

---

# Instalações Elétricas Prediais e Industriais I – (TE344)

## Aula 2 - Circuitos Trifásicos

---

PROF. DR. SEBASTIÃO RIBEIRO JÚNIOR

# Circuito Trifásico

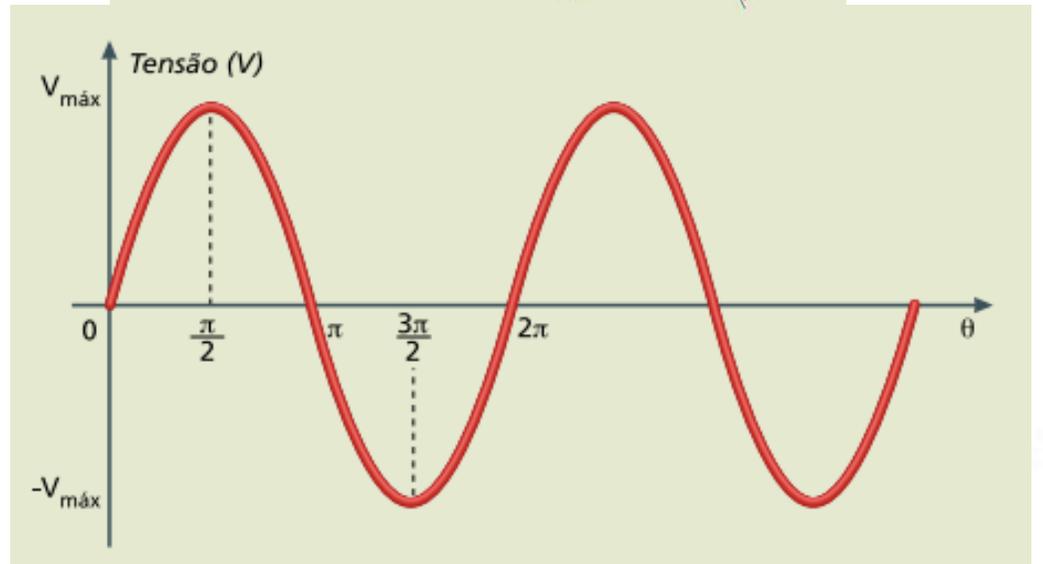
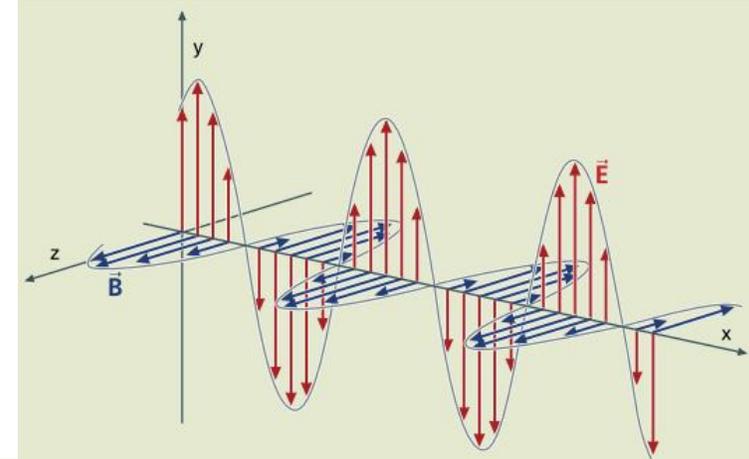
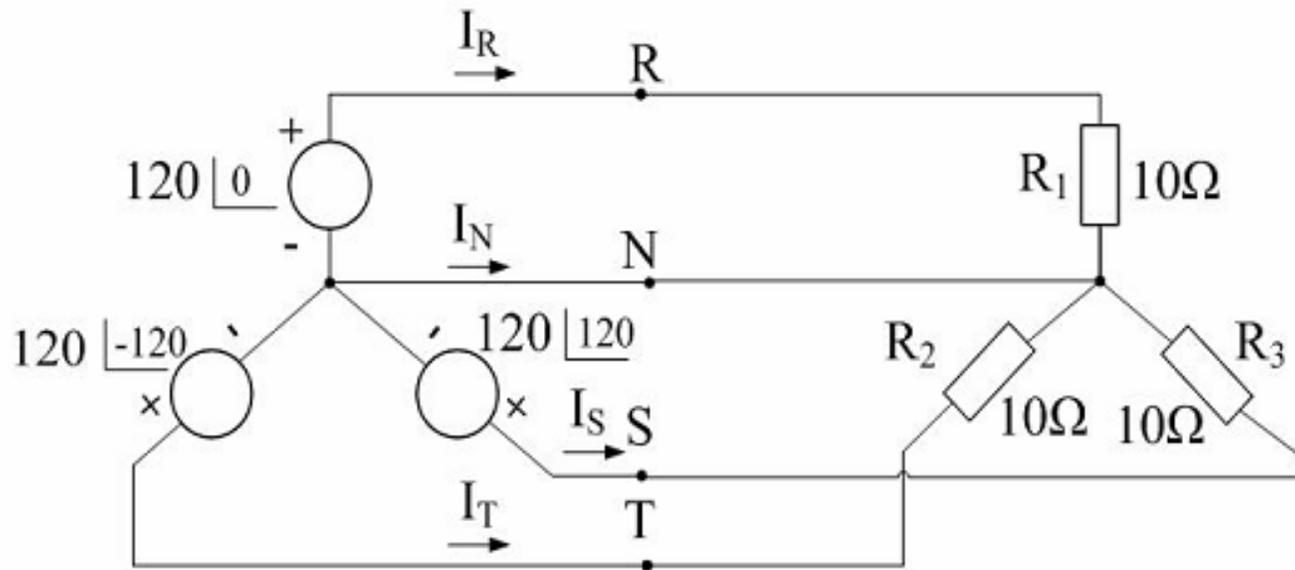
---

## Sistema Elétrico de potência - SEP



# Circuito Trifásico

- Fontes defasadas em  $120^\circ$ :



# Circuito Trifásico

- Monofásico / Trifásico

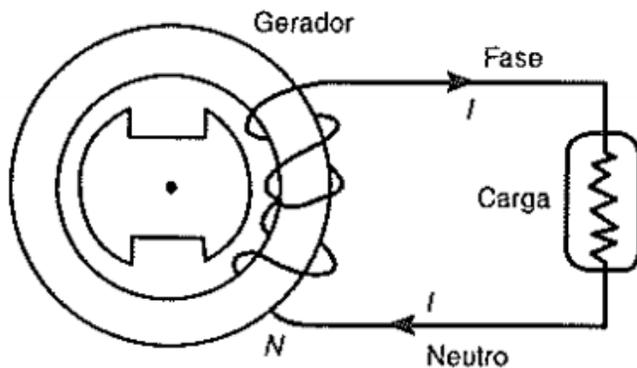


Fig. 2.44 Gerador monofásico.

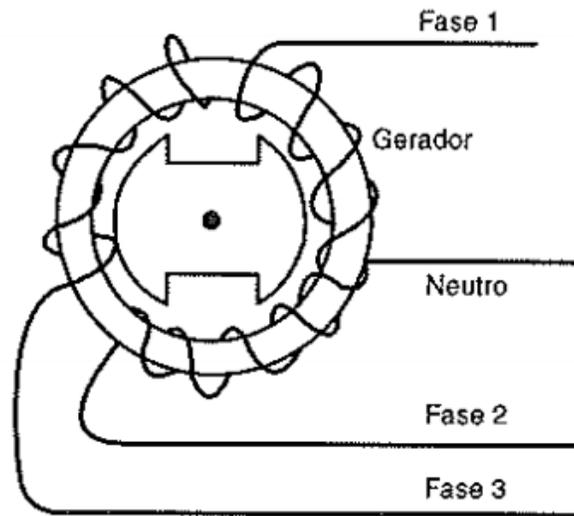
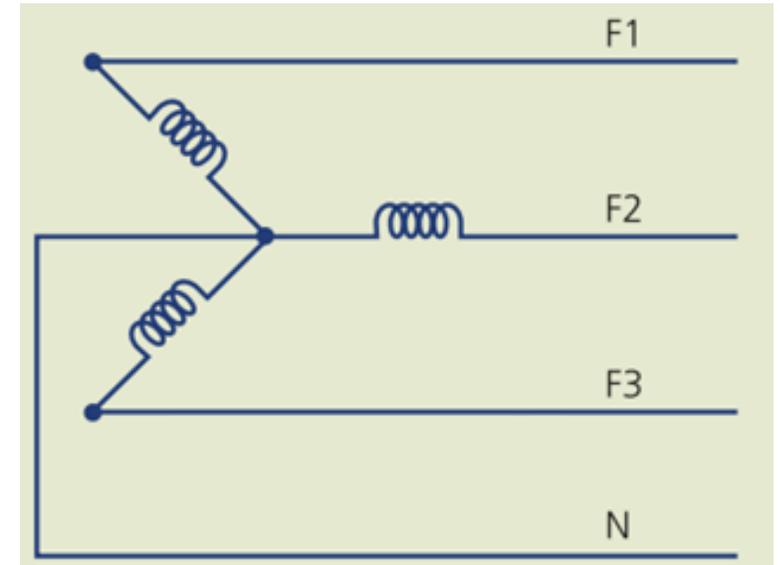


Fig. 2.45 Gerador trifásico.



