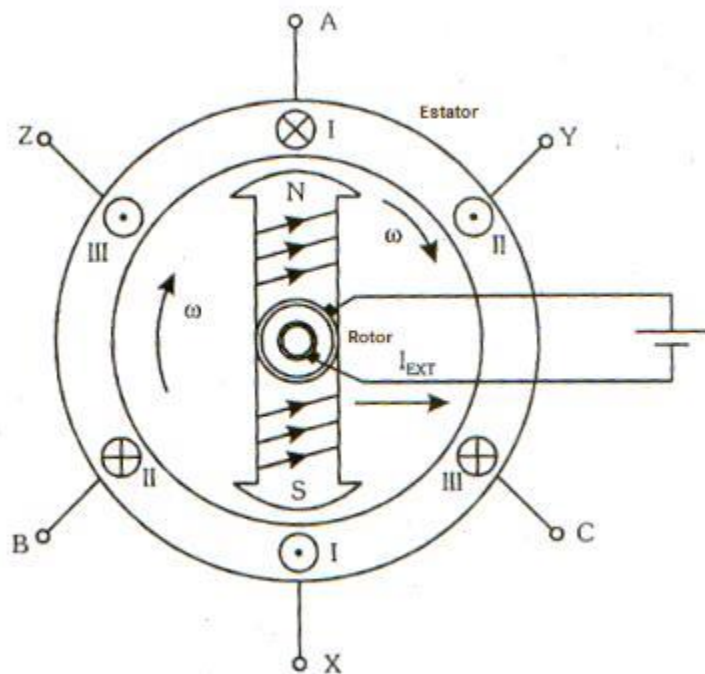
Geração Trifásica

No Brasil, a energia elétrica é gerada em corrente alternada no sistema trifásico, na frequência de 60 Hz. Nesse sistema, utiliza-se um gerador CA, constituído por um rotor girando no centro de um sistema fixo de três bobinas (estator) colocadas a 120° uma da outra.



