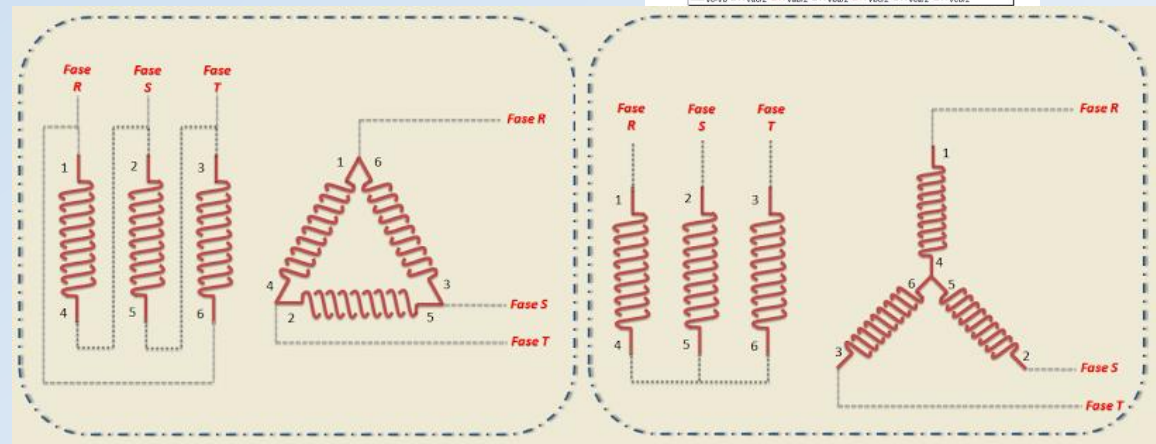
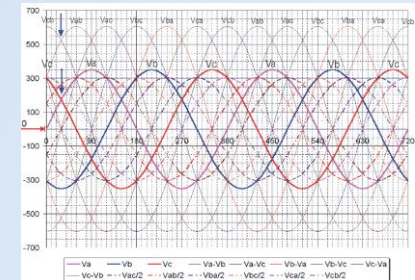
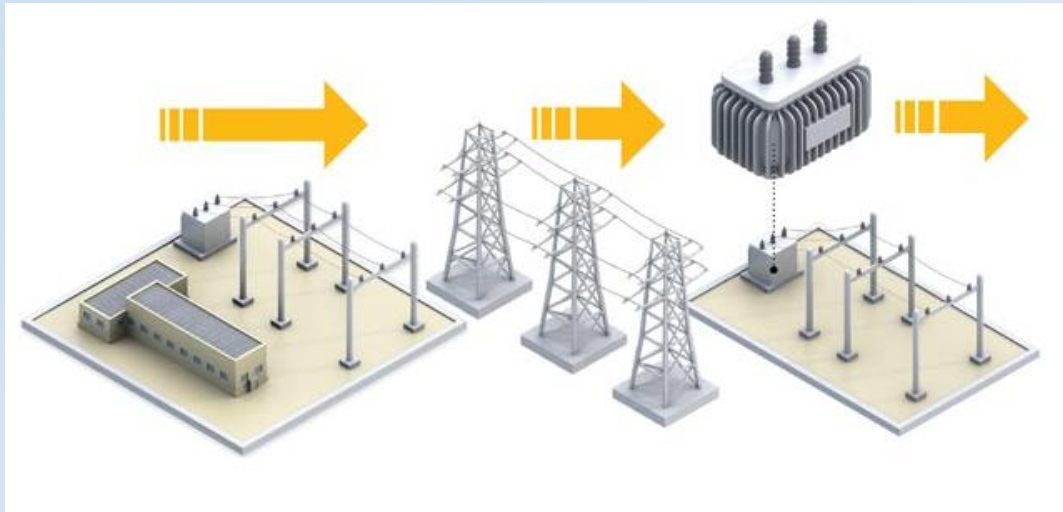


❑ Sistemas Trifásicos

- ❑ Simétricos e Equilibrados
- ❑ Princípio simplificador trifásico simétrico e equilibrado



- ❑ **Composição dos sistemas elétricos de potência (GTD)**
 - ❑ **Geração (usinas geradoras):** geradores trifásicos (dezenas kV)
 - ❑ **Transmissão (transporte):** linhas trifásicas (centenas kV)
 - ❑ **Distribuição de energia elétrica:** consumidor final

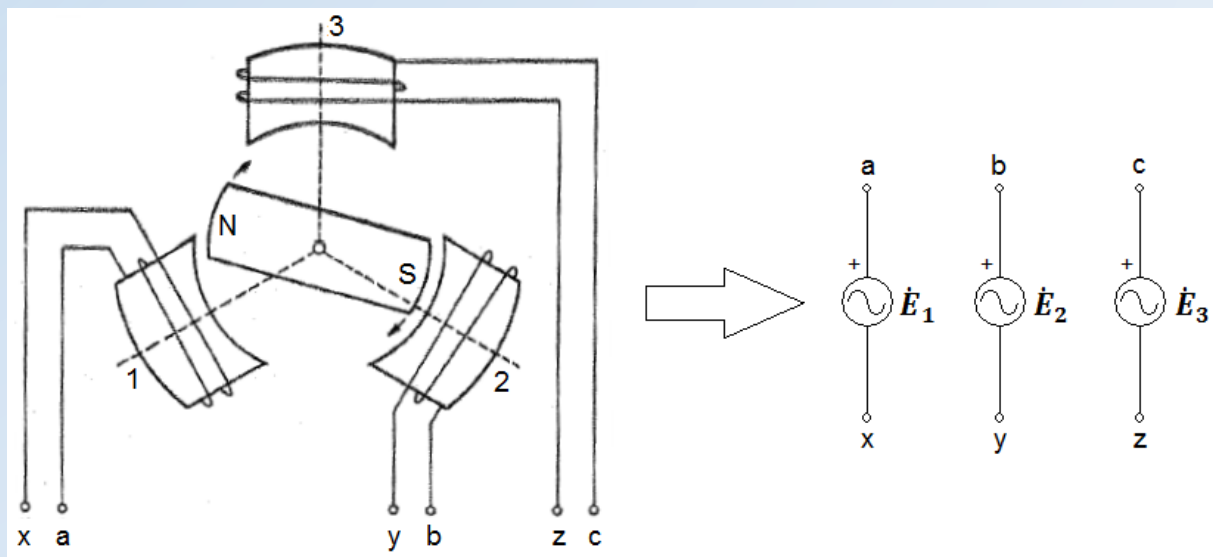


SISTEMAS TRIFÁSICOS SIMÉTRICOS E EQUILIBRADOS

3

❑ Gerador trifásico (esquema elétrico básico):

