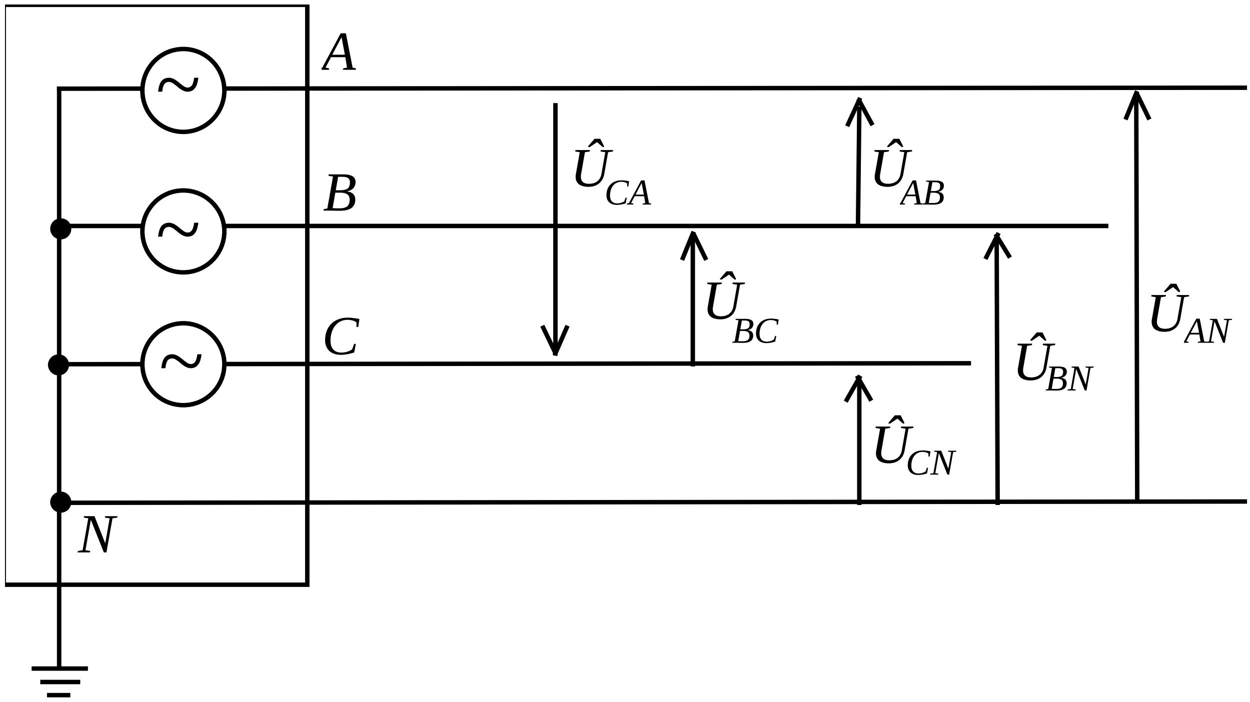
Capítulo 8

Circuitos Trifásicos

Fonte de tensões trifásicas

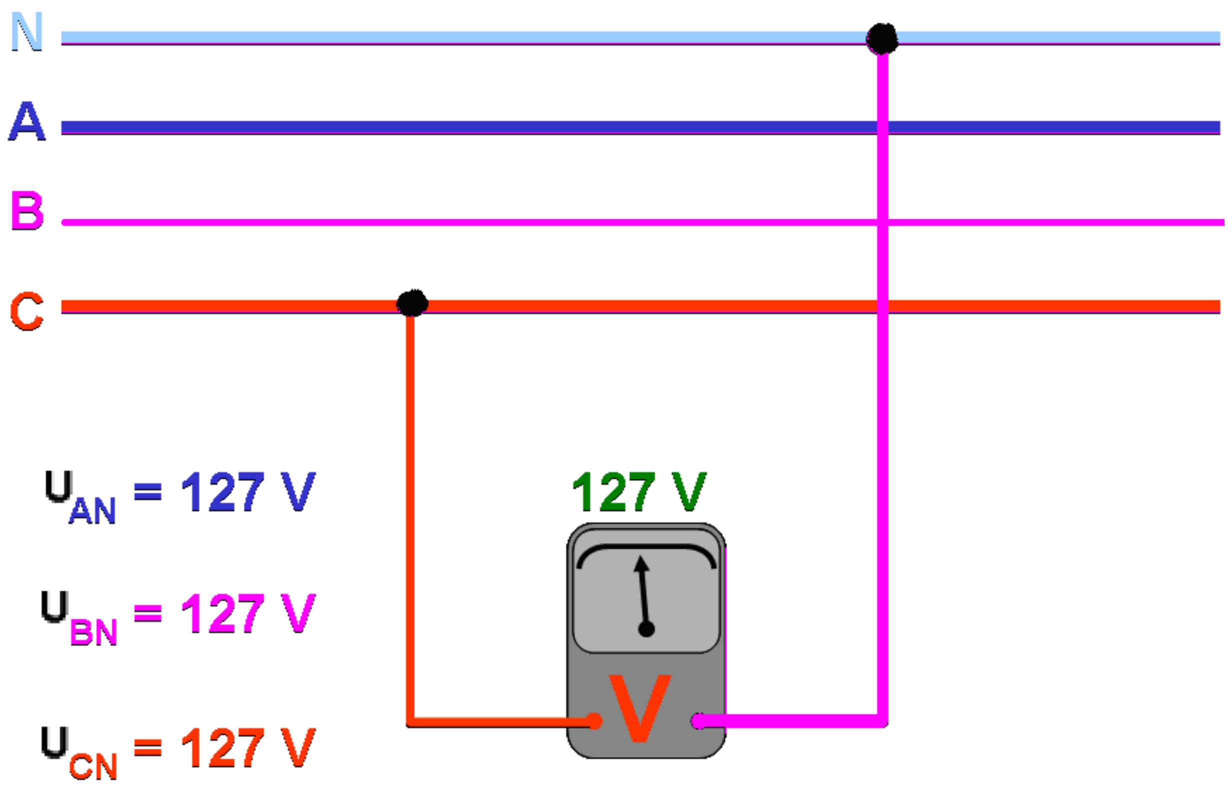
REPRESENTAÇÃO DE UMA FONTE TRIFÁSICA



DENOMINAÇÃO:

OS CONDUTORES *A B* e *C* SÃO AS FASES

O CONDUTOR CONECTADO NO PONTO *N* É O NEUTRO

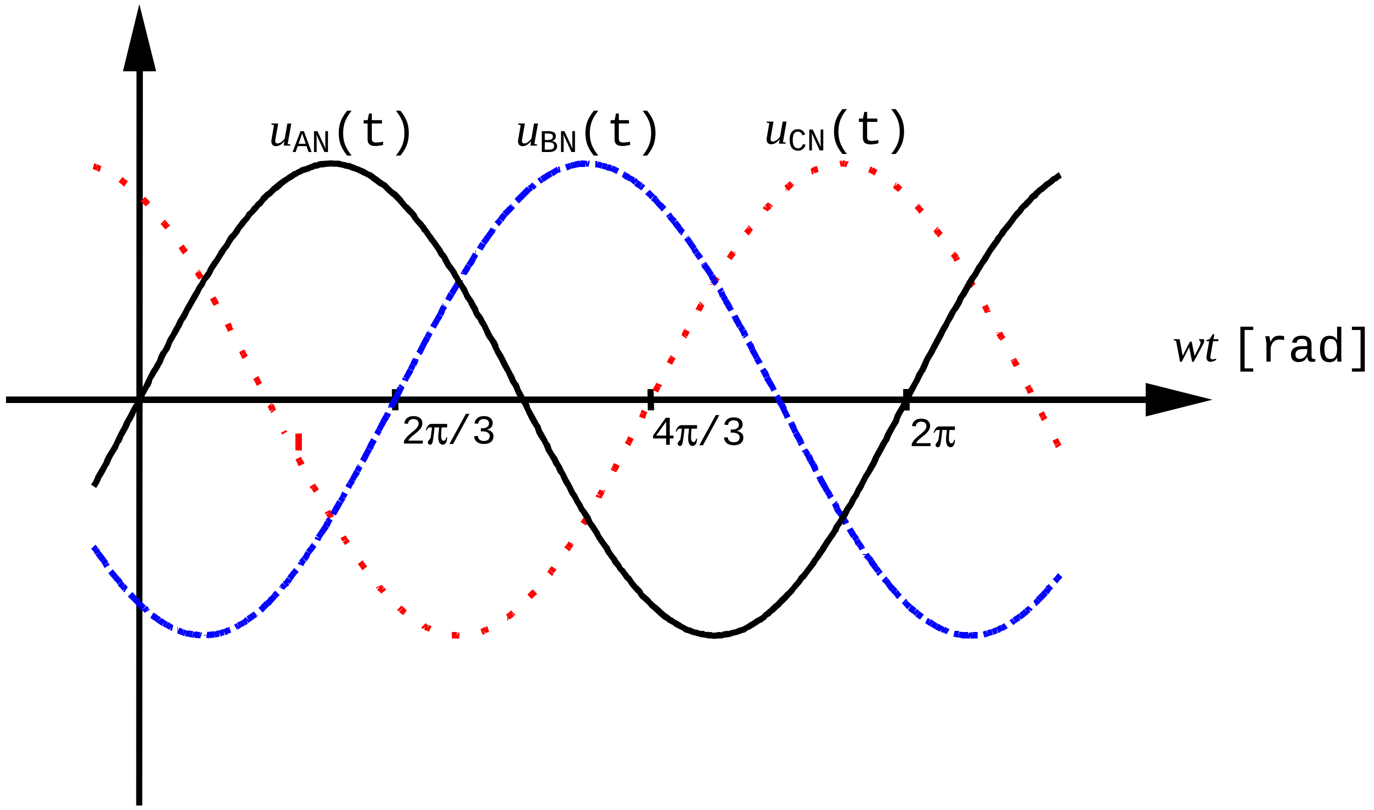


DENOMINAÇÃO: TENSÃO DE FASE

É a tensão entre cada fase e o neutro.

NOTAÇÃO: A letra maiúscula sem acento corresponde ao valor eficaz, e, a letra maiúscula com acento circunflexo corresponde ao fasor da grandeza elétrica.

TENSÕES DE FASE



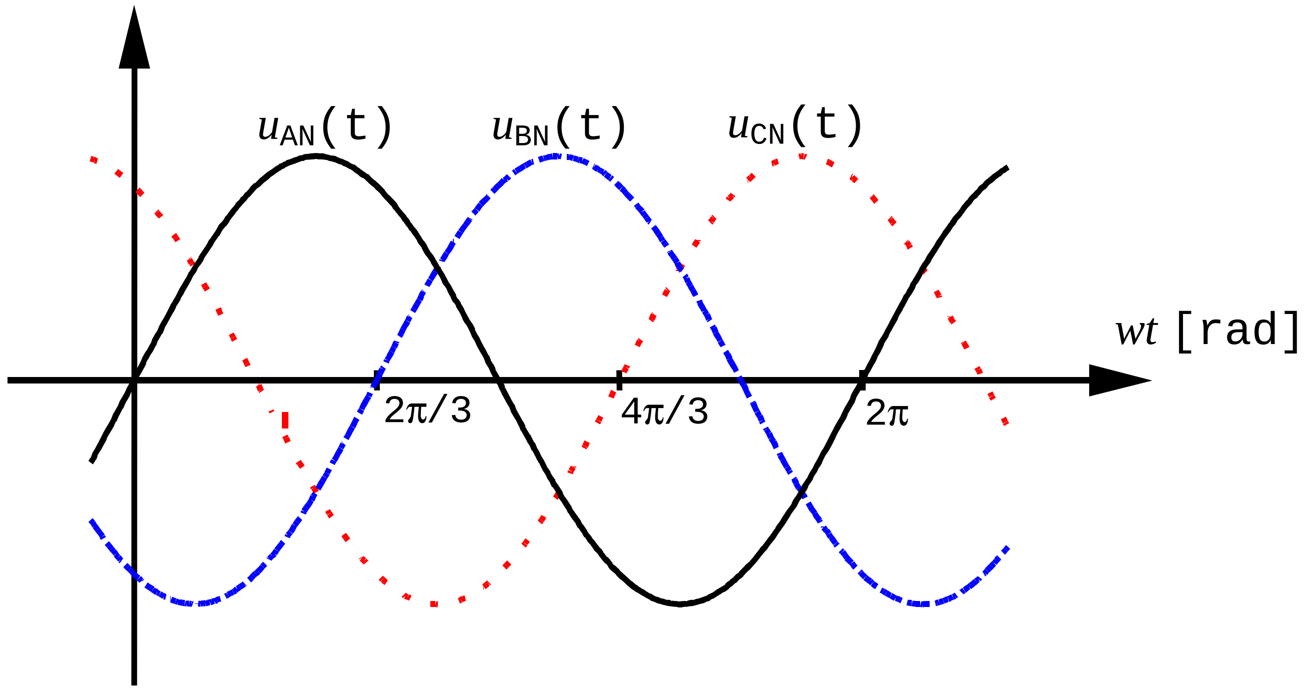
$$\hat{U}_{AN} = U\angle 0^o \quad \textbf{V}$$