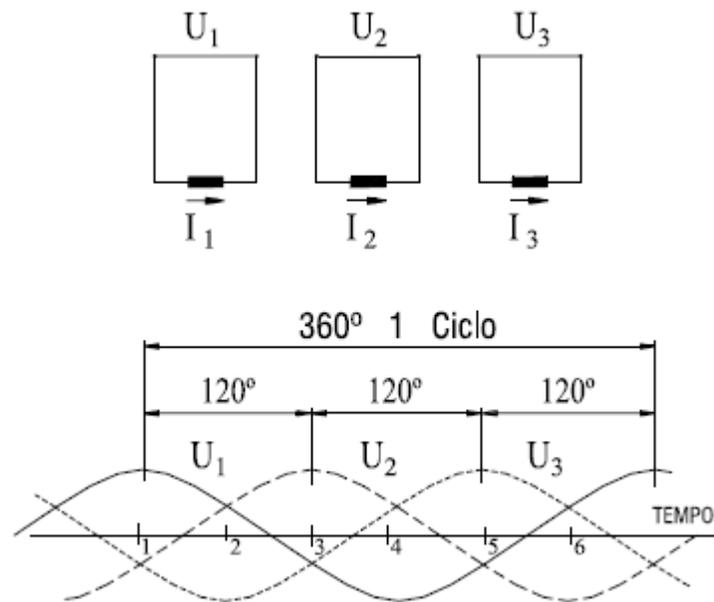
Máquinas síncrona - Tem sua rotação fixa (sincronizada) ou seja a rotação e a frequência trabalham em sincronismo

# Sistema de Corrente Alternada Trifásica

O sistema trifásico é formado pela associação de **três sistemas monofásicos** de tensões  $U_1$ ,  $U_2$  e  $U_3$  tais que a defasagem entre elas seja de  $120^\circ$

Os “atrasos” de  $U_2$  em relação a  $U_1$ , de  $U_3$  em relação a  $U_2$  e de  $U_1$  em relação a  $U_3$  sejam iguais a  $120^\circ$  (considerando um ciclo completo= $360^\circ$ ).

O **sistema é equilibrado**, isto é, as três tensões têm o mesmo valor eficaz  $U_1 = U_2 = U_3$ .



# Sistema de Corrente Alternada Trifásica

---

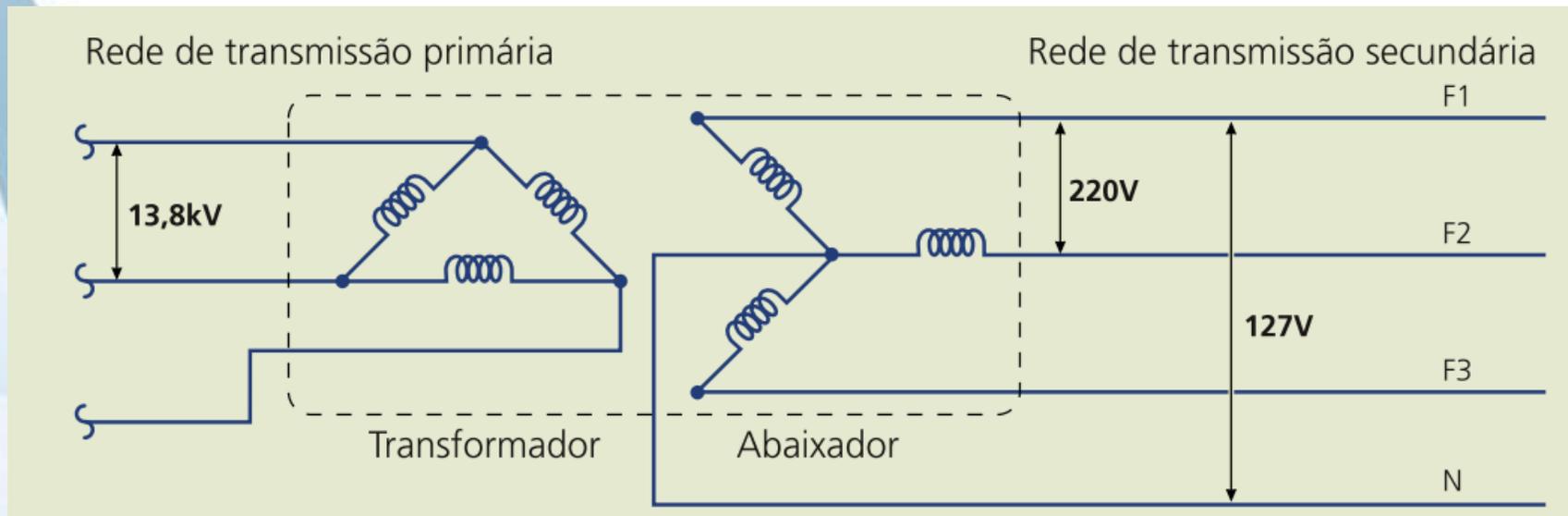
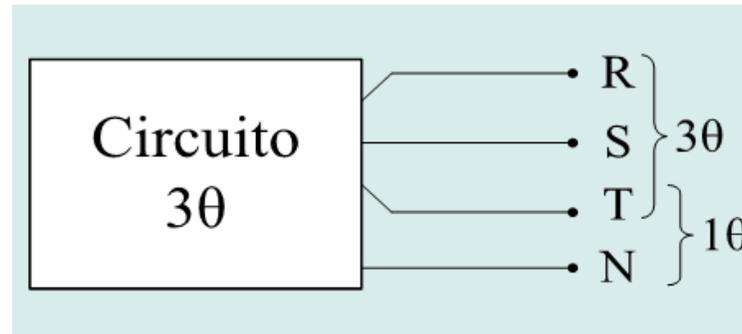
Ligando entre si os três sistemas monofásicos e eliminando os fios desnecessários, teremos um sistema trifásico: três tensões  $U_1$ ,  $U_2$  e  $U_3$  equilibradas, defasadas entre si de  $120^\circ$  e aplicadas entre os três fios do sistema. A ligação pode ser feita de duas maneiras:

Ligação em TRIÂNGULO

Ligação em ESTRELA

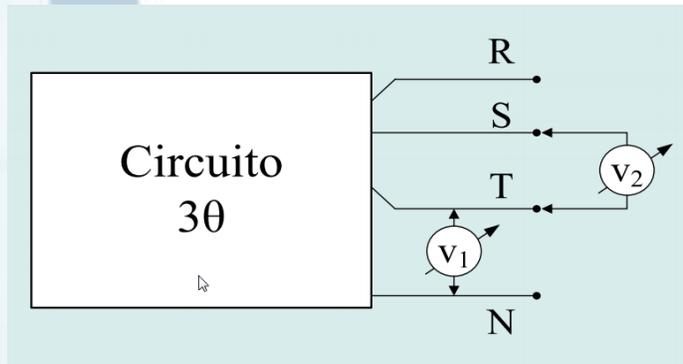
# Circuito Trifásico

Pode ser visto como uma combinação de três circuitos monofásicos:



# Circuito Trifásico

Pode ser visto como uma combinação de três circuitos monofásicos:

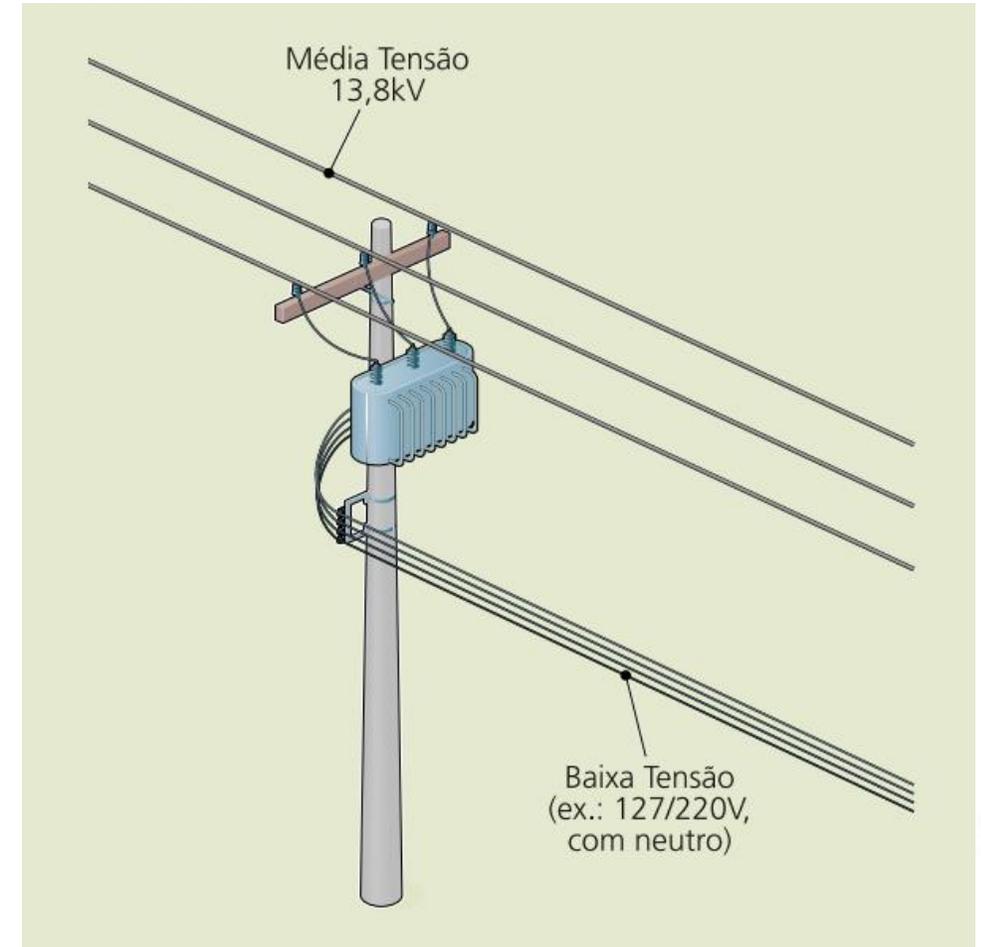


Voltímetro  $V_1 \rightarrow V_{\text{fase}} = V_F: V_T, V_R \text{ e } V_S$

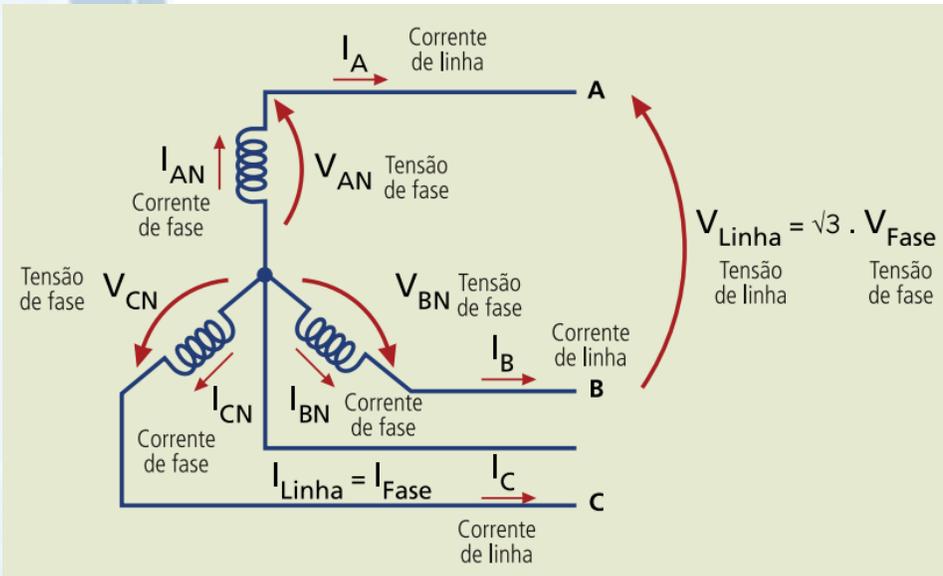
Voltímetro  $V_2 \rightarrow V_{\text{linha}} = V_L: V_{RS}, V_{ST} \text{ e } V_{TR}$

127V (POA), 220V (RS)

220V (POA), 380V (RS)

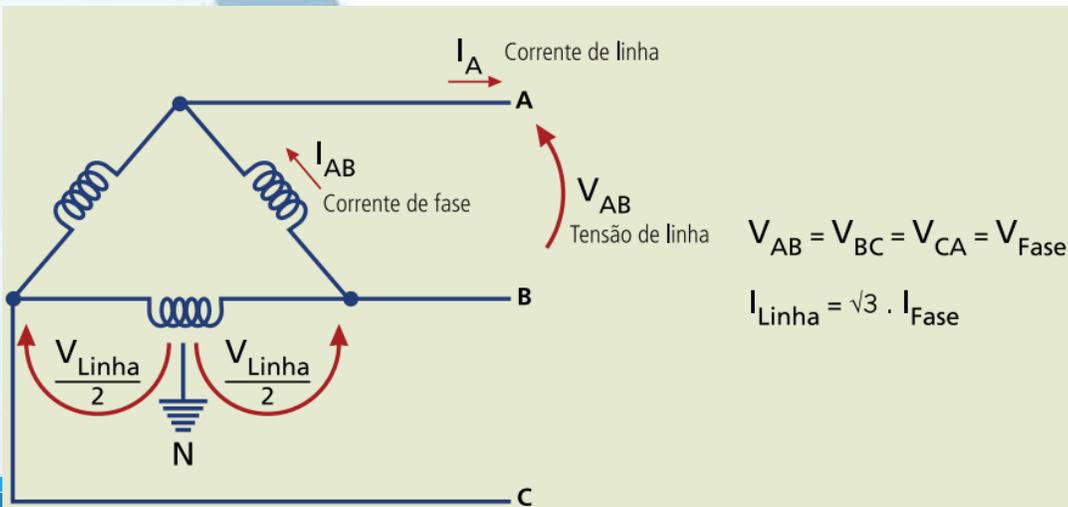


# Circuito Trifásico



## Ligação em Y

Tensão de fase (V)	Tensão de linha (V)
120	208
127	220
220	380
2200	3800
3800	6600
7970	13200



## Ligação em Y

Tensão de fase (V)	Tensão de linha (V)
13200	23000
19900	34500
50800	88000
79600	138000

# Circuito Trifásico

Transformador conversor de 600 kV CC - Furnas - Centrais Elétricas S/A localizada na cidade de Foz do Iguaçu – PR



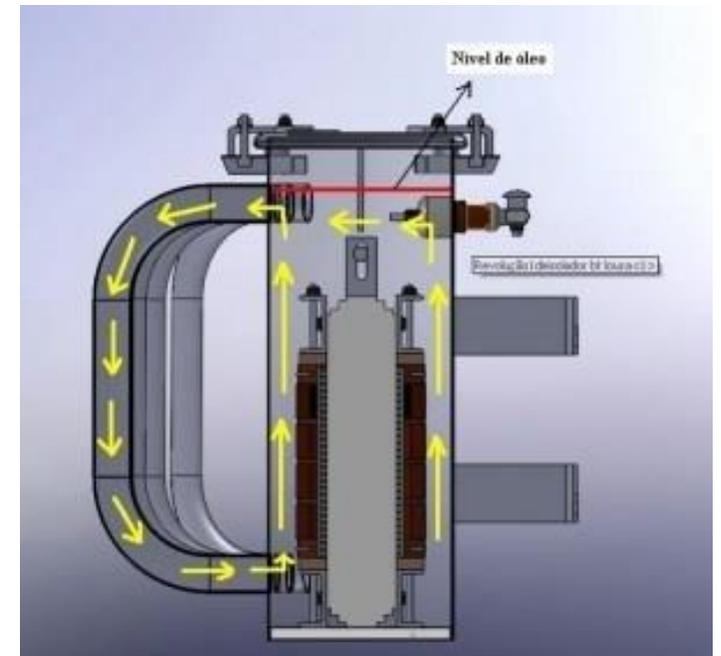
# Circuito Trifásico

Transformador de distribuição



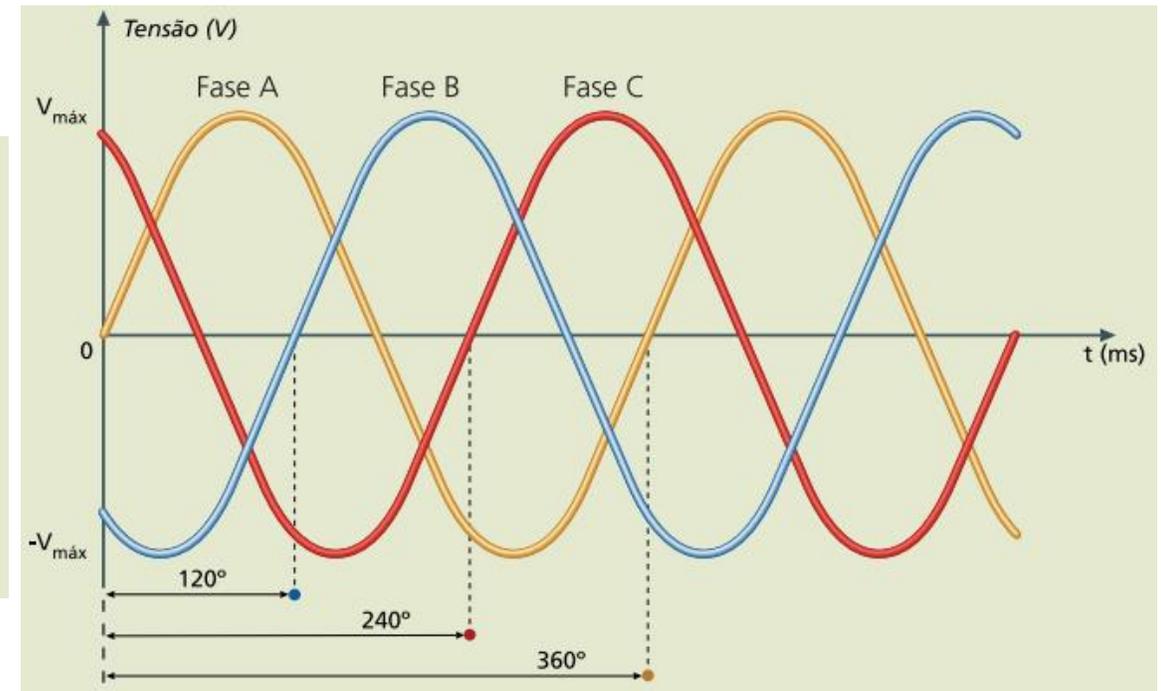
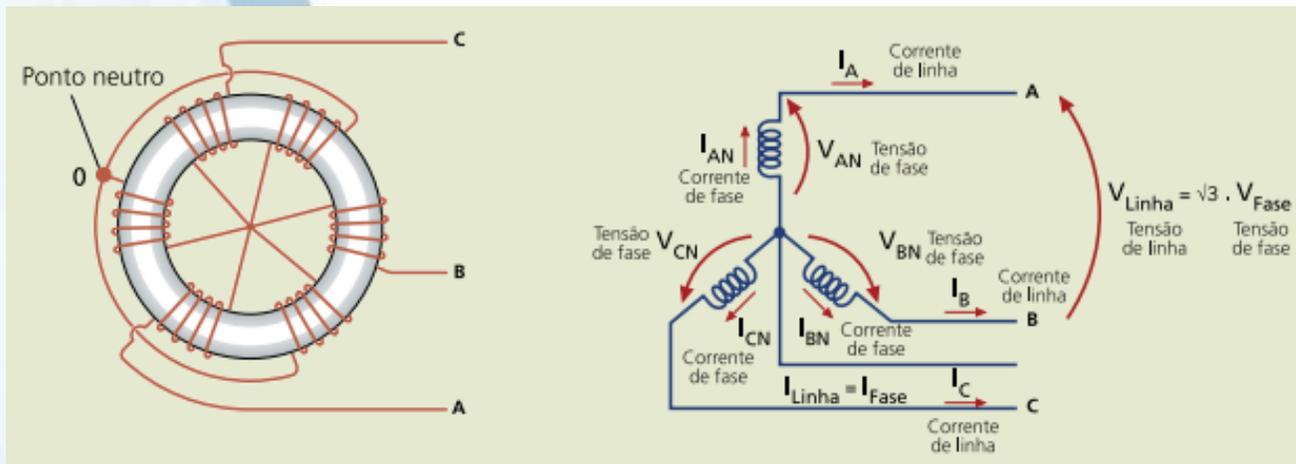
# Circuito Trifásico