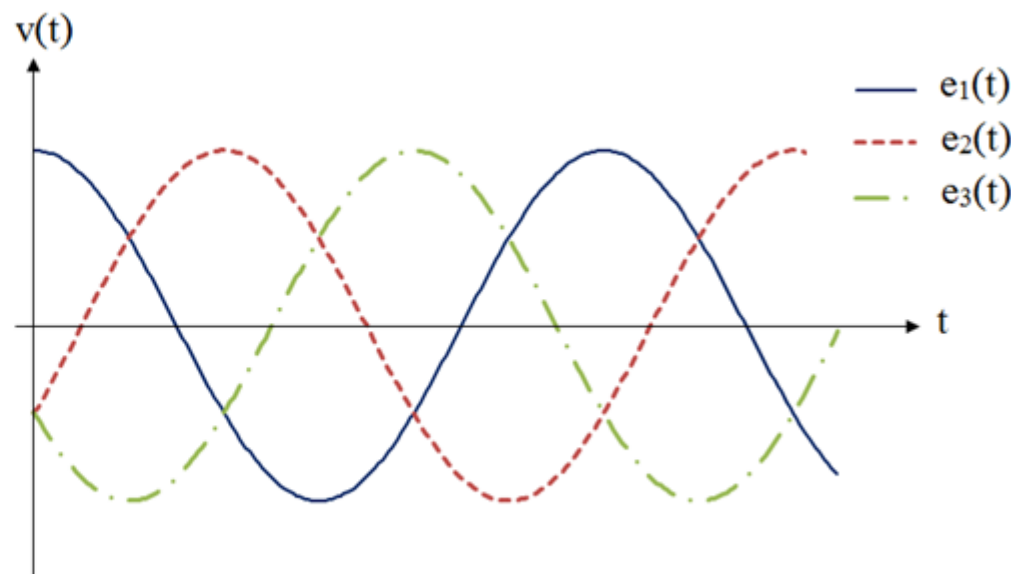
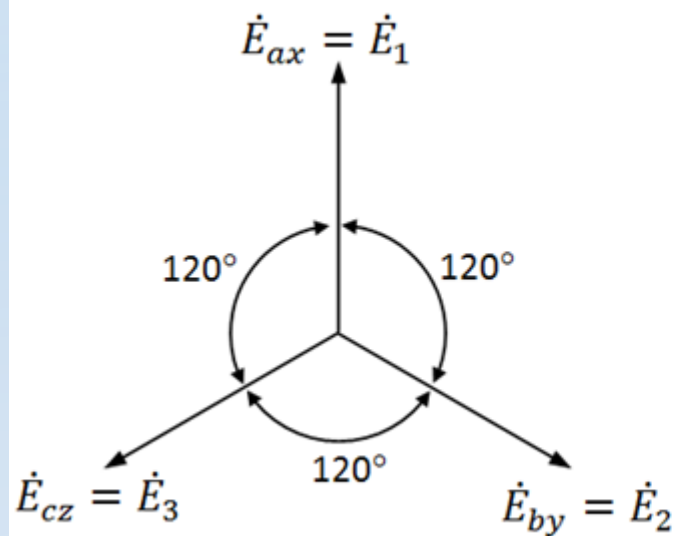
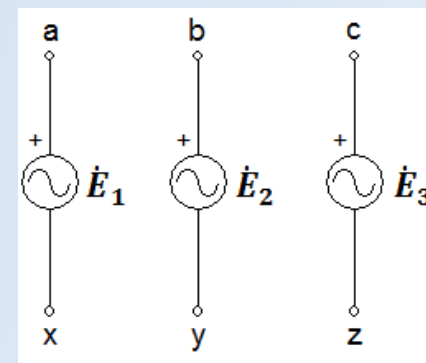
- ❑ Possui 3 enrolamentos (fases) separados e fisicamente defasados de 120°
- ❑ O rotor do gerador: eletroímã acionado com velocidade síncrona
- ❑ Resultado: 3 tensões alternadas, de mesmo valor eficaz e frequência, e sucessivamente defasadas de 120° entre si (induzidas nos enrolamentos)



SISTEMAS TRIFÁSICOS SIMÉTRICOS E EQUILIBRADOS

4

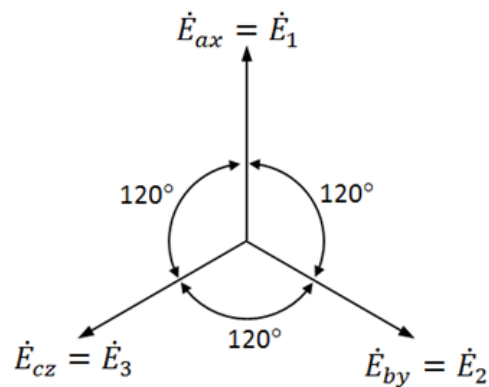
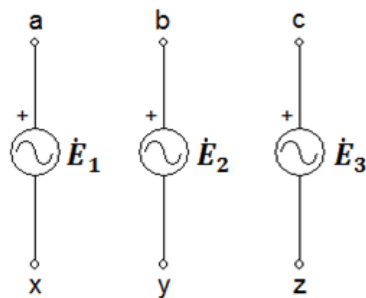
- Representação das tensões induzidas de x, y, z (conectados em um mesmo ponto)



SISTEMAS TRIFÁSICOS SIMÉTRICOS E EQUILIBRADOS

5

- ❑ Supondo $e_1(t)$ com fase 0° (referência), as tensões das fases são definidas como:



$$\begin{cases} \dot{E}_1 = E \mid \underline{0^\circ} & \Rightarrow e_1(t) = \sqrt{2} E \cos(\omega t) \\ \dot{E}_2 = E \mid \underline{-120^\circ} & \Rightarrow e_2(t) = \sqrt{2} E \cos(\omega t - 120^\circ) \\ \dot{E}_3 = E \mid \underline{-240^\circ} & \Rightarrow e_3(t) = \sqrt{2} E \cos(\omega t - 240^\circ) \end{cases}$$