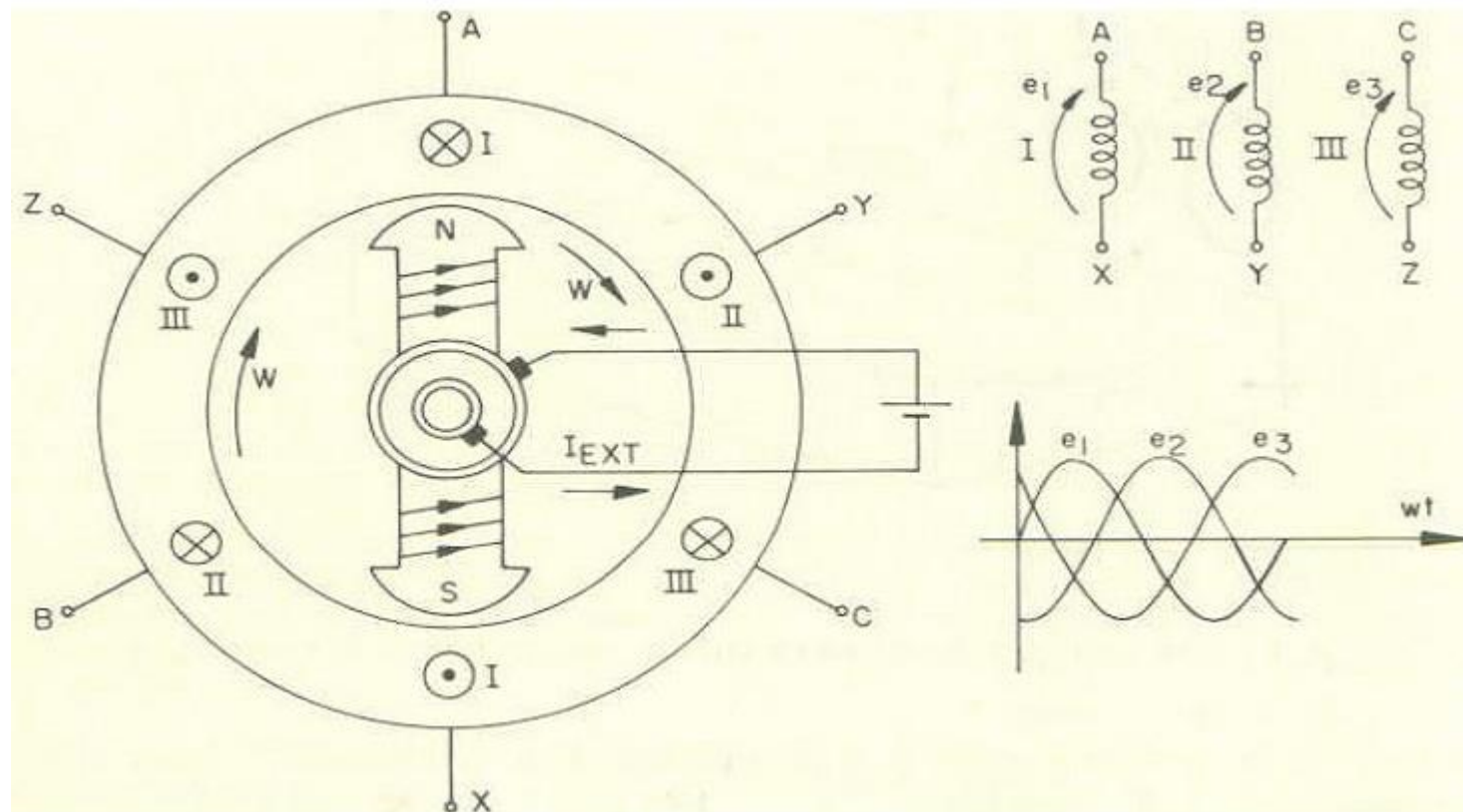
Geração Trifásica

No Brasil, a energia elétrica é gerada em corrente alternada no sistema trifásico, na frequência de 60 Hz. Nesse sistema, utiliza-se um gerador CA, constituído por um rotor girando no centro de um sistema fixo de três bobinas (estator) colocadas a 120° uma da outra.

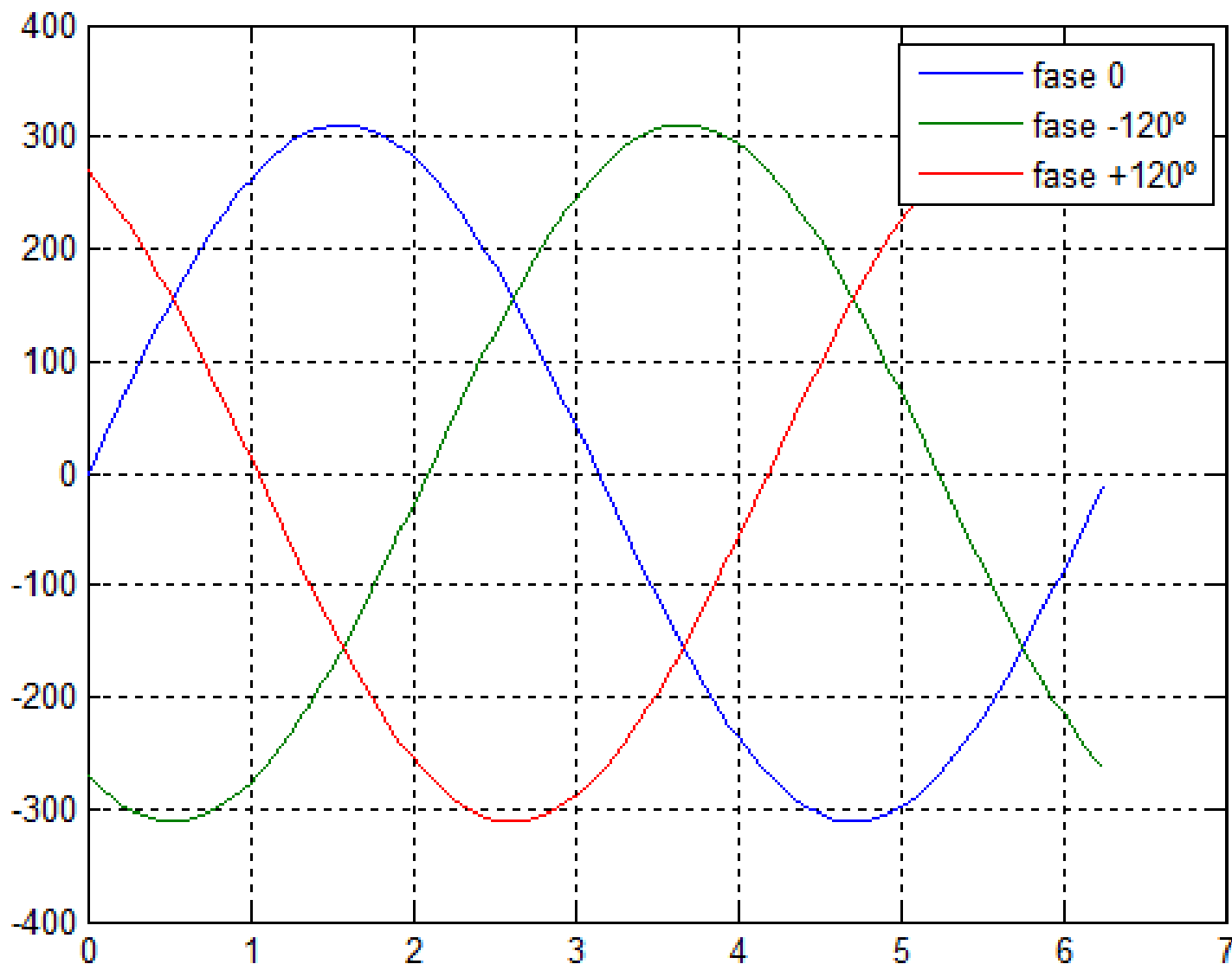


Geração Trifásica

Um ciclo completo de corrente alternada corresponde a 360° , ou seja, uma volta completa do rotor. Por isso, as três tensões alternadas monofásicas produzidas por um gerador trifásico estão defasadas entre si de 120° elétricos ou $1/3$ do ciclo.