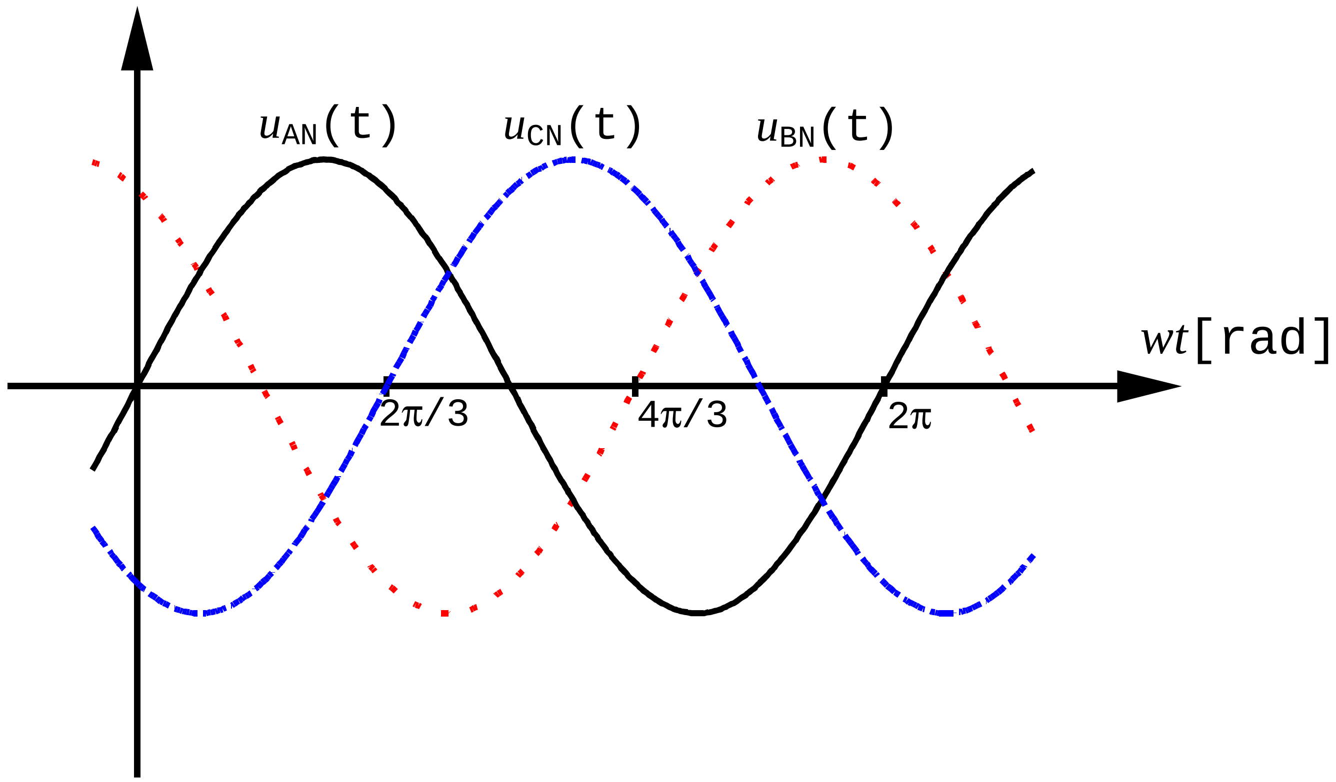
$$\hat{U}_{BN} = U\angle -120^o \quad \textbf{V}$$

$$\hat{U}_{CN} = U\angle -240^o = U\angle 120^o \quad \textbf{V}$$

TENSÕES DE FASE

QUAL A DIFERENÇA?