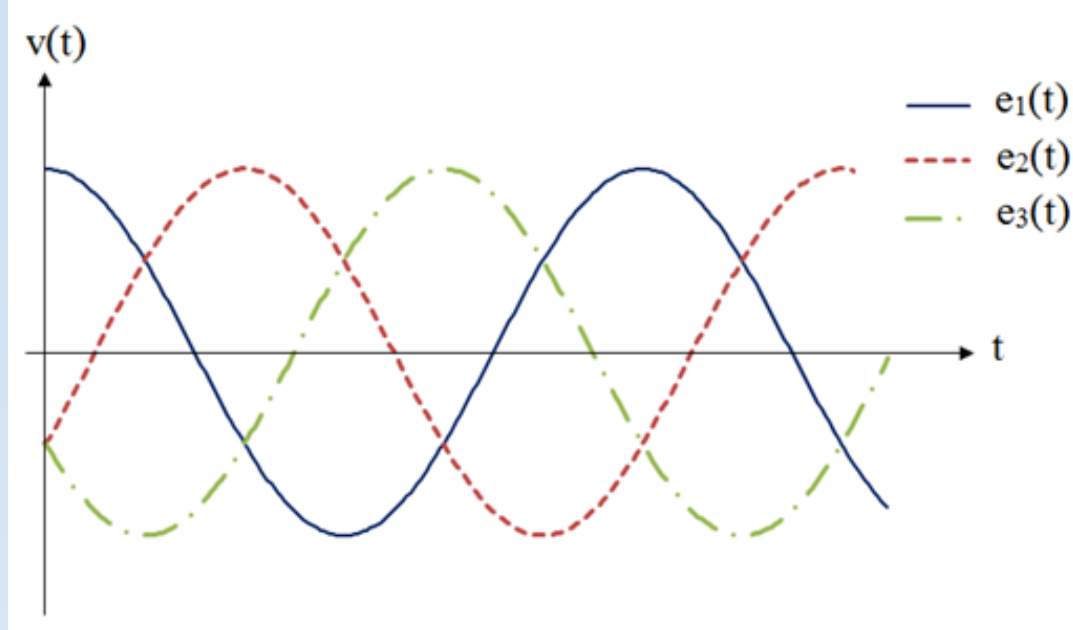
SISTEMAS TRIFÁSICOS SIMÉTRICOS E EQUILIBRADOS

6

Sequência de fases POSITIVA (1, 2, 3):

- Um máximo de tensão na fase “1” é seguido, no tempo, por um máximo na fase “2” e depois por um máximo na fase “3”
- Fases 1, 2, 3: tradicionalmente chamadas a, b, c ou R, S, T ou U, V, W

$$\begin{cases} \dot{E}_1 = E \mid 0^\circ & \Rightarrow e_1(t) = \sqrt{2} E \cos(\omega t) \\ \dot{E}_2 = E \mid -120^\circ & \Rightarrow e_2(t) = \sqrt{2} E \cos(\omega t - 120^\circ) \\ \dot{E}_3 = E \mid -240^\circ & \Rightarrow e_3(t) = \sqrt{2} E \cos(\omega t - 240^\circ) \end{cases}$$



SISTEMAS TRIFÁSICOS SIMÉTRICOS E EQUILIBRADOS

7

- ❑ Sequência de fases **NEGATIVA**:
 - ❑ Se o rotor girar no sentido contrário, então temos a sequência de fase **NEGATIVA 1, 3, 2**

SISTEMAS TRIFÁSICOS SIMÉTRICOS E EQUILIBRADOS

8

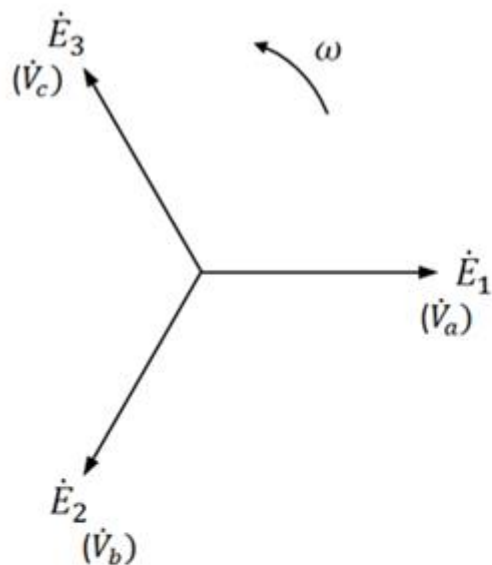
□ Em resumo se:

- Tensão da fase “2” (b) atrasada de 120° em relação à tensão da fase “1” (a) → diz-se que a sequência de fases é **POSITIVA** → **1, 2, 3 / a, b, c / R, S, T / U, V, W**
- Tensão de fase “2” (b) adiantada em relação à tensão de fase “1” (a) → diz-se que a sequência de fases é **NEGATIVA** → **1, 3, 2 / a, c, b / R, T, S / U, W, V**
 - Nesse caso a tensão da fase “3” (c) estará 120° atrasada em relação à fase “1” (a)

SISTEMAS TRIFÁSICOS SIMÉTRICOS E EQUILIBRADOS

9

Sequência Positiva



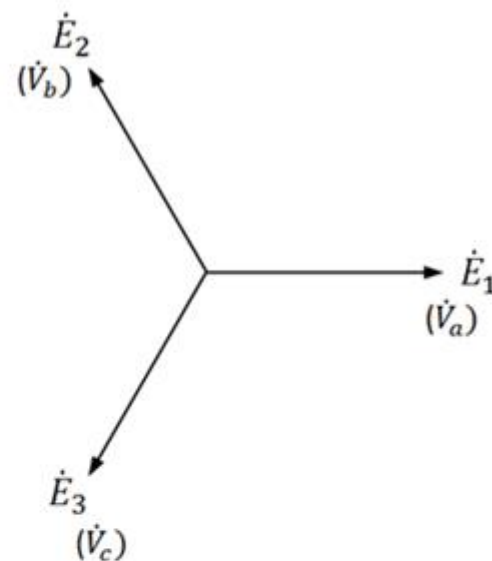
$$\dot{E}_1 = E \angle 0^\circ \quad (\dot{V}_a) \quad (\text{supondo } \dot{E}_1 \text{ com fase } 0)$$

$$\dot{E}_2 = E \angle -120^\circ \quad (\dot{V}_b)$$

$$\dot{E}_3 = E \angle -240^\circ = E \angle +120^\circ \quad (\dot{V}_c)$$

E = valor eficaz da tensão

Sequência Negativa



$$\dot{E}_1 = E \angle 0^\circ$$

$$\dot{E}_2 = E \angle -240^\circ = E \angle +120^\circ$$

$$\dot{E}_3 = E \angle -120^\circ$$

SISTEMAS TRIFÁSICOS SIMÉTRICOS E EQUILIBRADOS

10

❑ Observações:

- ❑ **Dois circuitos trifásicos só podem operar em paralelo se tiverem a mesma sequência de fase**
- ❑ **Idealmente, os geradores trifásicos alimentam cargas equilibradas, de modo que as correntes no sistema também constituem um trifásico equilibrado**

$$\square \Rightarrow \dot{E}_1 + \dot{E}_2 + \dot{E}_3 = 0 \quad \Rightarrow \quad e_1(t) + e_2(t) + e_3(t) = 0$$

SISTEMAS TRIFÁSICOS SIMÉTRICOS E EQUILIBRADOS

11

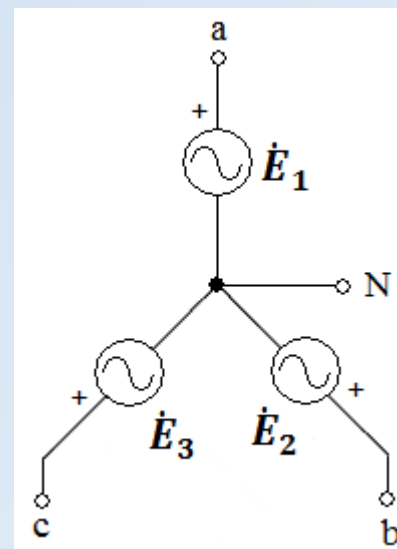
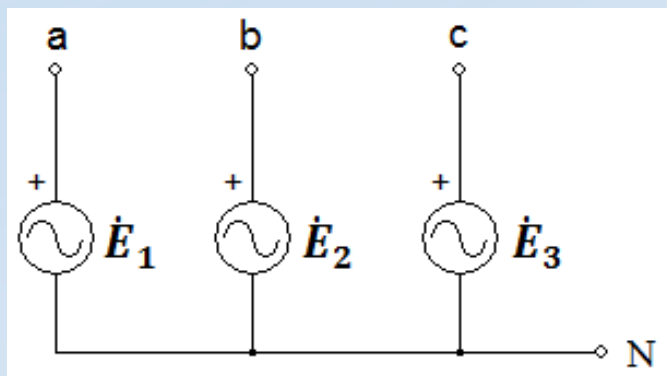
❑ Observações:

❑ PRINCÍPIO SIMPLIFICADOR TRIFÁSICO SIMÉTRICO E EQUILIBRADO:

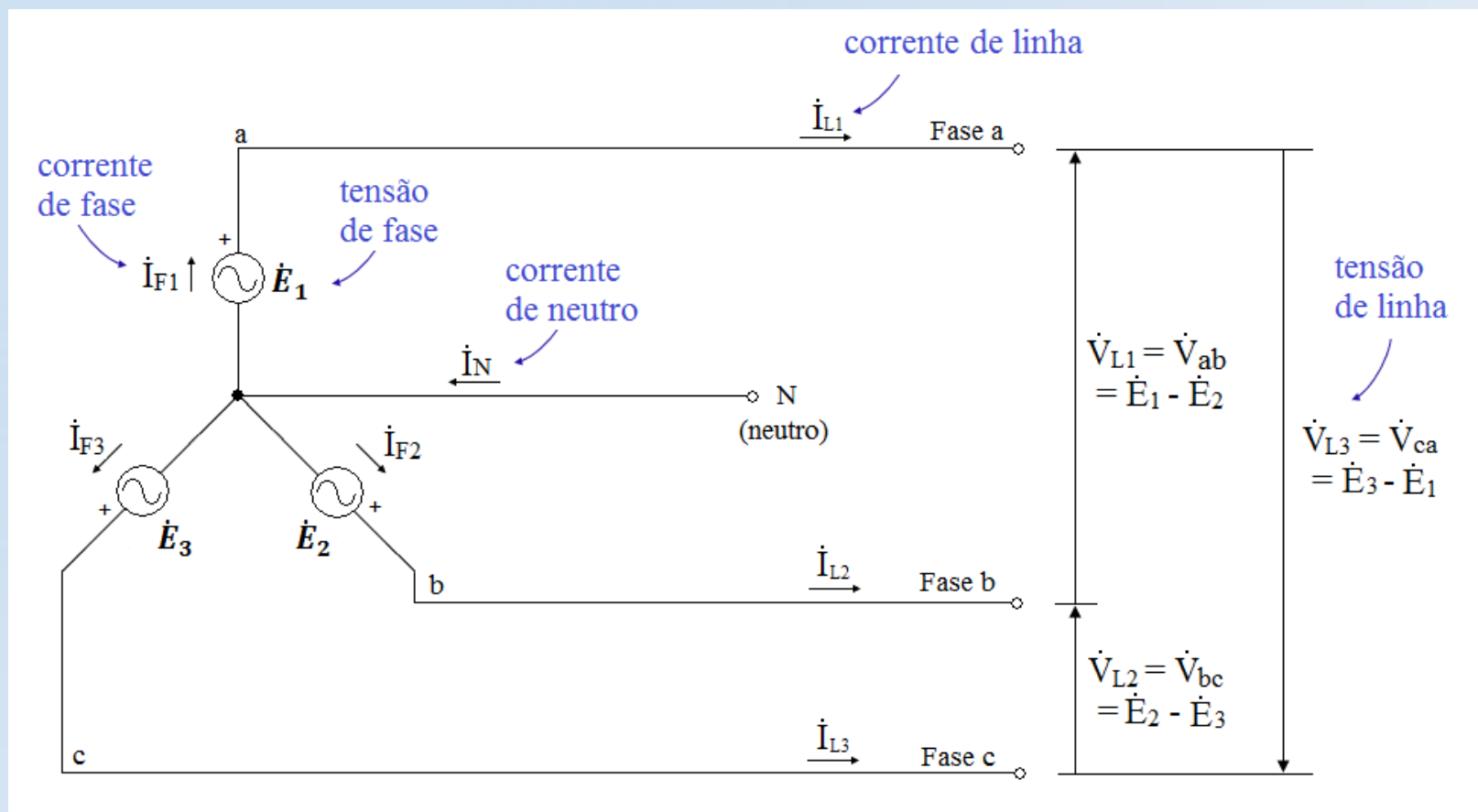
- ✓ Conhecendo-se a sequência de fases e uma das tensões do conjunto, então o conjunto inteiro é conhecido.