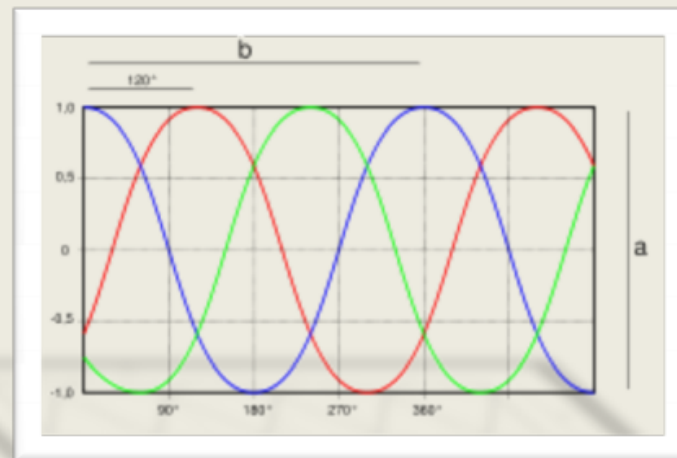


Num gráfico, as tensões das bobinas I, II e III fornecem a seguinte configuração:



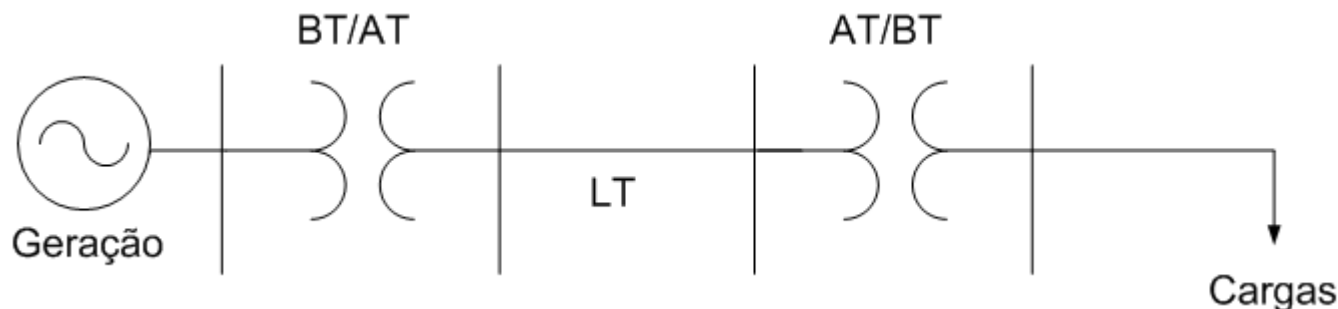
- Sistema de Tensões Trifásico Simétrico:

- Sistema trifásico em que as tensões nos terminais dos geradores são senoidais
 - ✦ de mesmo valor máximo
 - ✦ defasadas entre si de $2\pi/3$ rad ou 120° elétricos

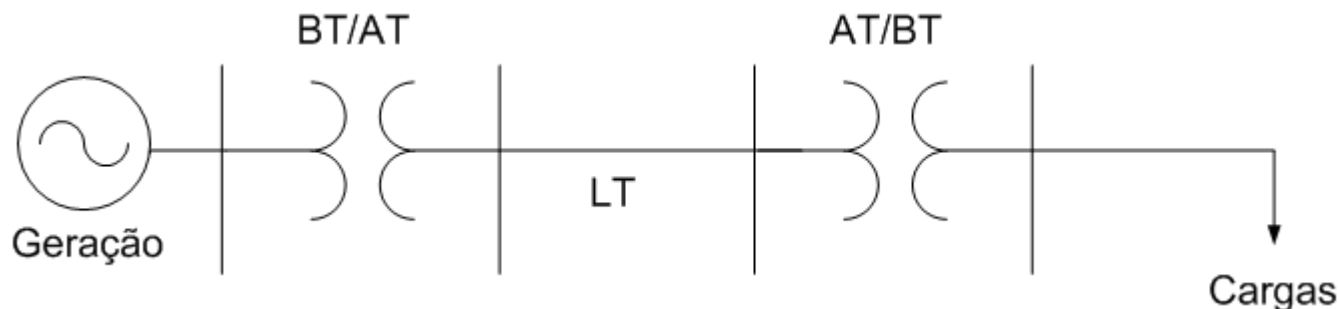


- Sistema de Tensões Trifásico Assimétrico:

- Sistema trifásico em que as tensões nos terminais dos geradores não atendem a pelo menos uma das condição acima



- **Linha (ou Rede) Trifásica Equilibrada:**
 - Linha (ou rede) trifásica, constituída por 3 ou 4 fios ($3F+N$), na qual se verificam as seguintes relações:
 - ✦ Impedância própria dos fios iguais entre si,
 - ✦ Impedância mútua entre os fios iguais entre si,
 - ✦ Impedância mútua entre os fios de fase e o de retorno (N) iguais.
- **Linha (ou Rede) Trifásica Desequilibrada:**
 - Linha (ou rede) trifásica, constituída por 3 ou 4 fios ($3F+N$), na qual não se verifica uma das relações acima.