Transformador de distribuição



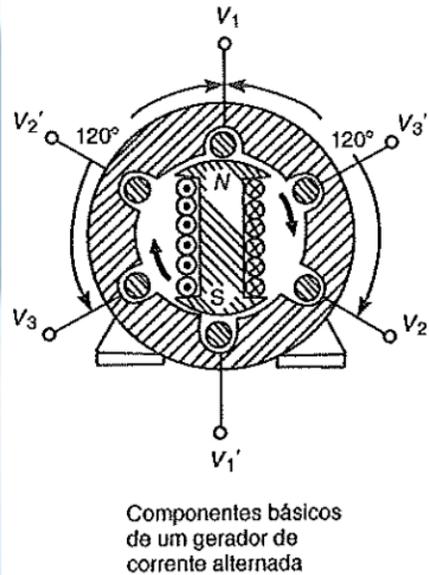
# Circuito Trifásico

A **potência**, geralmente, é fornecida por um gerador de CA que produz 3 tensões iguais, cada uma delas defasada de  $120^\circ$  das demais

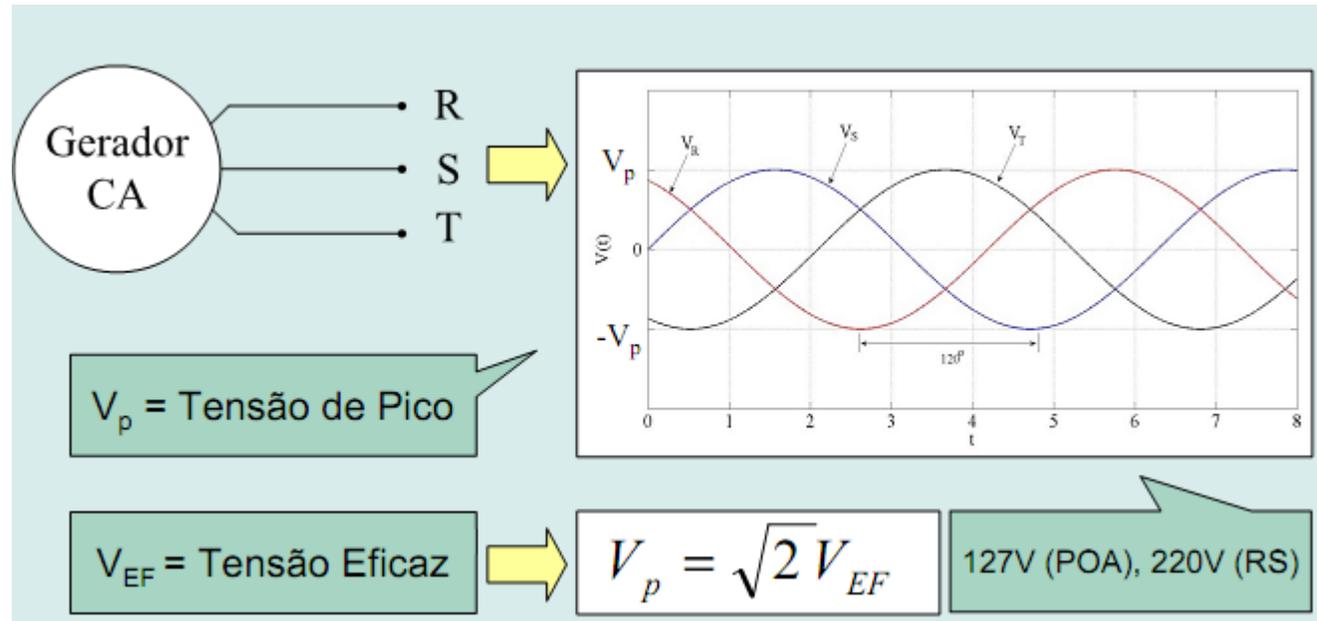


# Circuito Trifásico

## Tensão de Pico e Tensão Eficaz

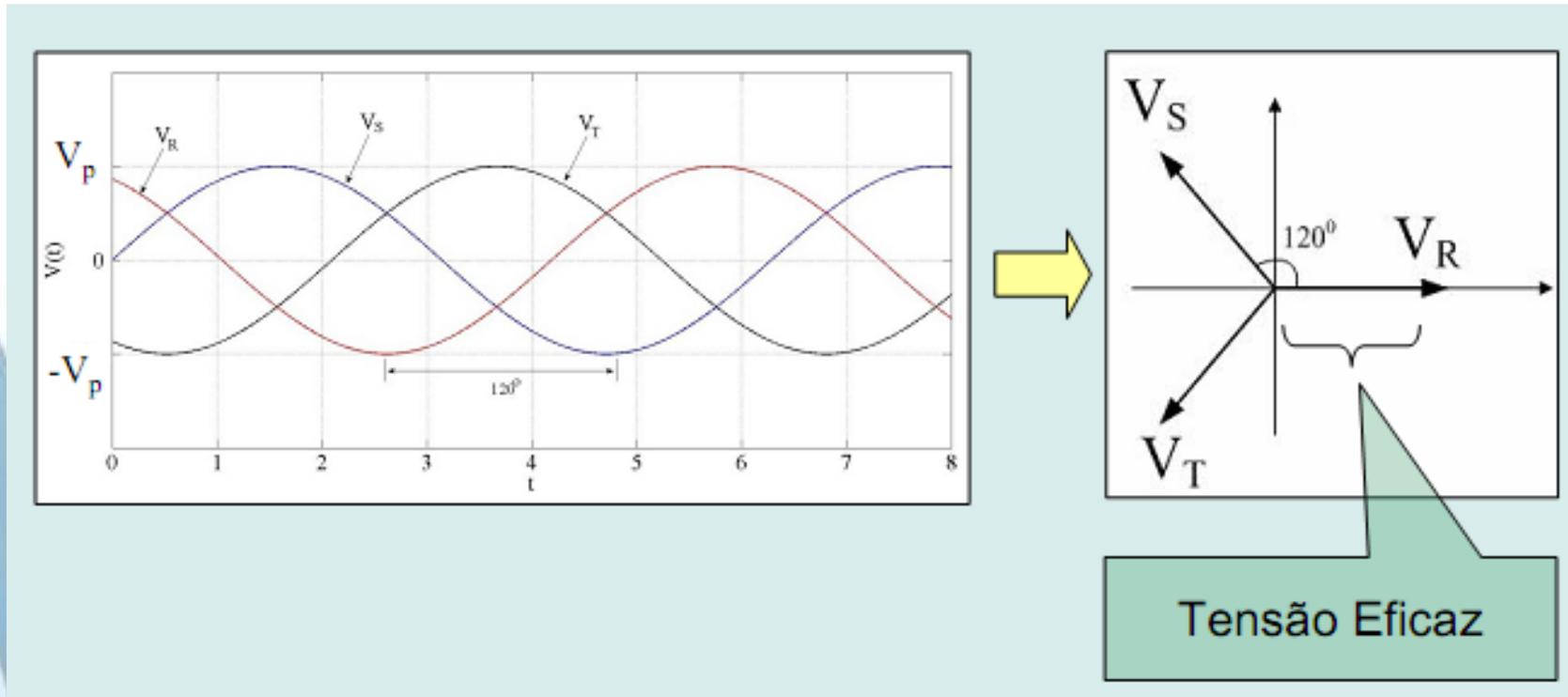


Fonte: Creder (2008)



# Circuito Trifásico

## Tensão Eficaz



# Circuitos Trifásicos

---

## Vantagens

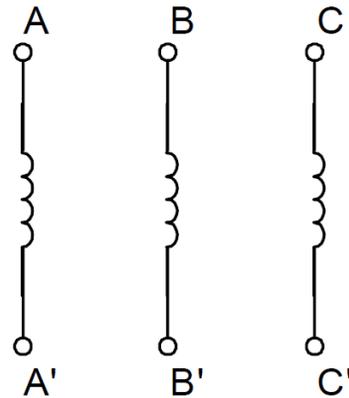
Podem ser usados por cargas monofásicas

Permitem uma maior flexibilidade na escolha e/ou determinação das tensões

Os equipamentos trifásicos têm menores dimensões e são mais eficientes do que os monofásicos de mesma potência

# Sistemas em Triângulo e Estrela

---



Os terminais destes enrolamentos são ligados para diminuir o número de linhas necessárias para as conexões em relação às cargas.

Desta maneira pode-se ter dois tipos de ligações principais: **delta** e **estrela**.