Seqüência de fases *ABC*

$$\hat{U}_{AN} = U\angle 0^o \quad \text{V}$$

$$\hat{U}_{BN} = U\angle -120^o \quad \text{V}$$

$$\hat{U}_{CN} = U\angle -240^o = U\angle 120^o \quad \text{V}$$

Seqüência de fases *ACB*

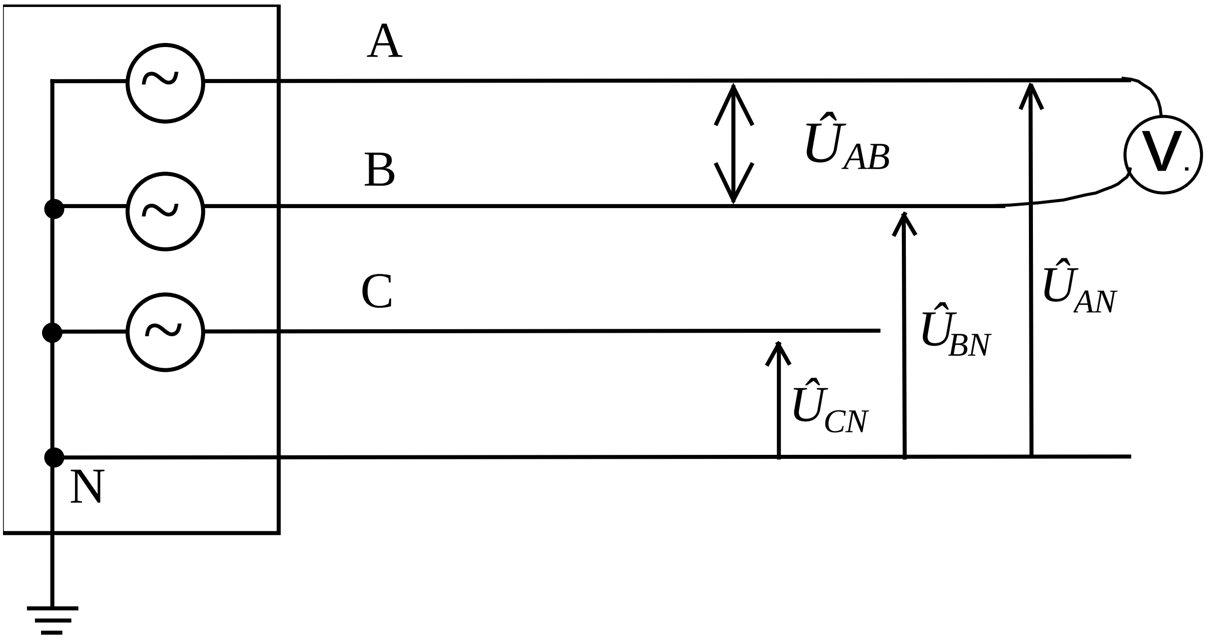
$$\hat{U}_{AN} = U\angle 0^o \quad \text{V}$$

$$\hat{U}_{BN} = U\angle -240^o = U\angle 120^o \quad \text{V}$$

$$\hat{U}_{CN} = U\angle -120^o \quad \text{V}$$

Exemplo 8.1

Qual seria o valor da tensão medida por um voltímetro conectado aos terminais A e B da fonte?



Solução:

Aplicação da lei das tensões de Kirchhoff:

$$\hat{U}_{AB} = \hat{U}_{AN} - \hat{U}_{BN} = \hat{U}_{AN} + \left(-\hat{U}_{BN}\right)$$

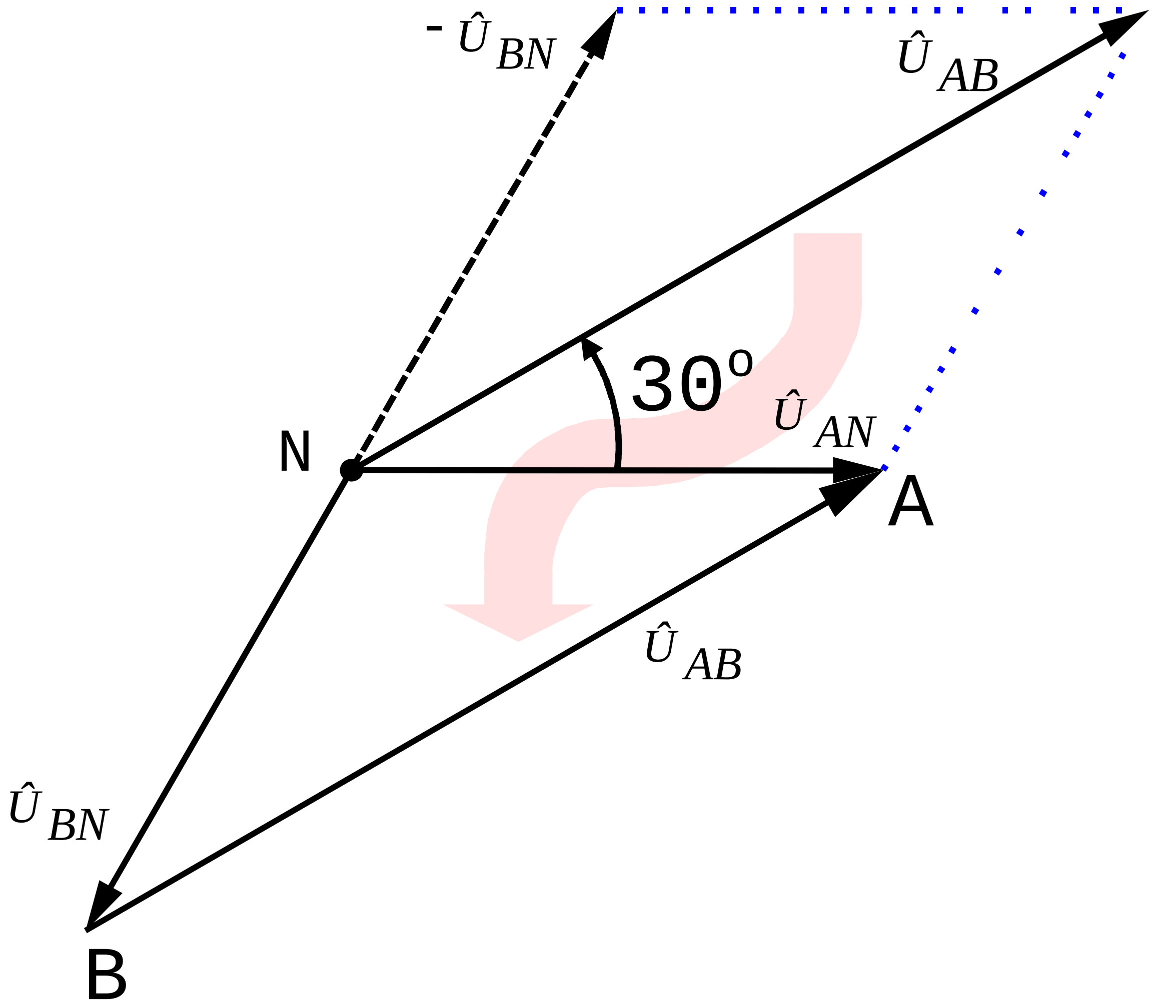
$$\hat{U}_{AB} = U\angle 0^\circ - U\angle(-120^\circ) = U - U\left[-\frac{1}{2} - j\frac{\sqrt{3}}{2}\right] = U\left[\frac{3}{2} + j\frac{\sqrt{3}}{2}\right]$$