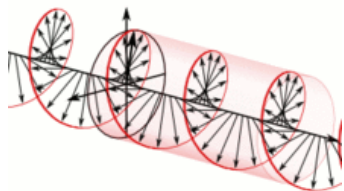
Definições – Indutância própria e mútua

A passagem de corrente em um condutor é acompanhada de campos magnéticos em suas proximidades.

$$L = N \frac{\phi}{i}$$

$$\lambda = L \cdot i$$

Se uma corrente i em uma bobina variar com o tempo uma fem é induzida na bobina, a este fenômeno é a autoindução. Encontramos a fem induzida com a seguinte equação.

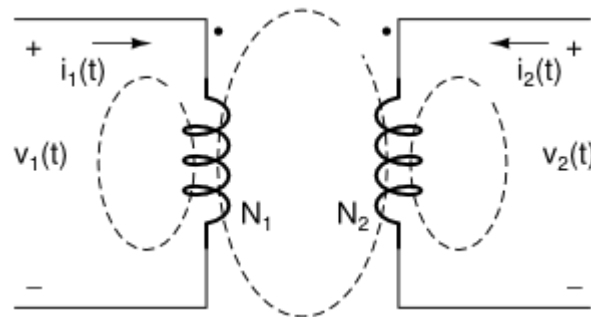


$$\mathcal{E} = -L \frac{di}{dt}$$

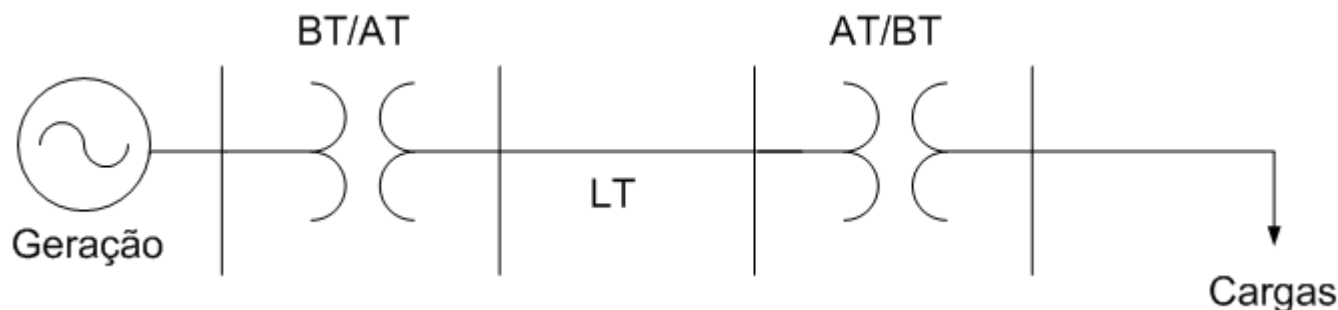
Podemos ter **duas bobinas próximas** (como ocorre em transformadores) uma da outra e quando isso ocorre, uma corrente variável em uma delas pode induzir uma fem na outra. Esta **indução mútua** é descrita por

$$\mathcal{E} = -M \frac{di}{dt}$$

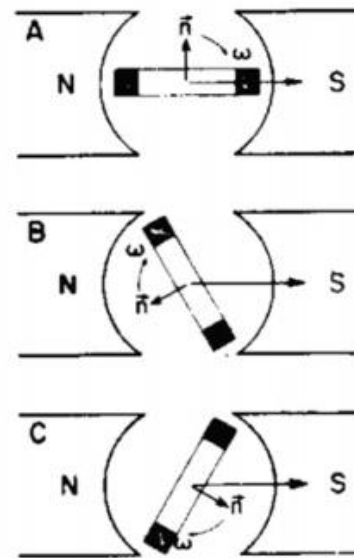
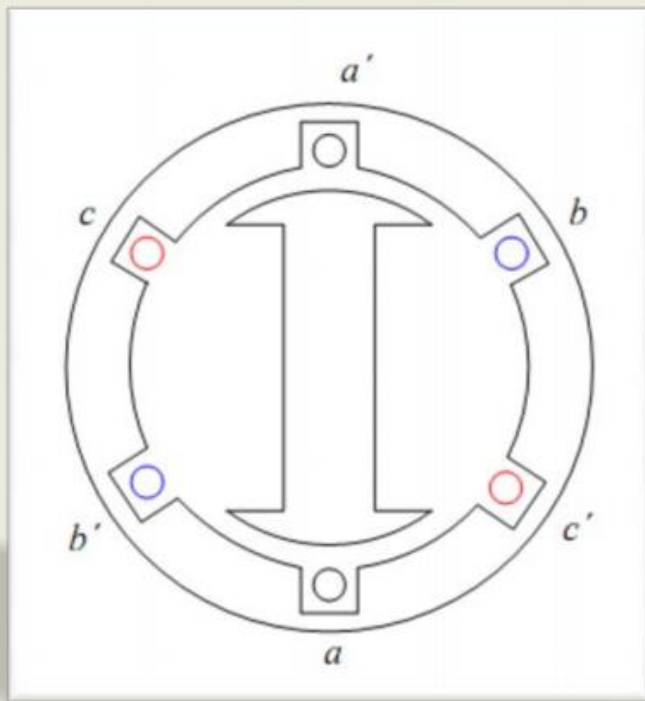
Onde M é a indutância mútua para o conjunto das bobinas.