## Nomenclatura:

---

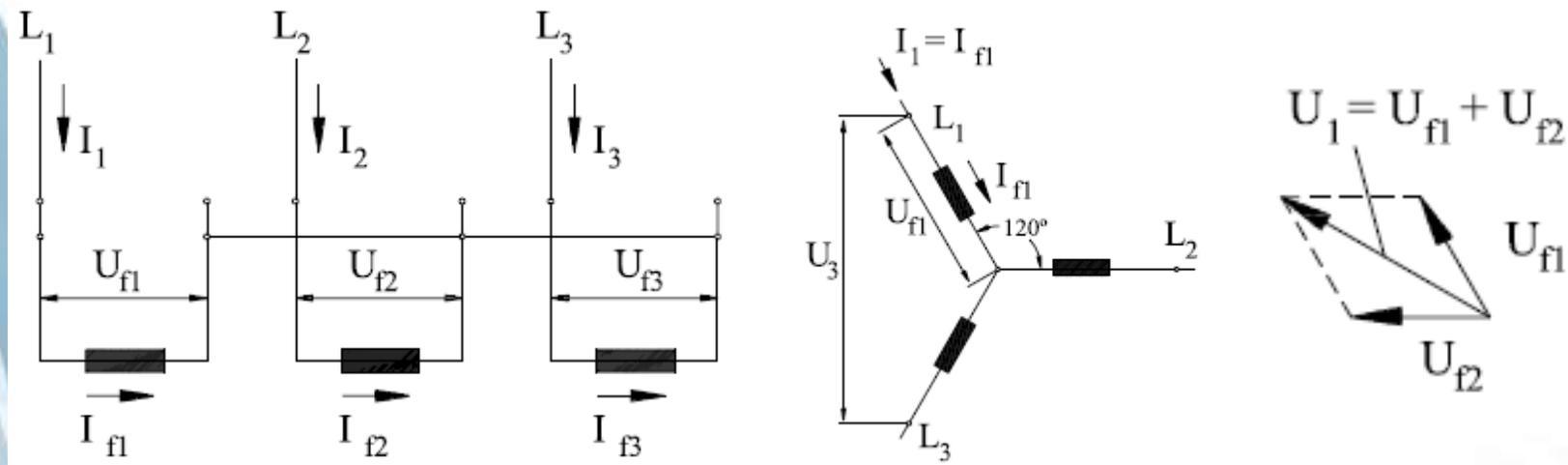
- **Tensão de linha:** é a tensão entre duas linhas.
- **Tensão de fase:** é a tensão no enrolamento ou na impedância de cada ramo.
- **Corrente de linha:** é a corrente na linha que sai do gerador ou a corrente solicitada pela carga.
- **Corrente de fase:** é a corrente no enrolamento do gerador, ou na impedância de cada ramo.

# Ligação em Estrela - Y

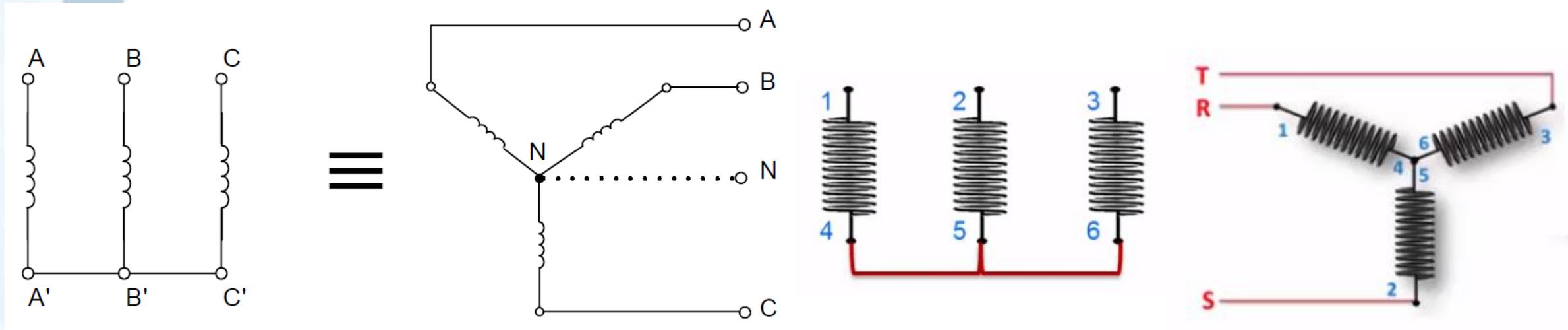
Ligando um dos fios de cada sistema monofásico a um ponto **comum aos três**, os três fios restantes formam um **sistema trifásico em estrela**.

Às vezes, o sistema trifásico em estrela é “**a quatro fios**” ou “**com neutro**”. O quarto fio é ligado ao ponto comum às três fases.

A tensão de linha ou tensão nominal do sistema trifásico e a corrente de linha, são definidas do mesmo modo que na ligação triângulo.



# Ligação em Estrela - Y



Quando um gerador tem seus enrolamentos ligados em Y, as tensões de linha ( $E_{AB}$ ,  $E_{BC}$ ,  $E_{CA}$ ) são diferentes das tensões de fase ( $E_{AN}$ ,  $E_{BN}$ ,  $E_{CN}$ ) e as correntes de linha ( $I_A$ ,  $I_B$ ,  $I_C$ ) são iguais das correntes de fase ( $I_{AN}$ ,  $I_{BN}$ ,  $I_{CN}$ )

$$E_{linha} = \sqrt{3} \cdot E_{fase}$$

# Ligação em Estrela - Y

$$I = I_f$$

$$U = \sqrt{3}.U_f = 1,732.U_f$$

$$U_1 = U_{f_1} + U_{f_2} \quad (\text{soma vetorial})$$

Exemplo:

Temos uma carga trifásica composta de três cargas iguais. Cada carga é feita para ser ligada a uma tensão de 220 V, absorvendo 5,77 A. Qual a tensão nominal do sistema trifásico que alimenta estas cargas ligadas em estrela em suas condições normais (220 V e 5,77 A)? Qual a corrente de linha?

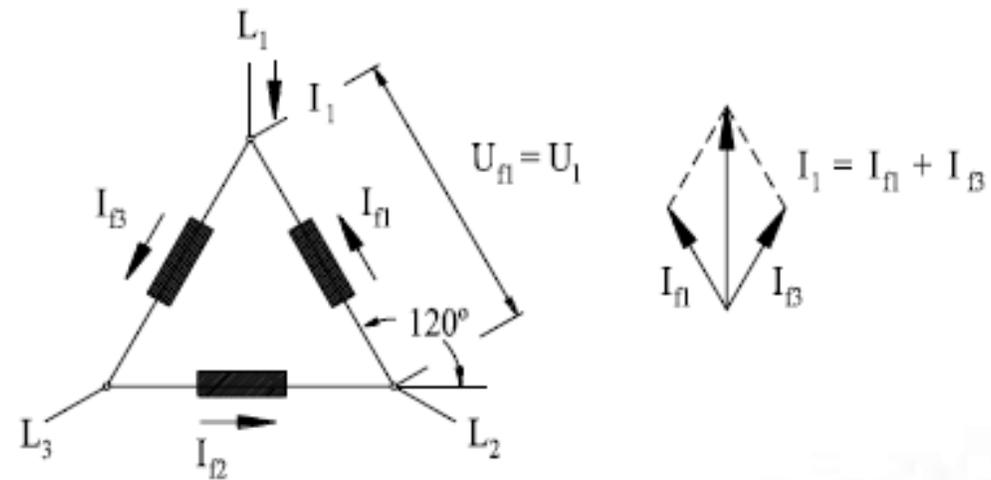
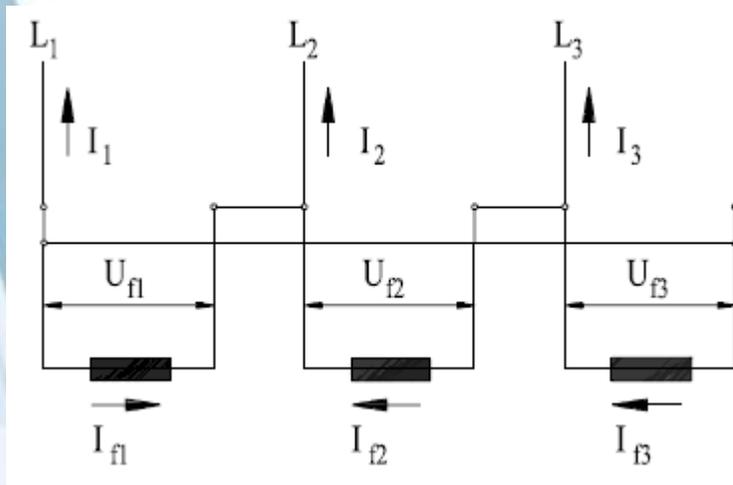
Temos  $U_f = 220$  volts (V) (normal de cada carga)

$$U = 1,732 \cdot 220 = 380 \text{ volts (V)}$$

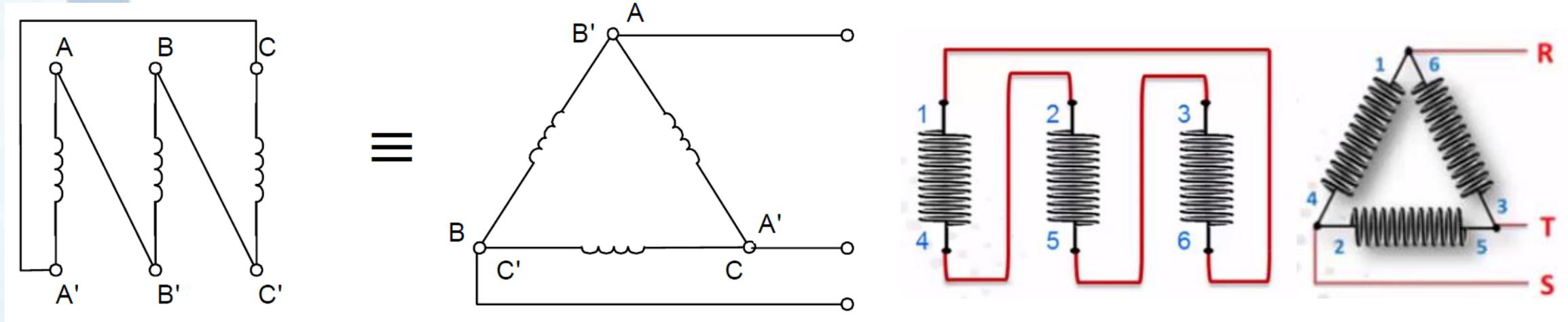
$$I = I_f = 5,77 \text{ ampères (A)}$$

# Ligação em Triângulo $\Delta$

Se ligarmos os três sistemas monofásicos entre si, como indicam as figuras a seguir, podemos eliminar três fios, deixando apenas um em cada ponto de ligação, e o sistema trifásico ficará reduzido a três fios **L1**, **L2** e **L3**.