$$\hat{U}_{AB} = \sqrt{3}\cdot U\left[\frac{\sqrt{3}}{2} + j\frac{1}{2}\right] = \sqrt{3}\cdot U\left[\cos 30^\circ + j sen 30^\circ\right] = \sqrt{3}\cdot U\angle 30^\circ \quad \mathbf{V}$$

$$\hat{U}_{AB} = \sqrt{3} \cdot U \angle 30^{\circ} \quad \text{V}$$

DENOMINAÇÃO: ***TENSÃO DE LINHA***

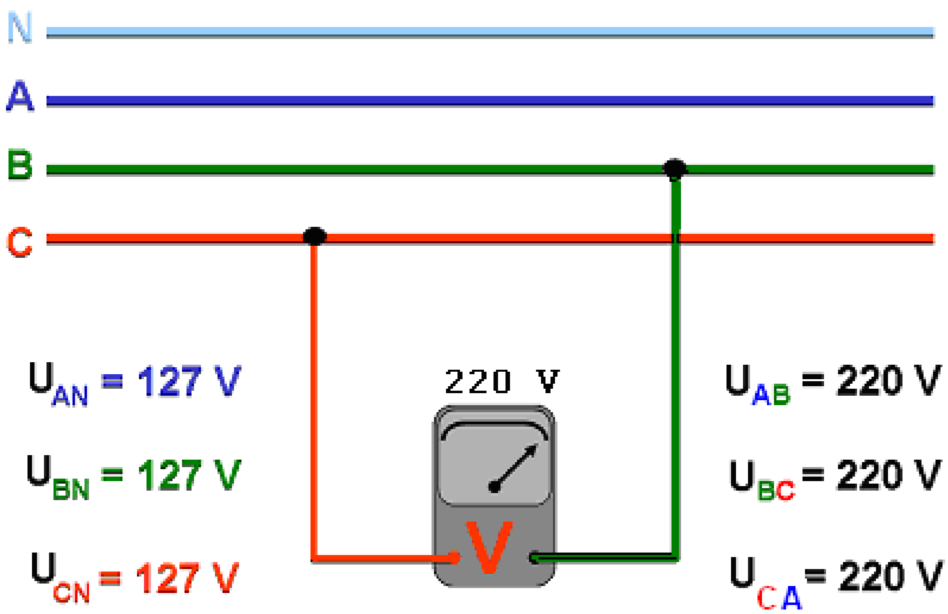
Corresponde à tensão entre duas fases.



Obtenção gráfica de $\hat{U}_{AB}$

A ***TENSÃO DE LINHA*** É $\sqrt{3}\cdot$ VEZES MAIOR QUE A ***TENSÃO DE FASE*** E ESTÁ **ADIANTADA DE 30º**.

TENSÕES DE LINHA



$$\hat{U}_{AB} = \hat{U}_{AN} - \hat{U}_{BN} = \sqrt{3}.U\angle 30° \quad \mathbf{V}$$

$$\hat{U}_{BC} = \hat{U}_{BN} - \hat{U}_{CN} = \sqrt{3}.U\angle -90° \quad \mathbf{V}$$

$$\hat{U}_{CA} = \hat{U}_{CN} - \hat{U}_{AN} = \sqrt{3}.U\angle 150° \quad \mathbf{V}$$

CONVENÇÃO:

a) Para a seqüência de fases *ABC*:

Observando esta notação

$$\overset{\frown}{AB}\,\overset{\frown}{BC}\,\overset{\frown}{CA}$$

as tensões de linha são denotadas por:

$$\hat{U}_{AB} \qquad \hat{U}_{BC} \qquad \hat{U}_{CA}$$

b) Para a seqüência de fases *ACB*:

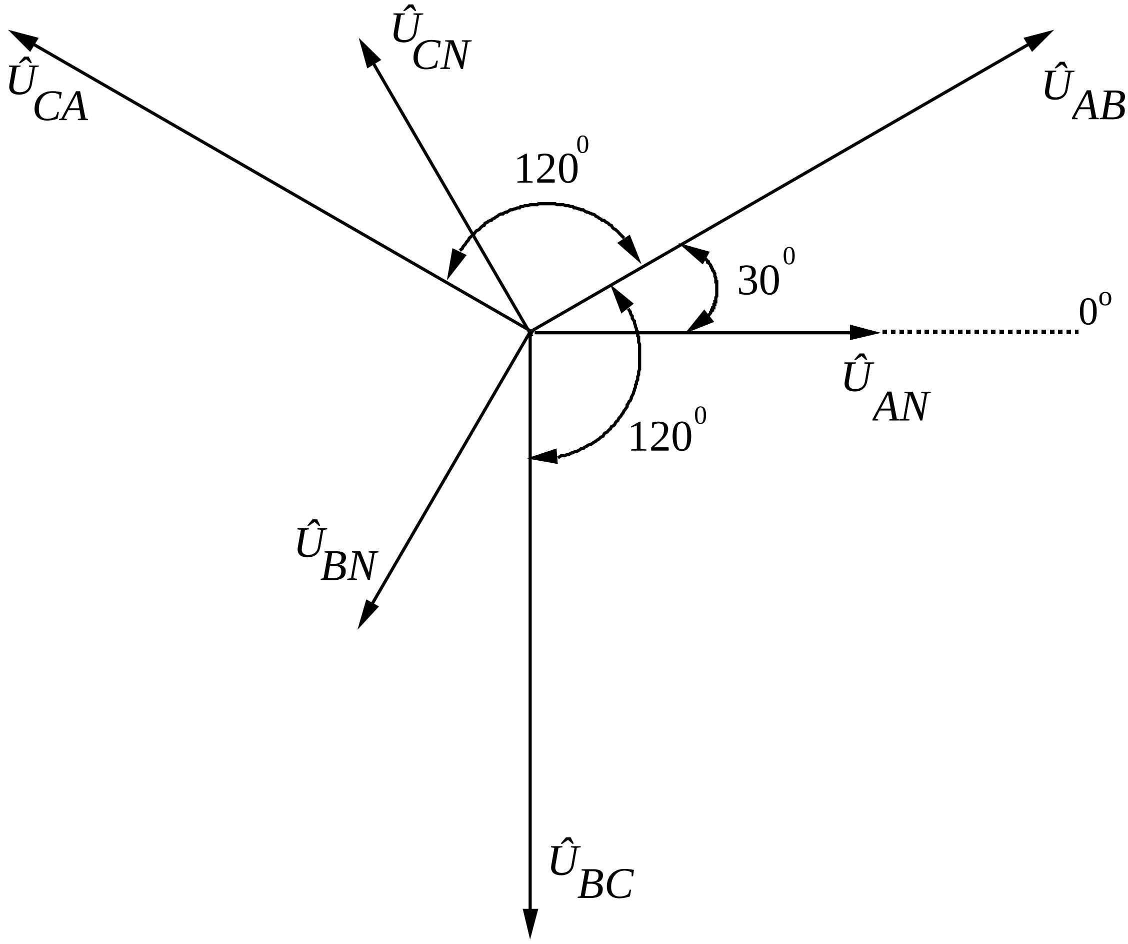
Observando esta notação

$$\overset{\frown}{AC}\,\overset{\frown}{CB}\,\overset{\frown}{BA}$$

as tensões de linha são denotadas por:

$$\hat{U}_{AC} \qquad \hat{U}_{CB} \qquad \hat{U}_{BA}$$

DIAGRAMA FASORIAL

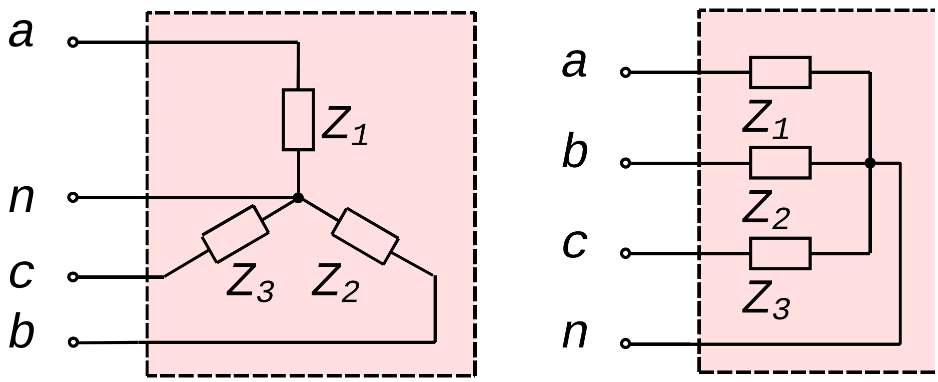


Qual é a seqüência de fases?

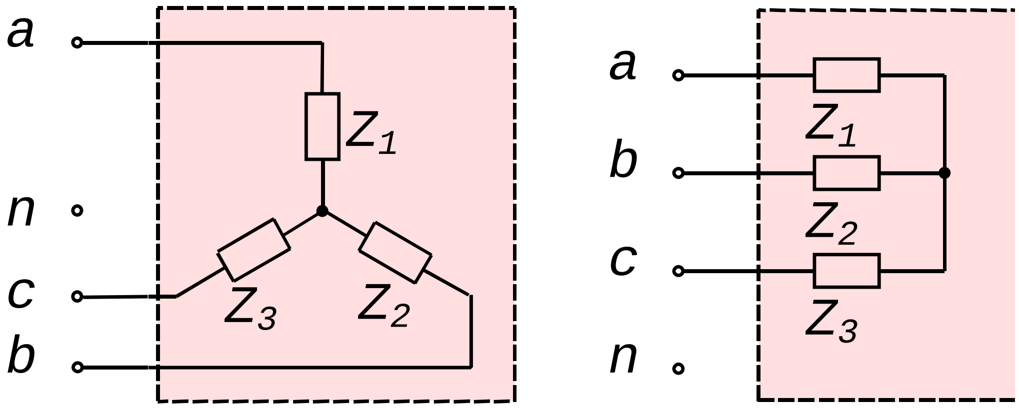
Convenção: **considerar sentido de giro dos fasores anti-horário e observar o giro dos fasores a partir da referência 0^o**

Conexões trifásicas

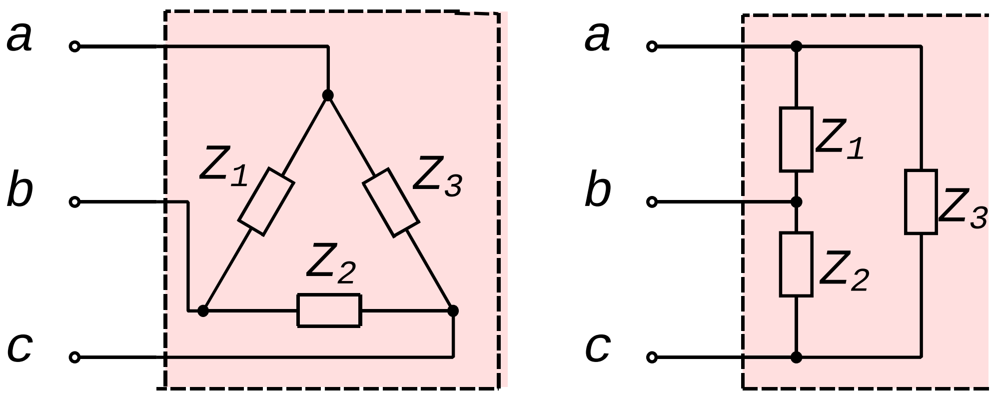
- **Estrela ou Y - com neutro**



- **Estrela ou Y - sem neutro**



- **Triângulo ou Δ (Delta)**



Se as três impedâncias da carga forem iguais ($Z_1=Z_2=Z_3$), a carga é denominada *equilibrada*.

Caso contrário, a carga trifásica é considerada *desequilibrada*.