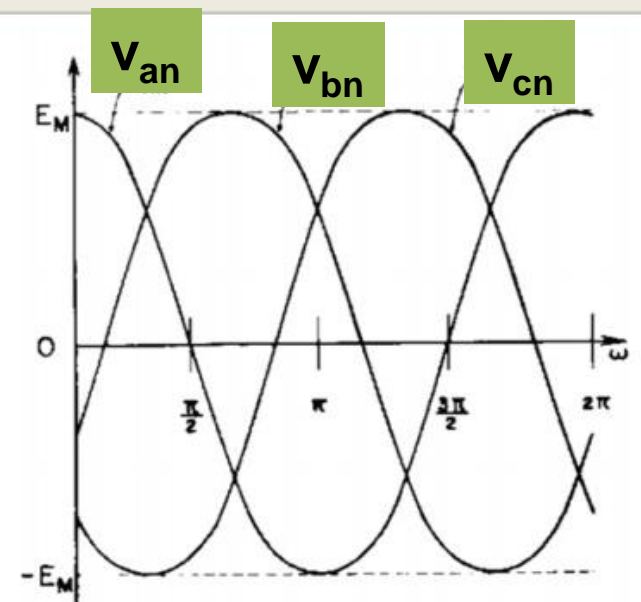
- **Carga Trifásica Equilibrada:**
 - Carga constituída por 3 elementos (impedância complexa) iguais ligados em estrela (Y) ou triângulo (delta).
- **Carga Trifásica Desequilibrada:**
 - Carga na qual não se verifica a condição descrita acima



- Ordem pela qual as tensões de fase passam pelo máximo



(a) - Posições do rotor



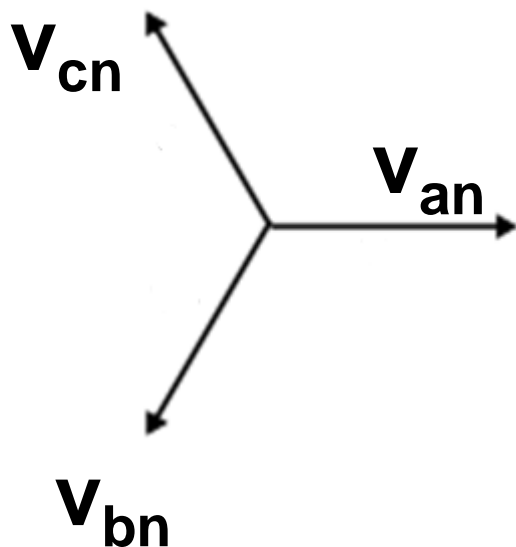
(b) - Valores instantâneos das tensões

Sequência direta ou positiva ou abc:

$$v_{an}(t) = V_M \text{sen}(\omega t)$$

$$v_{bn}(t) = V_M \text{sen}(\omega t - 120^\circ)$$

$$v_{cn}(t) = V_M \text{sen}(\omega t - 240^\circ) = V_M \text{sen}(\omega t + 120^\circ)$$



$$\dot{V}_{an} = V_M \underline{0^\circ}$$

$$\dot{V}_{bn} = V_M \underline{-120^\circ}$$

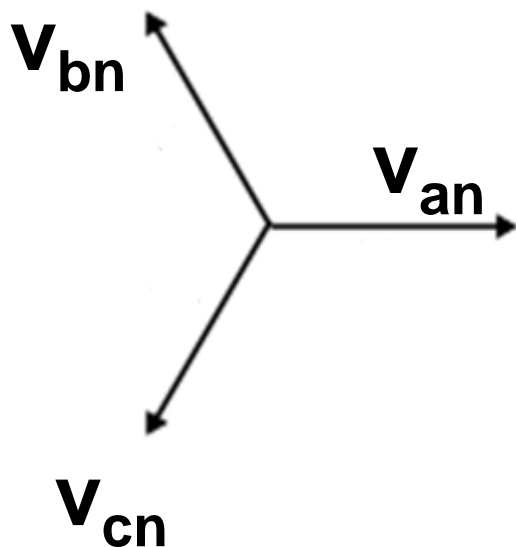
$$\dot{V}_{cn} = V_M \underline{120^\circ}$$