# Ligação em Triângulo $\Delta$



Quando um gerador tem seus enrolamentos ligados em  $\Delta$ , as tensões de linha ( $E_A, E_B, E_C$ ) são iguais as tensões de fase ( $E_{AB}, E_{BC}, E_{CA}$ ) e as correntes de linha ( $I_A, I_B, I_C$ ) são diferentes das correntes de fase ( $I_{AB}, I_{BC}, I_{CA}$ )

$$I_{linha} = \sqrt{3} \cdot I_{fase}$$

# Ligação em Triângulo $\Delta$

## Tensão de linha (U)

- É a **tensão nominal** do sistema trifásico aplicada entre dois quaisquer dos três fios L1, L2 e L3.

## Corrente de linha ( I )

- É a corrente em qualquer um dos três fios L1, L2 e L3.

## Tensão e corrente de fase ( $U_f$ e $I_f$ )

- É a tensão e corrente de cada um dos três sistemas monofásicos considerados.
- Examinando o esquema da figura, vê-se que:

$$U = U_f$$

$$I = \sqrt{3} \cdot I_f = 1,732 \cdot I_f$$

$$I_1 = I_{f1} + I_{f3} \quad (\text{soma vetorial})$$

# Ligação em Triângulo $\Delta$

---

Exemplo:

Temos um sistema equilibrado de tensão nominal 220 V. A corrente de linha medida é 10 A. Ligando a este sistema uma carga trifásica composta de três cargas iguais ligadas em triângulo, qual a tensão e a corrente em cada uma das cargas?

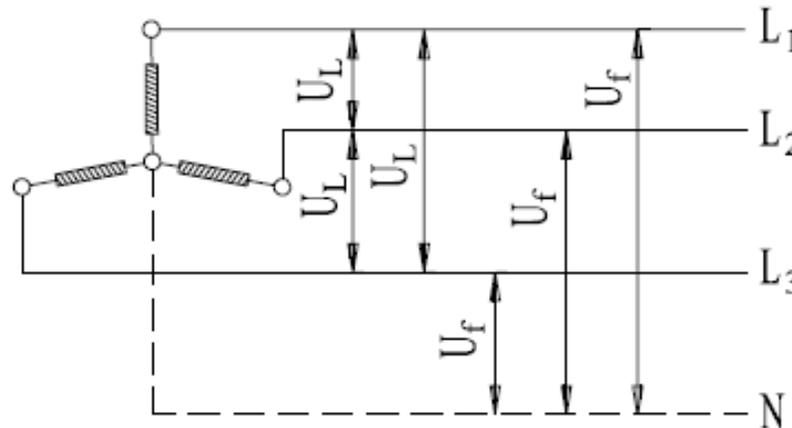
- Temos  $U_f = U_1 = 220$  volts (V) em cada uma das cargas.
- Se  $I = 1,732 \cdot I_f$ , temos  $I_f = 0,577 \cdot I = 0,577 \cdot 10 = 5,77$  A em cada uma das cargas.

# Características de Alimentação

No Brasil, o sistema de alimentação pode ser **monofásico** ou **trifásico**. O sistema monofásico é mais utilizado em serviços **domésticos, comerciais e rurais**, enquanto o sistema trifásico, em **aplicações industriais**, ambos em **60Hz**.

As tensões trifásicas mais usadas nas redes industriais são:

- Baixa tensão: 220 V, 380 V e 440 V
- Média/alta tensão: 2.300 V, 4.160 V e 6.600 V
- O sistema trifásico estrela de baixa tensão, consiste de três condutores de fase (L1, L2, L3) e o condutor neutro (N), sendo este, conectado ao ponto estrela do gerador ou secundário dos transformadores.



# Características de Alimentação

---

As tensões monofásicas padronizadas no Brasil são as de **127 V** (conhecida como 110 V) e **220 V**.

Os motores monofásicos são ligados a duas fases (tensão de linha  $U_L$ ) ou à uma fase e o neutro (tensão de fase  $U_f$ ). Assim, a tensão nominal do motor monofásico deverá ser igual à tensão  $U_L$  ou  $U_f$  do sistema.

Quando vários motores monofásicos são conectados ao sistema trifásico (formado por três sistemas monofásicos), deve-se tomar o cuidado para **distribuí-los de maneira uniforme**, evitando-se assim, **desequilíbrio** entre as fases.

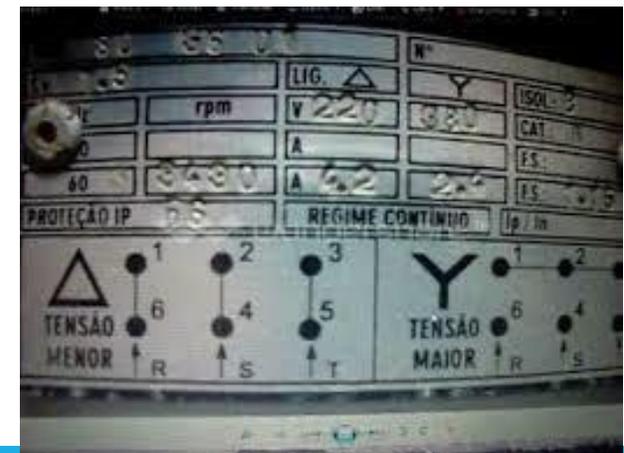
# Características de Alimentação

## Tensão nominal

- É a tensão para a qual o motor foi projetado.

## Tensão nominal múltipla

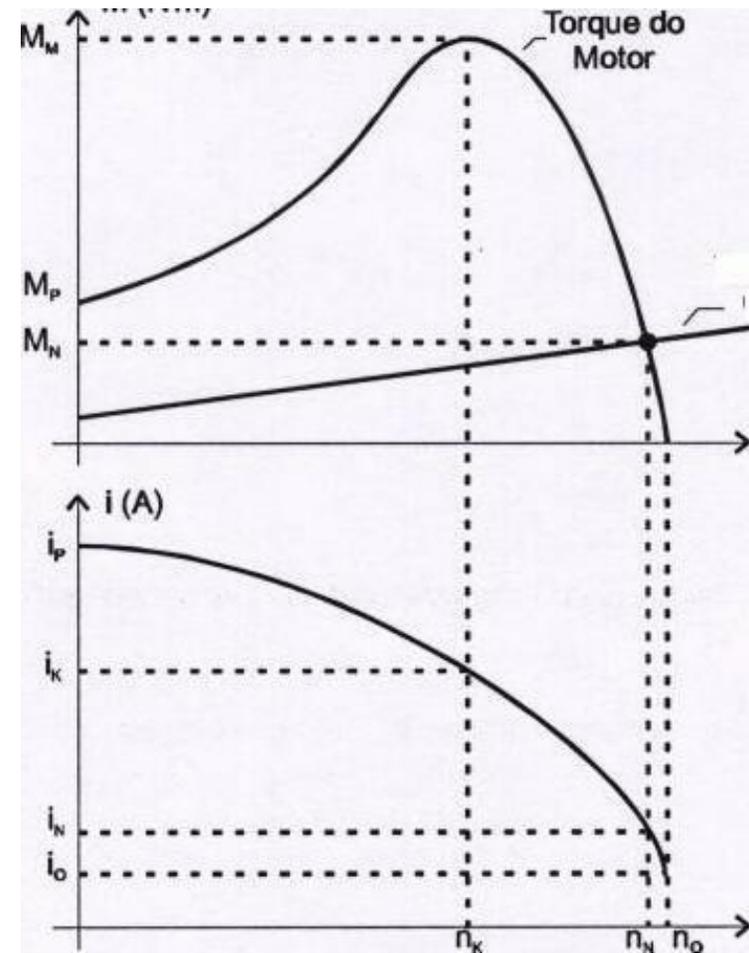
- A grande maioria dos motores é fornecida com terminais do enrolamento religáveis, de modo a poderem funcionar em redes de pelo menos duas tensões diferentes. Os principais tipos de religação de terminais de motores para funcionamento em mais de uma tensão são:
  - **Ligação série-paralela**
  - **Ligação estrela-triângulo**
  - **Tripla tensão nominal**