❑ Ligação Estrela (\star) ou (Y)

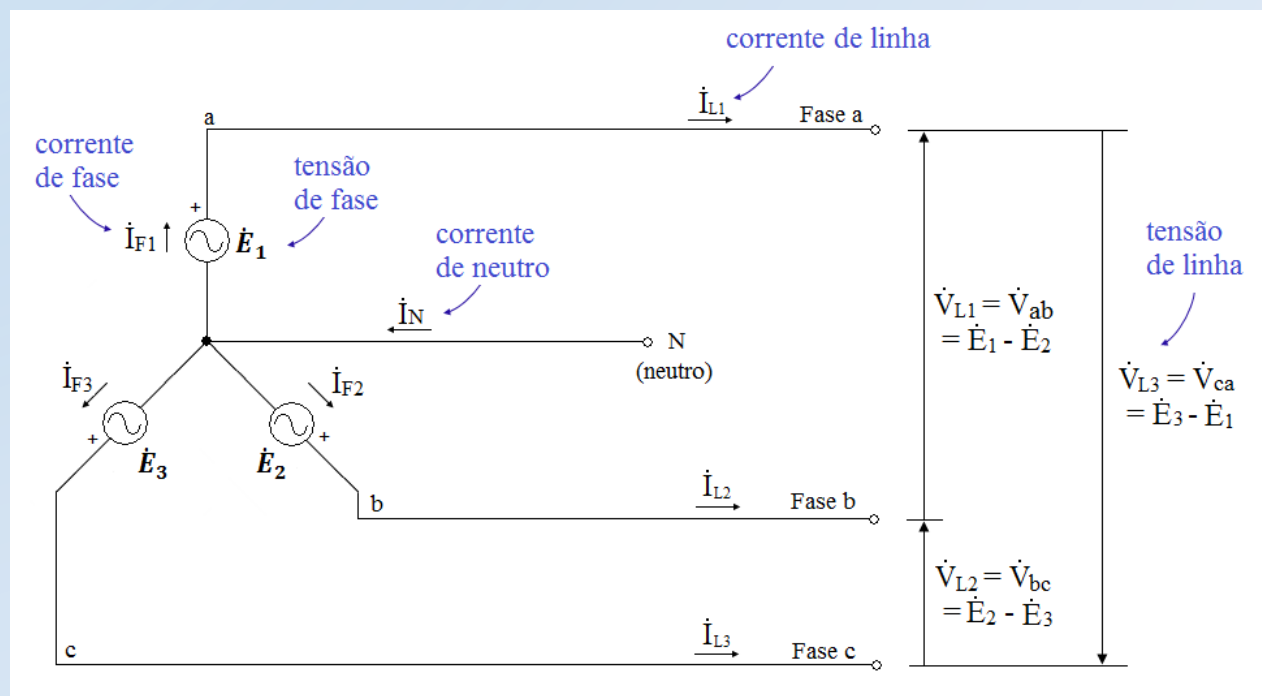
- ❑ Terminais x, y, z ligados juntos
- ❑ Ponto comum da estrela \Rightarrow NEUTRO \Rightarrow pode ou não estar disponível para ligação externa



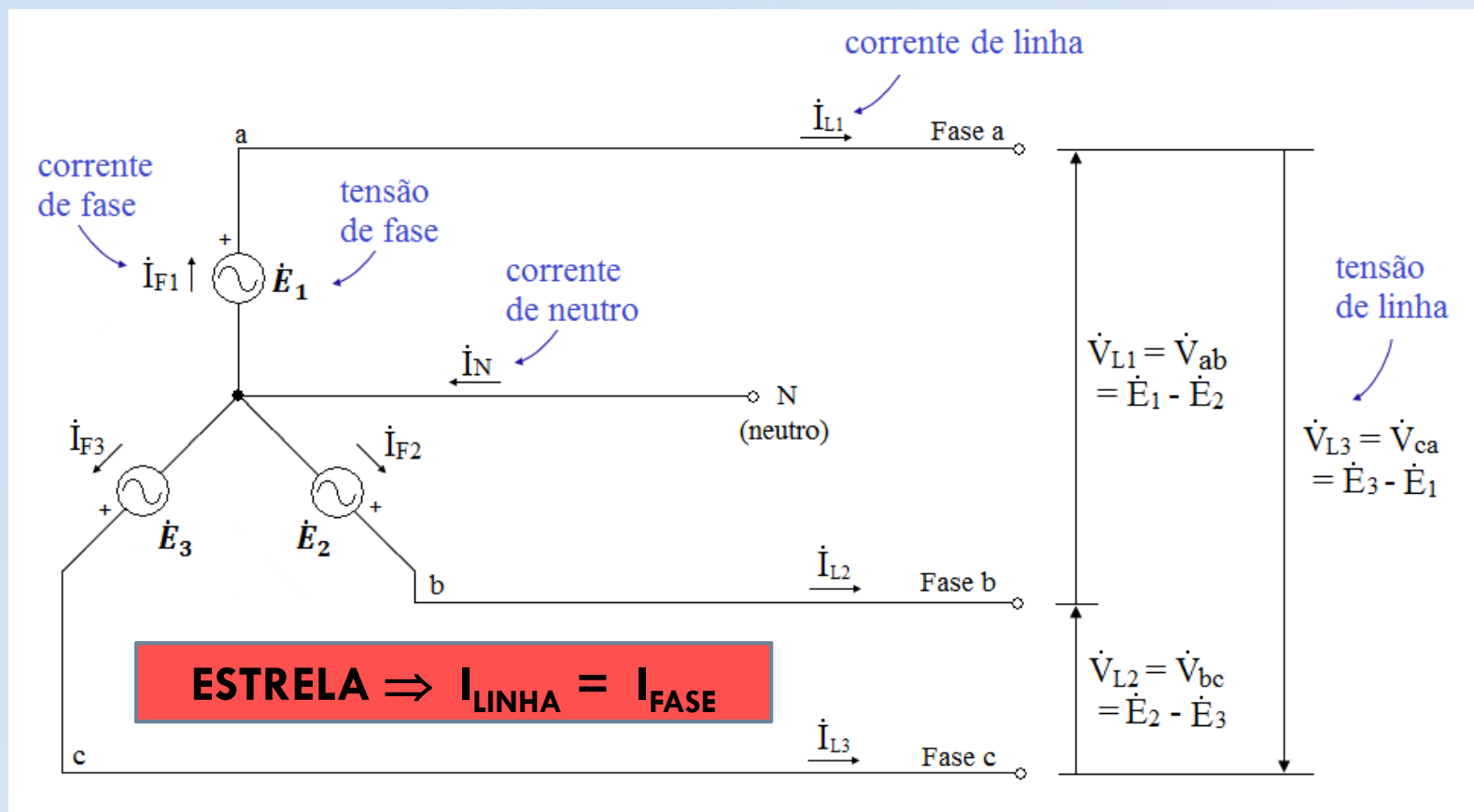
- ❑ **Tensão de linha \Rightarrow tensão entre qualquer par de fases (neutro excluído)**