Sequência inversa ou negativa ou acb:

$$v_{an}(t) = V_M \text{sen}(\omega t)$$

$$v_{bn}(t) = V_M \text{sen}(\omega t + 120^\circ)$$

$$v_{cn}(t) = V_M \text{sen}(\omega t - 120^\circ)$$



$$\dot{V}_{an} = V_M \underline{0^\circ}$$

$$\dot{V}_{bn} = V_M \underline{120^\circ}$$

$$\dot{V}_{cn} = V_M \underline{-120^\circ}$$

$$\alpha = 1 \angle 120^\circ = -\frac{1}{2} + j\frac{\sqrt{3}}{2}$$

Fazendo a potenciação de α :

$$\alpha^1 = 1 \angle 120^\circ$$

$$\alpha^2 = \alpha \cdot \alpha = 1 \angle -120^\circ$$

$$\alpha^3 = 1 \angle 0^\circ$$

$$\alpha^4 = \alpha^1 = 1 \angle 120^\circ$$

$$\alpha^5 = \alpha^2 = 1 \angle -120^\circ$$

$$\alpha^6 = \alpha^3 = 1 \angle 0^\circ$$

$$\alpha^0 = 1 \angle 0^\circ$$

$$\alpha^{-1} = 1 \angle -120^\circ$$

$$\alpha^{-2} = 1 \angle 120^\circ$$

$$\alpha^{-3} = \alpha^0 = 1 \angle 0^\circ$$

- Genericamente:

$$\alpha^{3n} = \alpha^0 = 1 \angle 0^\circ$$

$$\alpha^{-3n} = \alpha^0 = 1 \angle 0^\circ$$

$$\alpha^{3n+1} = \alpha^1 = 1 \angle 120^\circ$$

$$\alpha^{-(3n+1)} = \alpha^2 = 1 \angle -120^\circ$$

$$\alpha^{3n+2} = \alpha^2 = 1 \angle -120^\circ$$

$$\alpha^{-(3n+2)} = \alpha^1 = 1 \angle 120^\circ$$

✦ Onde $n=0, 1, 2, 3, \dots$ (inteiro positivo)

- Propriedade:

$$\alpha^0 + \alpha^1 + \alpha^2 = 1 + \alpha + \alpha^2 =$$

$$\alpha^0 + \alpha^1 + \alpha^2 = 1 \angle 0^\circ + 1 \angle 120^\circ + 1 \angle -120^\circ =$$

$$\alpha^0 + \alpha^1 + \alpha^2 = 0$$

Sequências

Sequência nula ou zero:

$$\mathbf{V}_0 = \begin{bmatrix} \dot{V}_0 \\ \dot{V}_0 \\ \dot{V}_0 \end{bmatrix} = \dot{V}_0 \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \\ 1 \end{bmatrix} = \dot{V}_0 \mathbf{S}_0, \quad \text{com } \mathbf{S}_0 = \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \\ 1 \end{bmatrix}$$

$$\begin{aligned} \alpha^0 &= 1 \angle 0^\circ \\ \alpha^1 &= 1 \angle 120^\circ \\ \alpha^2 &= 1 \angle -120^\circ \end{aligned}$$

Sequência positiva ou direta:

$$\begin{aligned} \dot{V}_A &= \dot{V}_1 \\ \dot{V}_B &= \alpha^2 \dot{V}_A \quad \text{e} \quad \dot{V}_C = \alpha \dot{V}_A \end{aligned}$$

$$\mathbf{V}_1 = \begin{bmatrix} \dot{V}_1 \\ \alpha^2 \dot{V}_1 \\ \alpha \dot{V}_1 \end{bmatrix} = \dot{V}_1 \begin{bmatrix} 1 \\ \alpha^2 \\ \alpha \end{bmatrix} = \dot{V}_1 \mathbf{S}_1, \quad \text{com } \mathbf{S}_1 = \begin{bmatrix} 1 \\ \alpha^2 \\ \alpha \end{bmatrix}$$