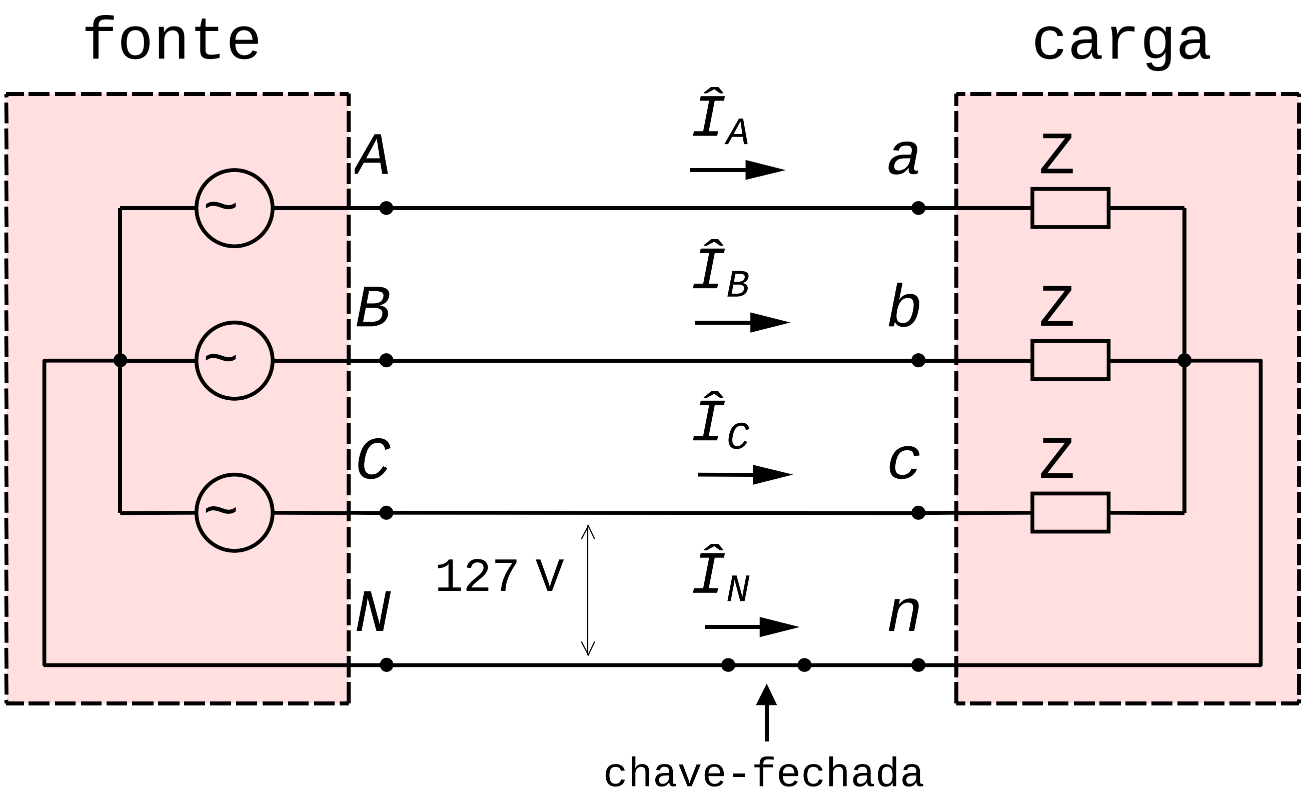
Na prática:

Todas as fontes trifásicas são equilibradas.

Assim, um circuito trifásico é considerado equilibrado se a carga for equilibrada e o circuito será desequilibrado se a carga for desequilibrada.

Circuitos equilibrados

Carga equilibrada em Y-4fios



NOTAÇÃO: **As letras maiúsculas *A*, *B*, *C* e *N* indicam os terminais da fonte e as letras minúsculas *a*, *b*, *c* e *n* indicam os terminais da carga.**

A carga trifásica tem em cada fase uma resistência de 120 Ω e uma reatância indutiva de 160 Ω. A tensão de fase é igual a 127 V.

Considerando a seqüência de fases *ABC* e a tensão de fase $\hat{U}_{AN}$ como referência angular, as tensões de fase fornecidas pela fonte são iguais a:

TENSÕES DE FASE

$$\hat{U}_{an} = \hat{U}_{AN} = 127\angle 0^\circ \quad \text{V}$$

$$\hat{U}_{bn} = \hat{U}_{BN} = 127\angle -120^\circ \quad \text{V}$$

$$\hat{U}_{cn} = \hat{U}_{CN} = 127\angle 120^\circ \quad \text{V}$$

TENSÕES DE LINHA

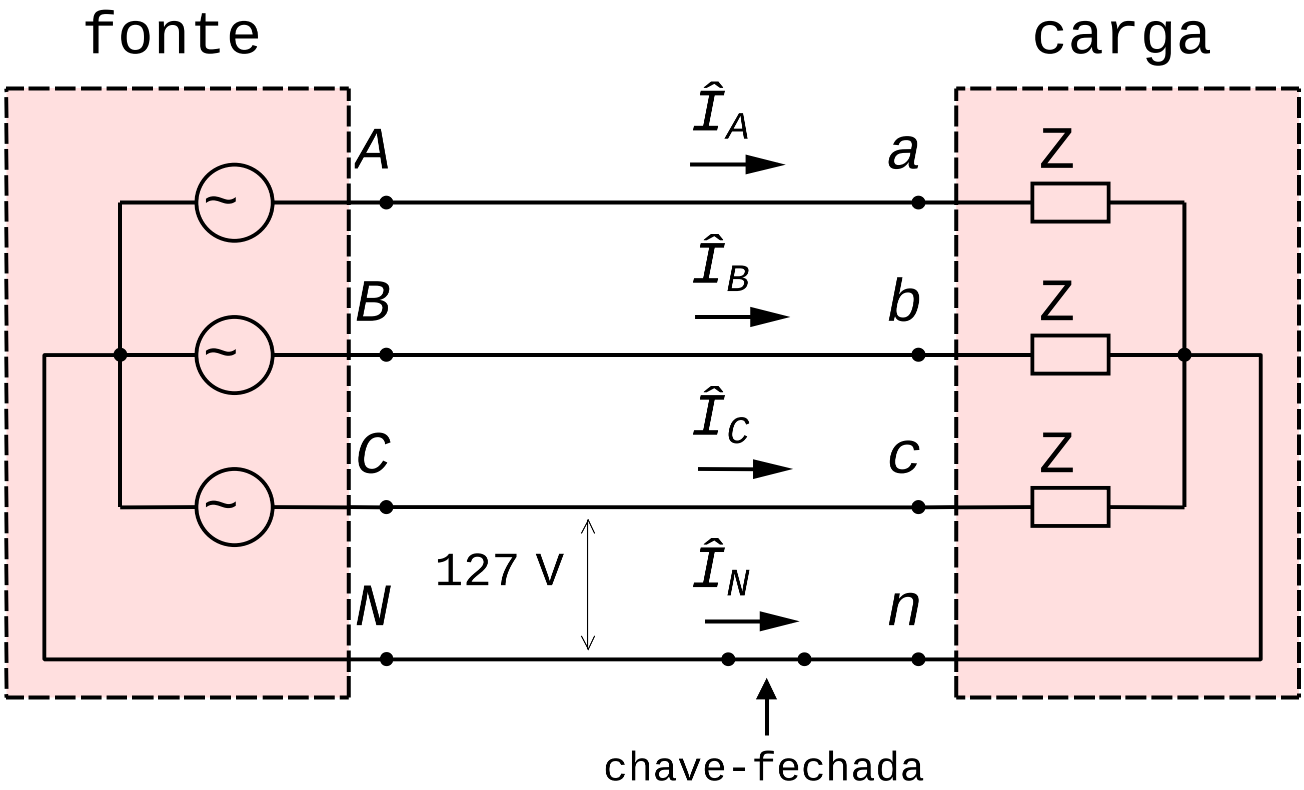
$$\hat{U}_{ab} = \sqrt{3}.127\angle 30^\circ = 220\angle 30^\circ \quad \text{V}$$