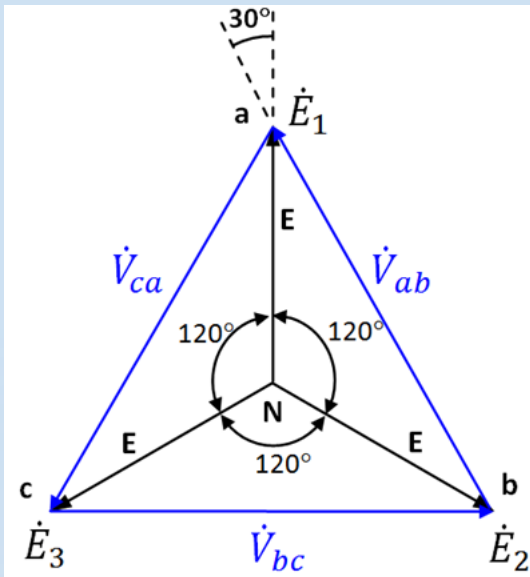
- **Tensão de fase:** tensão de uma única fase \Rightarrow tensão nos terminais de cada uma das fontes que constituem o gerador trifásico (ou tensão nos terminais de cada uma das cargas trifásicas)



- Corrente de linha \Rightarrow corrente em uma única linha
- Corrente de fase \Rightarrow corrente em uma única fase



□ Relacionando as tensões de linha e de fase:



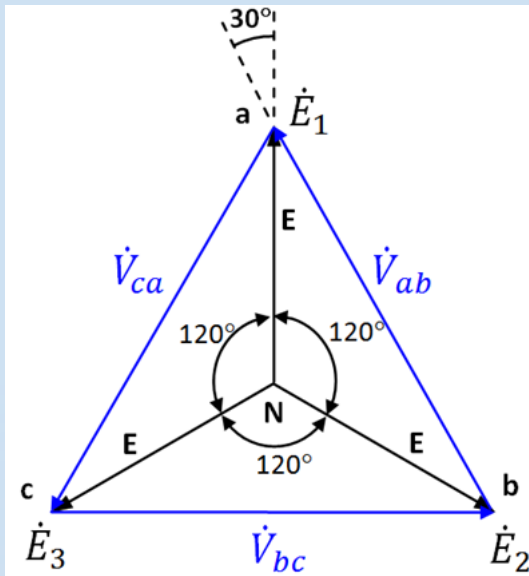
$$|\dot{V}_{ab}|^2 = |\dot{E}_1|^2 + |\dot{E}_2|^2 - 2 |\dot{E}_1| |\dot{E}_2| \cos 120^\circ \quad \begin{cases} \cos 120^\circ = -0,5 \\ |\dot{E}_1| = |\dot{E}_2| = |\dot{E}_3| = |\dot{E}| = E \end{cases}$$

$$|\dot{V}_{ab}|^2 = 3 |\dot{E}|^2 \Rightarrow |\dot{V}_{ab}| = \sqrt{3} |\dot{E}| \Rightarrow |\dot{V}_{ab}| = \sqrt{3} E$$

$$|\dot{V}_{ab}| = |\dot{V}_{bc}| = |\dot{V}_{ca}| = |\dot{V}_L| \Rightarrow \text{valor eficaz da tensão}$$

$$V_{LINHA} = \sqrt{3} V_{FASE}$$

Relacionando as tensões de linha e de fase:



$$|\dot{V}_{ab}|^2 = |\dot{E}_1|^2 + |\dot{E}_2|^2 - 2 |\dot{E}_1| |\dot{E}_2| \cos 120^\circ \quad \begin{cases} \cos 120^\circ = -0,5 \\ |\dot{E}_1| = |\dot{E}_2| = |\dot{E}_3| = |\dot{E}| = E \end{cases}$$

$$|\dot{V}_{ab}|^2 = 3 |\dot{E}|^2 \Rightarrow |\dot{V}_{ab}| = \sqrt{3} |\dot{E}| \Rightarrow |\dot{V}_{ab}| = \sqrt{3} E$$

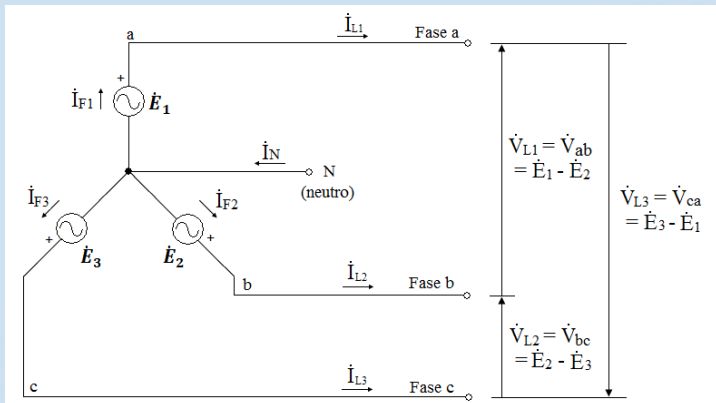
$$|\dot{V}_{ab}| = |\dot{V}_{bc}| = |\dot{V}_{ca}| = |\dot{V}_L| \Rightarrow \text{valor eficaz da tensão}$$

$$V_{\text{LINHA EFICAZ}} = \sqrt{3} V_{\text{FASE EFICAZ}}$$

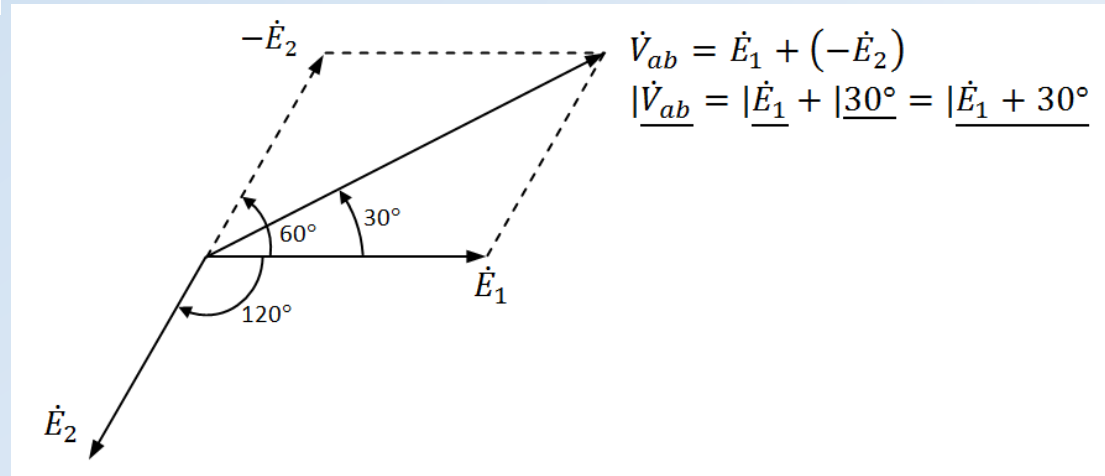
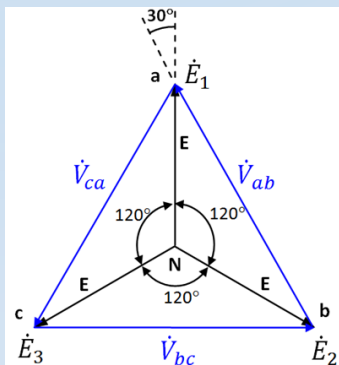
Também podemos escrever:

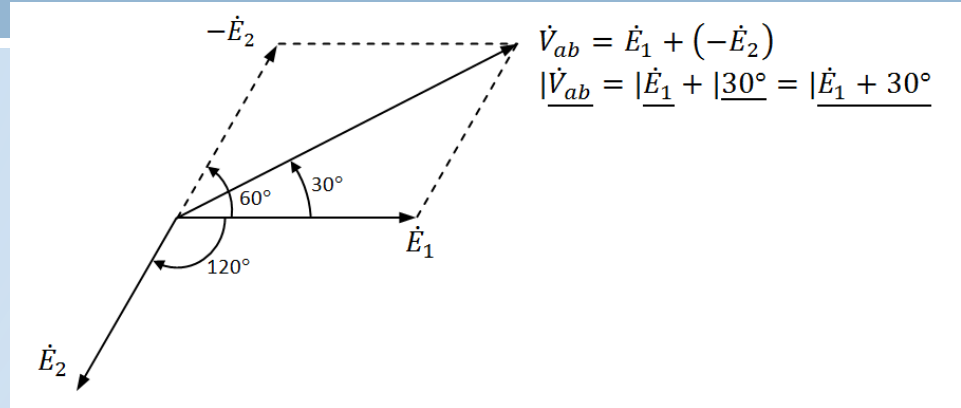
$$\begin{cases} \dot{V}_{ab} = \dot{E}_1 - \dot{E}_2 \\ \dot{V}_{bc} = \dot{E}_2 - \dot{E}_3 \\ \dot{V}_{ca} = \dot{E}_3 - \dot{E}_1 \end{cases}$$

- Para sequência positiva (a, b, c) e usando a fase “a” como referência:



$$\begin{cases} \dot{E}_1 = E \angle 0^\circ \\ \dot{E}_2 = E \angle -120^\circ \\ \dot{E}_3 = E \angle +120^\circ \end{cases}$$





□ Pela figura:

$$\dot{V}_{ab} = E \angle 0^\circ - E \angle 120^\circ = \sqrt{3} E \angle 30^\circ$$

□ Analogamente:

$$\dot{V}_{bc} = E \angle -120^\circ - E \angle 120^\circ = \sqrt{3} E \angle -90^\circ \quad (\dot{V}_{bc} = \dot{E}_2 - \dot{E}_3)$$

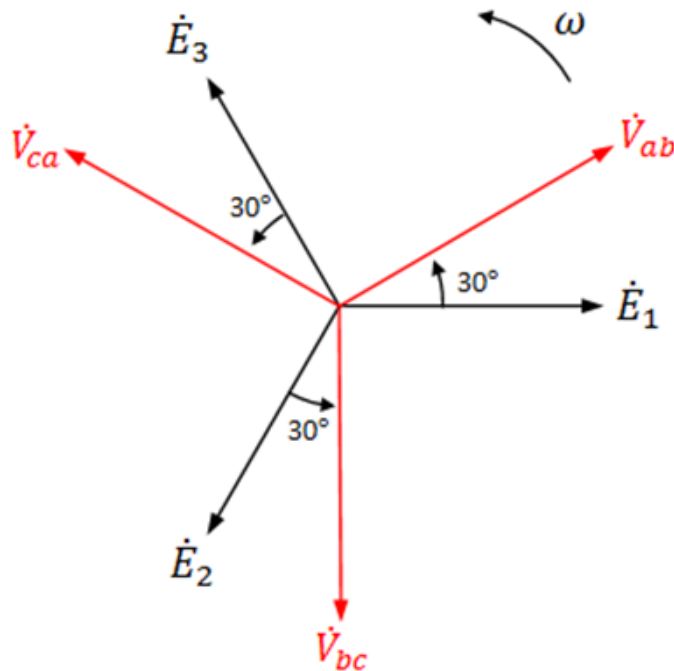
$$\dot{V}_{ca} = E \angle 120^\circ - E \angle 0^\circ = \sqrt{3} E \angle +150^\circ \quad (\dot{V}_{ca} = \dot{E}_3 - \dot{E}_1)$$

$$\dot{V}_{ab} = \sqrt{3} E \angle 30^\circ$$

$$\dot{V}_{bc} = \sqrt{3} E \angle -90^\circ$$

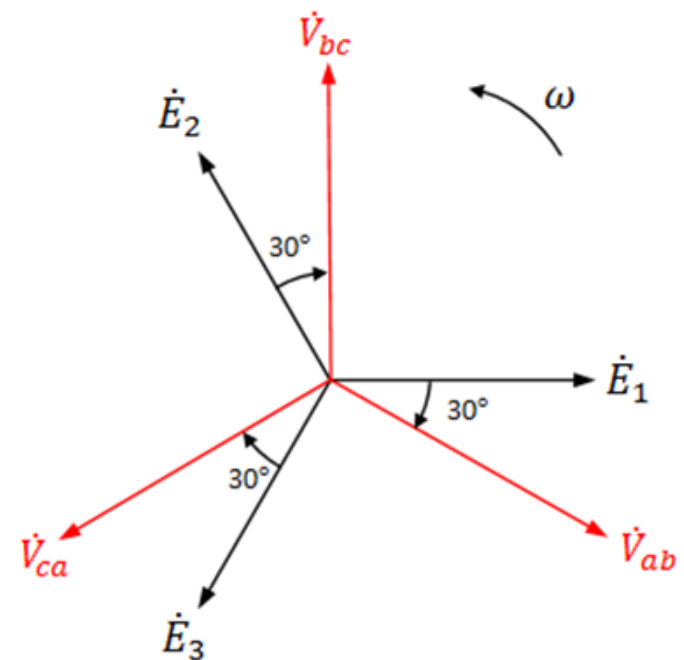
$$\dot{V}_{ca} = \sqrt{3} E \angle +150^\circ$$

20



Sequência Positiva

O conjunto de tensão de linha está **30° adiantado** em relação ao conjunto de tensões de fase.