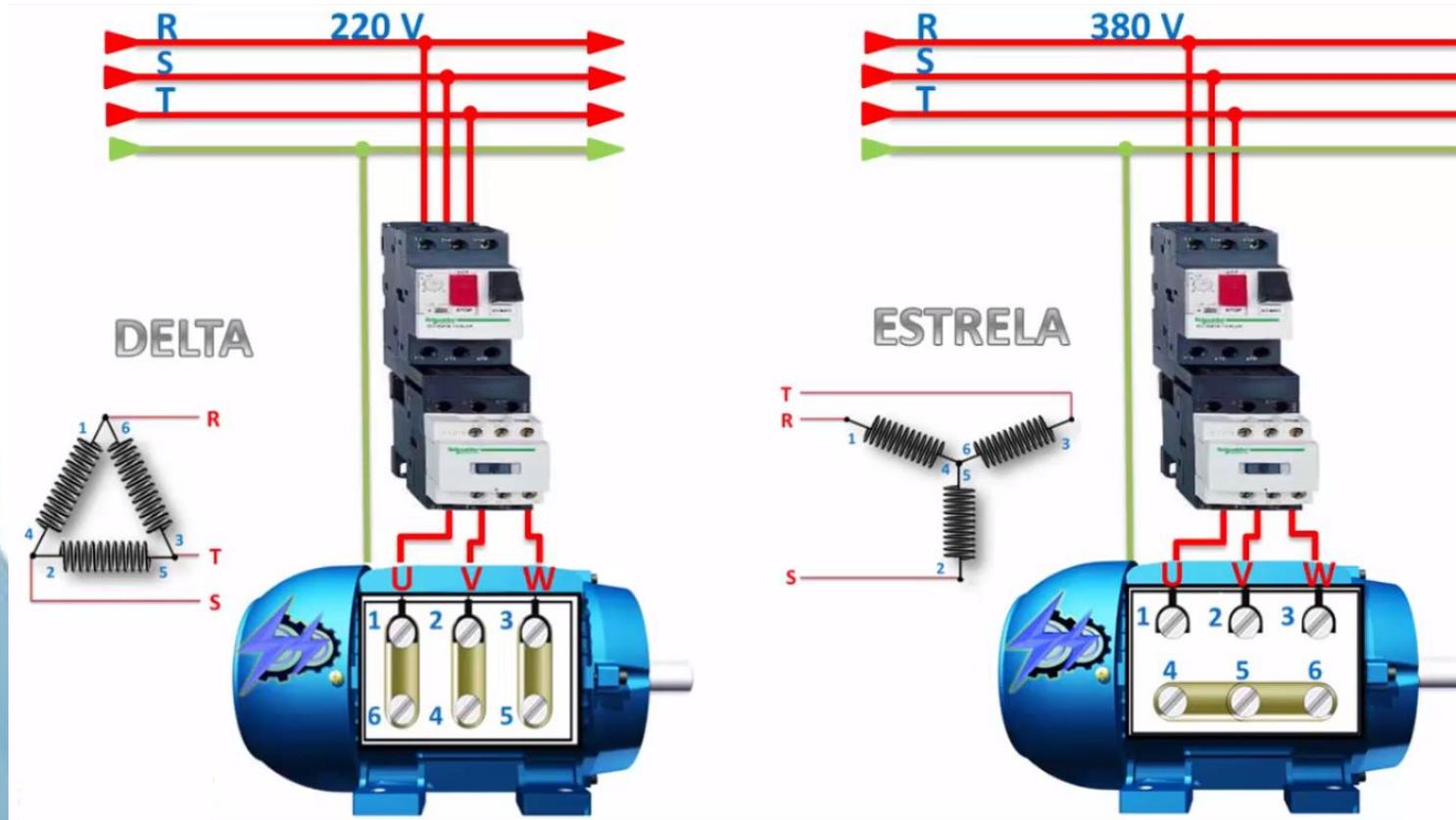
# Partida estrela-triângulo

Durante a partida de um motor, o fato dele estar com o **rotor parado**, se assemelhando à condição de **rotor bloqueado**, faz com que o mesmo solicite uma **corrente maior** para vencer a **inércia**, a qual normalmente é **oito vezes** a sua corrente nominal. Este pico de corrente **provoca perturbações na rede**.

Para minimizar esta condição existem vários artifícios para diminuir a corrente de partida, sendo um deles a **partida com tensão reduzida**, provocada por um fechamento temporário em **estrela** do motor.



# Partida estrela-triângulo



# Partida estrela-triângulo

O princípio consiste em partir o motor ligando os enrolamentos em **estrela à tensão da rede**, o que é o mesmo que dividir a tensão nominal do motor em estrela por 1,73 (no exemplo dado acima, tensão da rede 380 V = 660 V/1,73).

O pico de corrente de partida é **dividida por 3**:

- $I_p = 1,5 \text{ a } 2,6 I_n$

Efetivamente, um motor 380 V/ 660 V ligado em estrela à tensão nominal de 660 V absorve uma corrente **1,73 vezes menor** do que em ligação triângulo a 380 V. Sendo a ligação estrela feita a 380 V, a corrente é novamente dividida por 1,73, logo, no total, **por 3**.

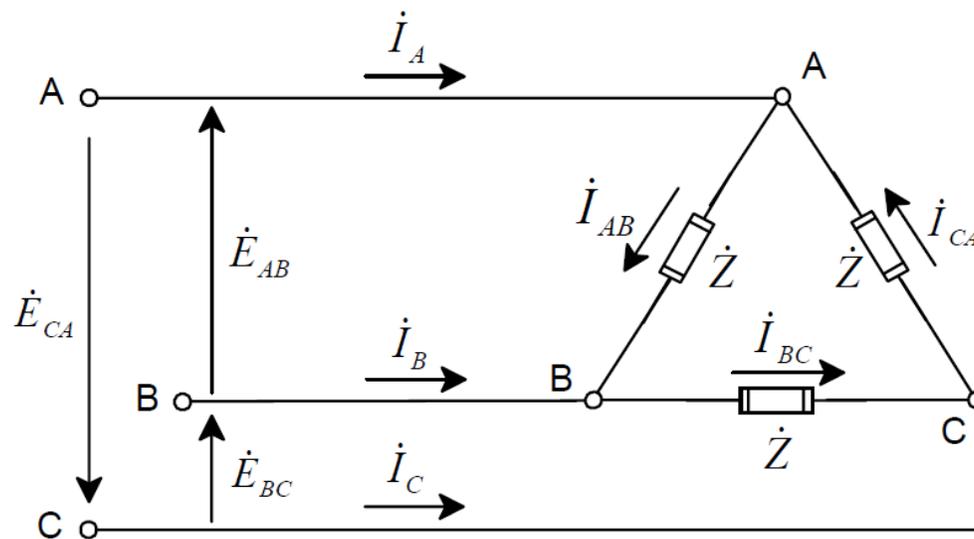
Uma vez que o conjugado de partida é proporcional ao **quadrado da tensão** de alimentação, ele próprio também é dividido por 3:

- $C_p = 0,2 \text{ a } 0,5 C_n$

## Exercício 1:

Para figura abaixo, Cada uma das impedâncias tem valor  $Z = 5\angle 45^\circ \Omega$ . O gerador está ligado com a sequência ABC e o valor da tensão de linha é de 220 V. Para esta configuração, calcule as correntes de fase e de linha.

$$\dot{E}_{AB} = 220\angle 120^\circ \text{ V} \quad \dot{E}_{BC} = 220\angle 0^\circ \text{ V} \quad \dot{E}_{CA} = 220\angle -120^\circ \text{ V}$$

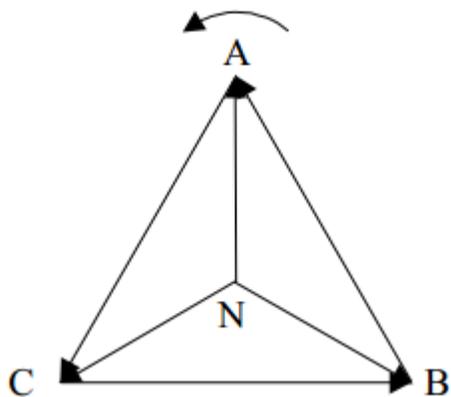


## Exercício 1:

Para uma carga ligada em  $\Delta$  as correntes de fase são iguais as correntes de linha divididas por raiz de três.

Os ângulos das correntes de linha são determinados pela sequência adotada.

Para a sequência ABC com  $\dot{I}_A$  como referência tem-se:



$$\dot{I}_{AB} = \frac{\dot{E}_{AB}}{\dot{Z}} = \frac{220 \angle 120^\circ}{5 \angle 45^\circ} = 44 \angle 75^\circ \text{ A}$$

$$\dot{I}_{BC} = \frac{\dot{E}_{BC}}{\dot{Z}} = \frac{220 \angle 0^\circ}{5 \angle 45^\circ} = 44 \angle -45^\circ \text{ A}$$

$$\dot{I}_{CA} = \frac{\dot{E}_{CA}}{\dot{Z}} = \frac{220 \angle -120^\circ}{5 \angle 45^\circ} = 44 \angle -165^\circ \text{ A}$$

As correntes de linha são dadas por:

$$\dot{I}_A = \dot{I}_{AB} - \dot{I}_{CA} = 44 \angle 75^\circ - 44 \angle -165^\circ$$

$$\dot{I}_A = 76,21 \angle 45^\circ \text{ A}$$

$$\dot{I}_B = \dot{I}_{BC} - \dot{I}_{AB} = 44 \angle -45^\circ - 44 \angle 75^\circ$$

$$\dot{I}_B = 76,21 \angle -75^\circ \text{ A}$$

$$\dot{I}_C = \dot{I}_{CA} - \dot{I}_{BC} = 44 \angle -165^\circ - 44 \angle -45^\circ$$

$$\dot{I}_C = 76,21 \angle 165^\circ \text{ A}$$

Exercício 1:

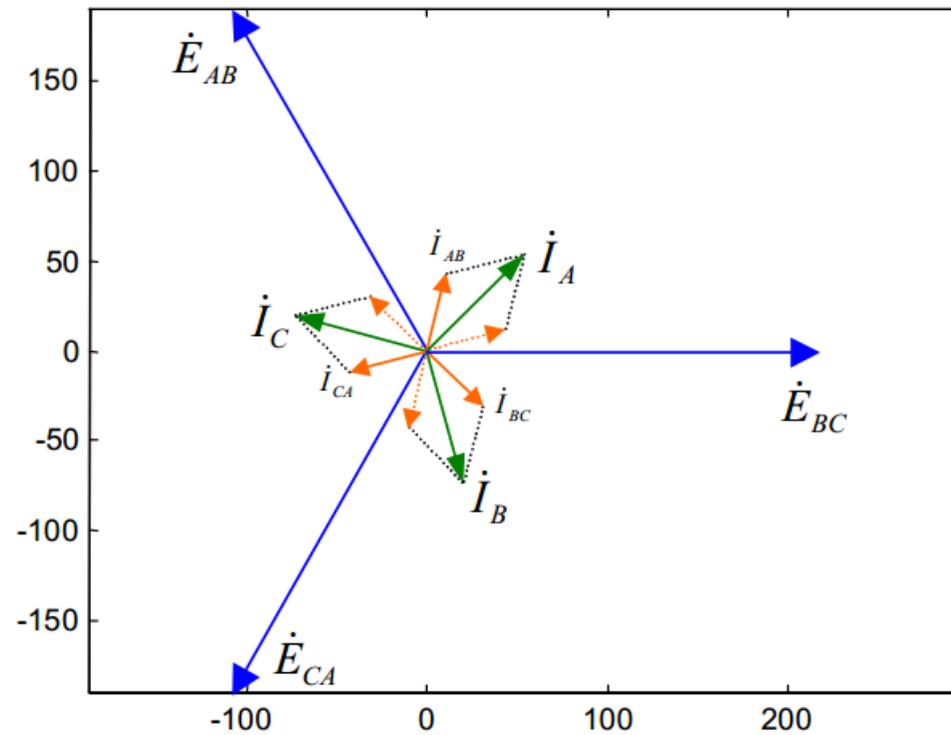
Conforme pode-se observar os módulos das correntes são iguais e para uma carga equilibrada ligada em  $\Delta$ , a corrente de linha é  $\sqrt{3}$  vezes a corrente de fase:

$$\begin{aligned} I_A &= I_B = I_C = 76,21 \text{ A} \\ I_{AB} &= I_{BC} = I_{CA} = 44 \text{ A} \end{aligned}$$

$$\frac{I_\ell}{I_f} = \frac{76,21}{44} = \sqrt{3}$$

Exercício 1:

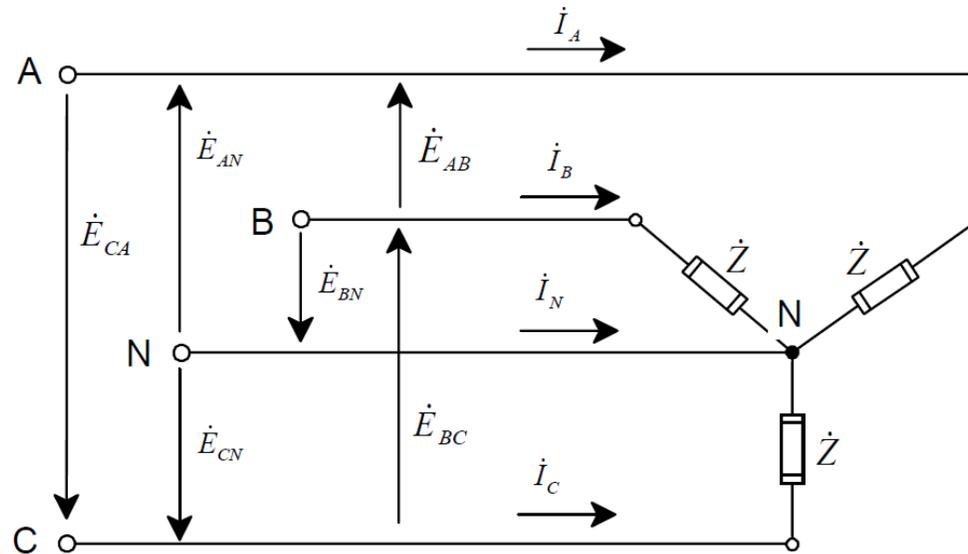
**Diagrama fasorial** para o circuito alimentado com a sequência ABC.:



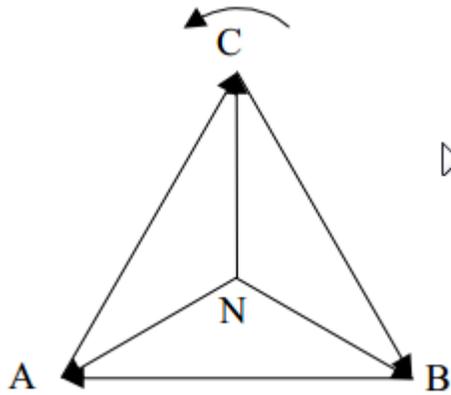
## Exercício2:

A figura abaixo apresenta uma carga trifásica equilibrada ligada em Y. Cada uma das impedâncias tem valor  $Z=2 \angle -30^\circ \Omega$ . O gerador está ligado com a sequência CBA e o valor da tensão de linha é de 220 V. Para esta configuração, calcule as correntes de fase e de linha.

$$E_{an} = 127 \angle -150^\circ; E_{bn} = 127 \angle -30^\circ; E_{cn} = 127 \angle 90^\circ;$$



## Exercício 2:



$$\dot{I}_A = \frac{\dot{E}_{AN}}{\dot{Z}} = \frac{127,02 \angle -150^\circ}{2 \angle -30^\circ} = 63,51 \angle -120^\circ \text{ A}$$

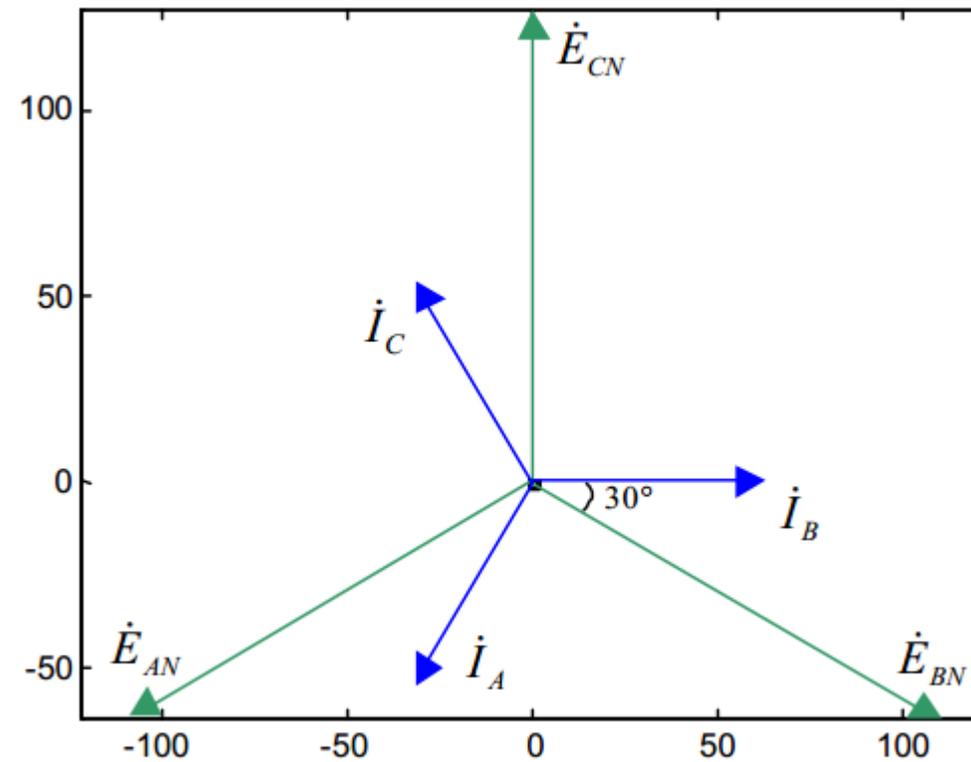
$$\dot{I}_B = \frac{\dot{E}_{BN}}{\dot{Z}} = \frac{127,02 \angle -30^\circ}{2 \angle -30^\circ} = 63,51 \angle 0^\circ \text{ A}$$

$$\dot{I}_C = \frac{\dot{E}_{CN}}{\dot{Z}} = \frac{127,02 \angle 90^\circ}{2 \angle -30^\circ} = 63,51 \angle 120^\circ \text{ A}$$

$$\dot{I}_N = \dot{I}_A + \dot{I}_B + \dot{I}_C = 0$$

## Exercício 2:

**Diagrama fasorial** para o circuito alimentado com a sequência CBA.



# Potência Trifásica

$$P = \sqrt{3} \cdot V_L \cdot I_L \cdot \cos \theta$$

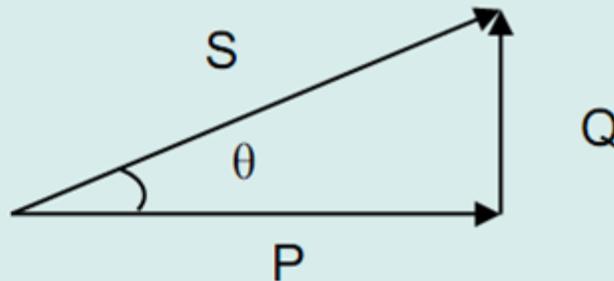
Ativa, real [W]

$$Q = \sqrt{3} \cdot V_L \cdot I_L \cdot \text{sen} \theta$$

Reativa [VAR]

$$S = \sqrt{3} \cdot V_L \cdot I_L$$

Aparente [VA]



### Exercício 3:

Para um motor trifásico de 1 cv, 220/127V, FP = 0,7, rendimento de 80%, determine a corrente de linha e as potências ativa, reativa e aparente.

$$I_L = \frac{cv}{V_L \cdot \sqrt{3} \cdot \cos\theta \cdot \eta} \quad I_L = \frac{735,5.1}{220 \cdot \sqrt{3} \cdot 0,7 \cdot 0,8}$$

$$I_L \cong 3,45 \text{ A}$$

$$P \cong 919,4 \text{ W} \quad Q \cong 937,9 \text{ VAR} \quad S \cong 1313,4 \text{ VA}$$

### Exercício 3:

Para um motor trifásico de 1cv, 220/127V, FP=0,92, rendimento de 80%, determine a corrente de linha e as potências ativa, reativa e aparente.

$$I_L = \frac{cv}{V_L \cdot \sqrt{3} \cdot \cos\theta \cdot \eta} \quad I_L = \frac{735,5.1}{220 \cdot \sqrt{3} \cdot 0,92 \cdot 0,8}$$

$$I_L \cong 2,62 \text{ A}$$

$$P \cong 919,4 \text{ W}$$

$$Q \cong 391,6 \text{ VAR}$$

$$S \cong 999,3 \text{ VA}$$

---

# REVISÃO

---

CIRCUITOS TRIFÁSICOS

EQUIPAMENTOS

POTÊNCIA