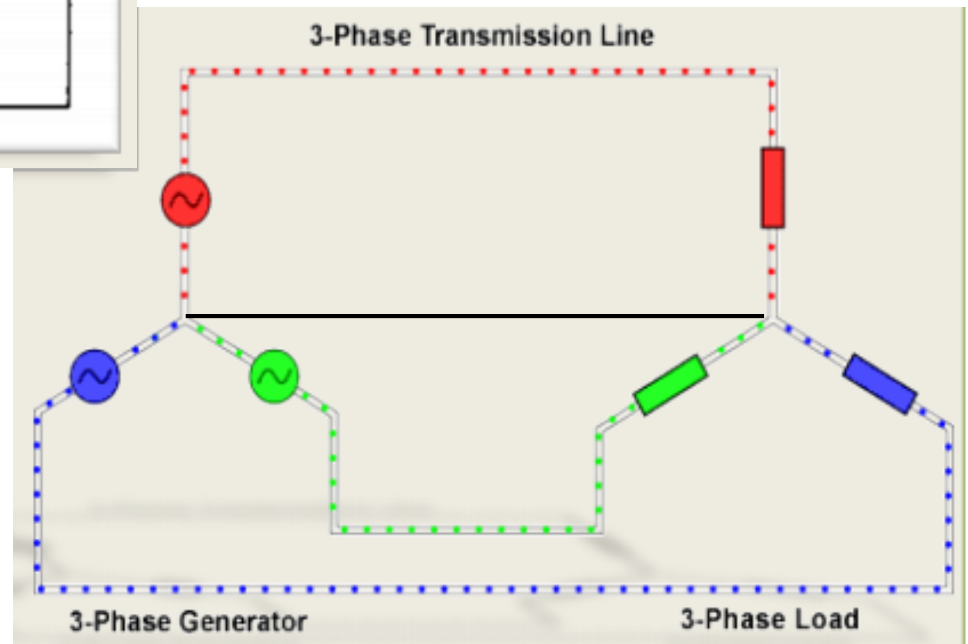
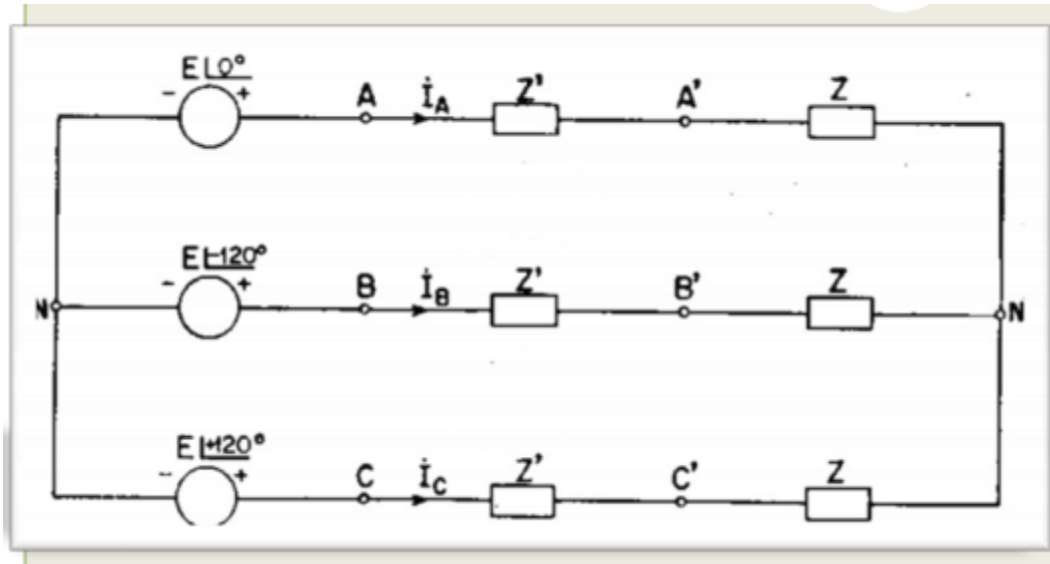
Sequência negativa:

$$\begin{aligned} \dot{V}_B &= \alpha \dot{V}_A \quad \text{e} \quad \dot{V}_C = \alpha^2 \dot{V}_A \\ \dot{V}_A &= \dot{V}_2 \end{aligned}$$

$$\mathbf{V}_2 = \begin{bmatrix} \dot{V}_2 \\ \alpha \dot{V}_2 \\ \alpha^2 \dot{V}_2 \end{bmatrix} = \dot{V}_2 \begin{bmatrix} 1 \\ \alpha \\ \alpha^2 \end{bmatrix} = \dot{V}_2 \mathbf{S}_2, \quad \text{com } \mathbf{S}_2 = \begin{bmatrix} 1 \\ \alpha \\ \alpha^2 \end{bmatrix}$$