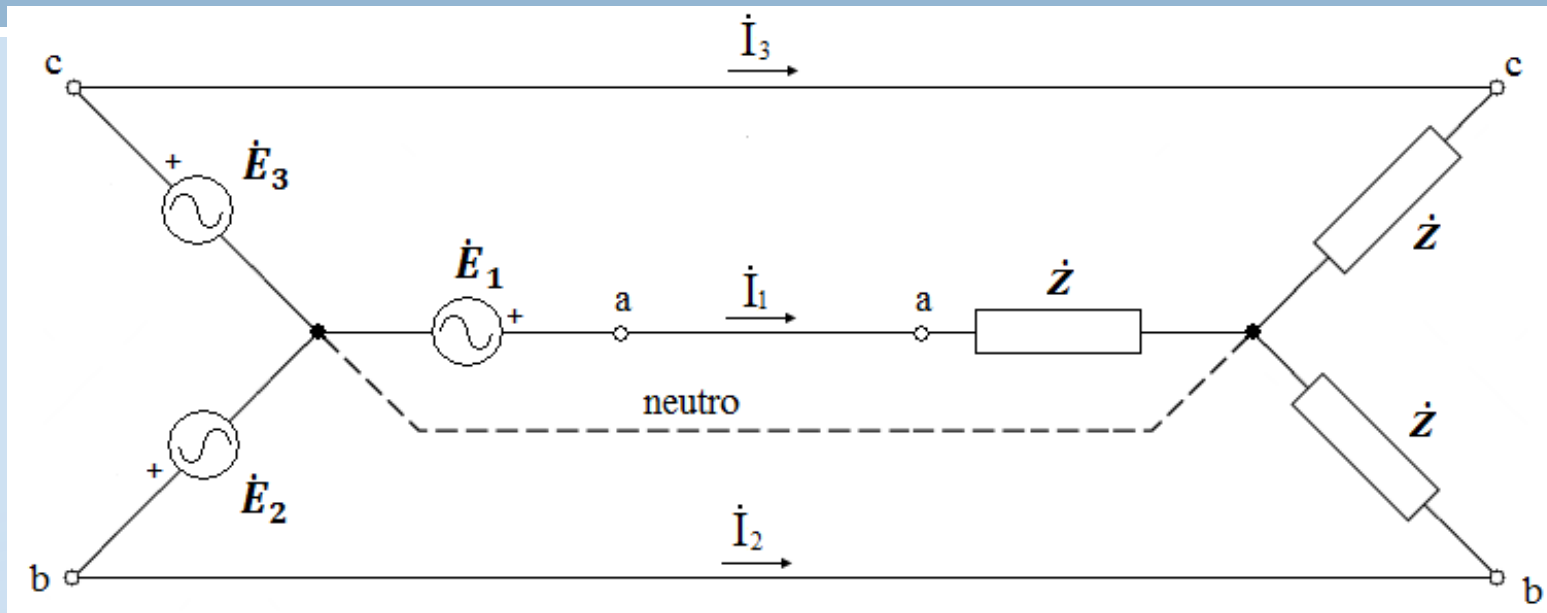
Sequência Negativa

O conjunto de tensão de linha está **30° atrasado** em relação ao conjunto de tensões de fase.

As 3 tensões de linha, também constituem um sistema trifásico simétrico

GERADOR Y COM CARGA Y EQUILIBRADA

21



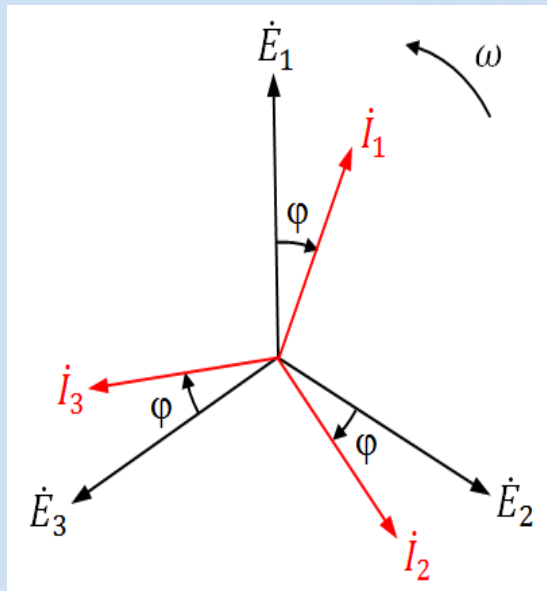
$$I_1 = \frac{\dot{E}_1}{\dot{Z}}, \quad I_2 = \frac{\dot{E}_2}{\dot{Z}}, \quad I_3 = \frac{\dot{E}_3}{\dot{Z}} \quad \text{com} \quad \dot{Z} = |\dot{Z}| \angle \varphi$$

As correntes de LINHA também constituem um sistema trifásico equilibrado. Em um sistema trifásico simétrico equilibrado, basta calcular correntes e tensões apenas em uma das fases e obter as demais defasando $\pm 120^\circ$ em relação às calculadas inicialmente.

GERADOR Y COM CARGA Y EQUILIBRADA

22

- Cada uma das correntes está atrasada, em relação à correspondente tensão de fase, de um ângulo φ



$$\varphi = |\underline{Z}|$$

$$\underline{Z} = R + jX \Rightarrow \cos \varphi = \frac{R}{|\underline{Z}|}$$

$\cos \varphi = \text{FP de cada carga}$

$$\dot{I}_{\text{LINHA}} = \dot{I}_{\text{FASE}} \Rightarrow \text{ligação Y-Y}$$

GERADOR Y COM CARGA Y EQUILIBRADA

23

- A corrente no neutro é dada por:

$$\dot{I}_N = \dot{I}_1 + \dot{I}_2 + \dot{I}_3$$

$$\dot{I}_N = (\dot{E}_1 + \dot{E}_2 + \dot{E}_3) \frac{1}{Z} \quad \text{com} \quad \dot{E}_1 + \dot{E}_2 + \dot{E}_3 = 0$$

- Para o caso em questão:

$$\dot{I}_N = 0$$

Em um sistema trifásico simétrico **EQUILIBRADO** em estrela, a corrente no **NEUTRO** é **NULA** \Rightarrow podemos eliminar o condutor neutro (abrir o circuito), pois não passa corrente, ou substituí-lo por um curto-circuito.

- Trifásico a 4 fios é bastante utilizado na distribuição de energia elétrica. *Observação: procura-se distribuir a carga para que o trifásico permaneça equilibrado*