Sistemas Trifásicos Simétricos e Equilibrados com Carga Equilibrada

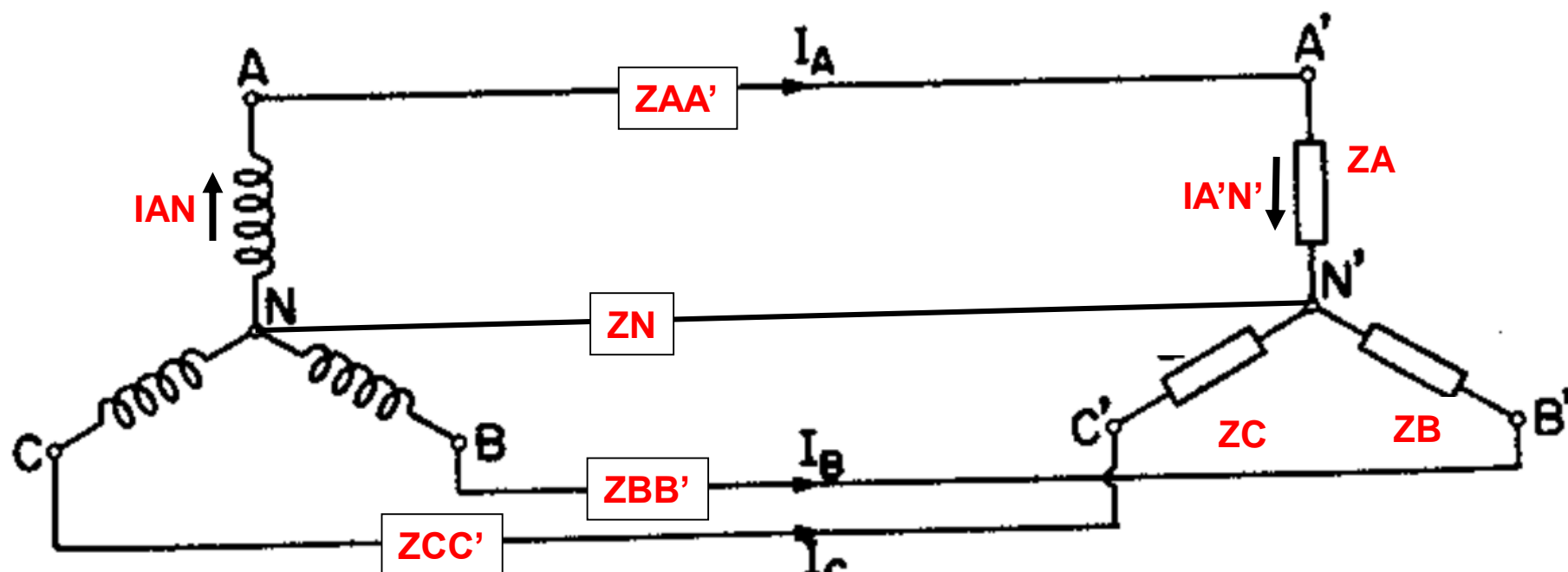
Ligações em Estrela



Sistemas Trifásicos Simétricos e Equilibrados com Carga Equilibrada

Ligações

em Estrela



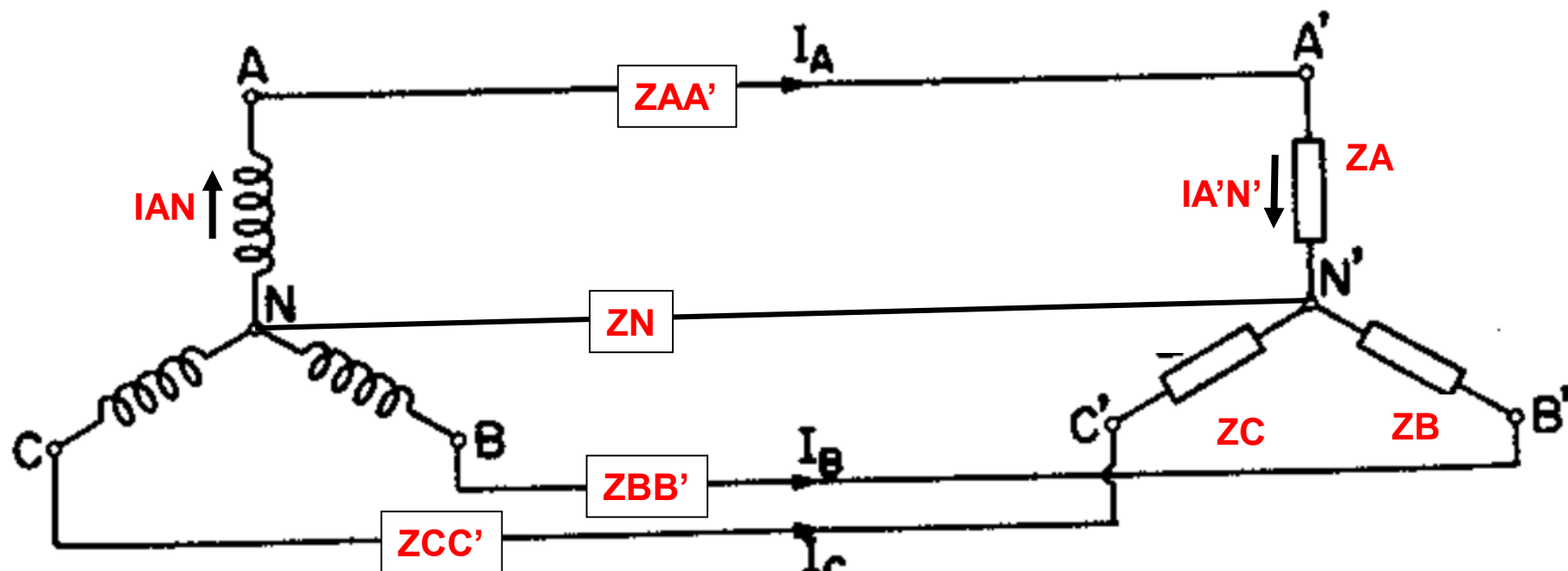
Definições:

- 1 – NN' : fio neutro (quarto fio), também chamado de centro estrela;
- 2 – Tensão de Fase (VF): medida entre o neutro e qualquer um dos terminais do gerador ou carga (V_{AN} , V_{BN} , V_{CN} , $V_{A'N'}$, $V_{B'N'}$, $V_{C'N'}$);
- 3 – Corrente de Fase (IF): corrente que percorre cada uma das bobinas do gerador ou que percorre uma das impedâncias da carga (I_{AN} , I_{BN} , I_{CN} , $I_{A'N'}$, $I_{B'N'}$, $I_{C'N'}$);

Sistemas Trifásicos Simétricos e Equilibrados com Carga Equilibrada

Ligações

em
Estrela



Definições:

4 – Tensão de Linha (V_L): medida entre dois terminais do gerador ou carga, exceto o neutro (V_{AB} , V_{BC} , V_{CA} , $V_{A'B'}$, $V_{B'C'}$, $V_{C'A'}$);

5 – Corrente de Linha (I_L): corrente que percorre os condutores que interligam o gerador à carga (I_A , I_B , I_C)