$$\hat{U}_{bc} = \sqrt{3}.127\angle -90^\circ = 220\angle -90^\circ \quad \text{V}$$

$$\hat{U}_{ca} = \sqrt{3}.127\angle 150^\circ = 220\angle 150^\circ \quad \text{V}$$

A impedância da carga vale:

$$Z = R + jX = 120 + j160 = 200\angle 53{,}13^\circ \quad \Omega$$



DENOMINAÇÃO:

AS CORRENTES QUE VÃO DA FONTE PARA A CARGA, SÃO AS *CORRENTES DE LINHA*.

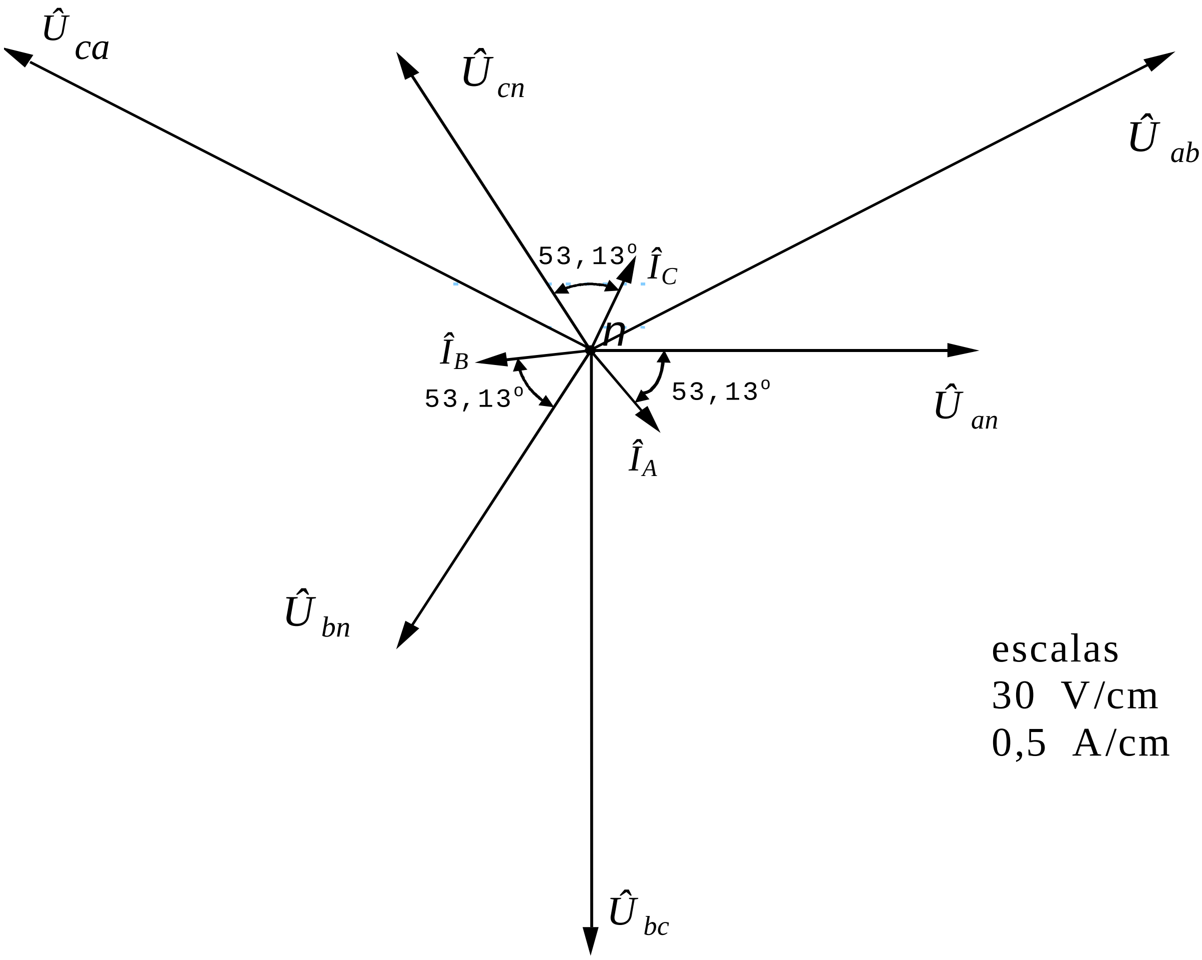
CÁLCULO DAS *CORRENTES DE LINHA*

$$\hat{I}_A = \frac{\hat{U}_{an}}{Z} = \frac{127\angle 0^\circ}{200\angle 53{,}13^\circ} = 0{,}635\angle -53{,}13^\circ \quad \text{A}$$

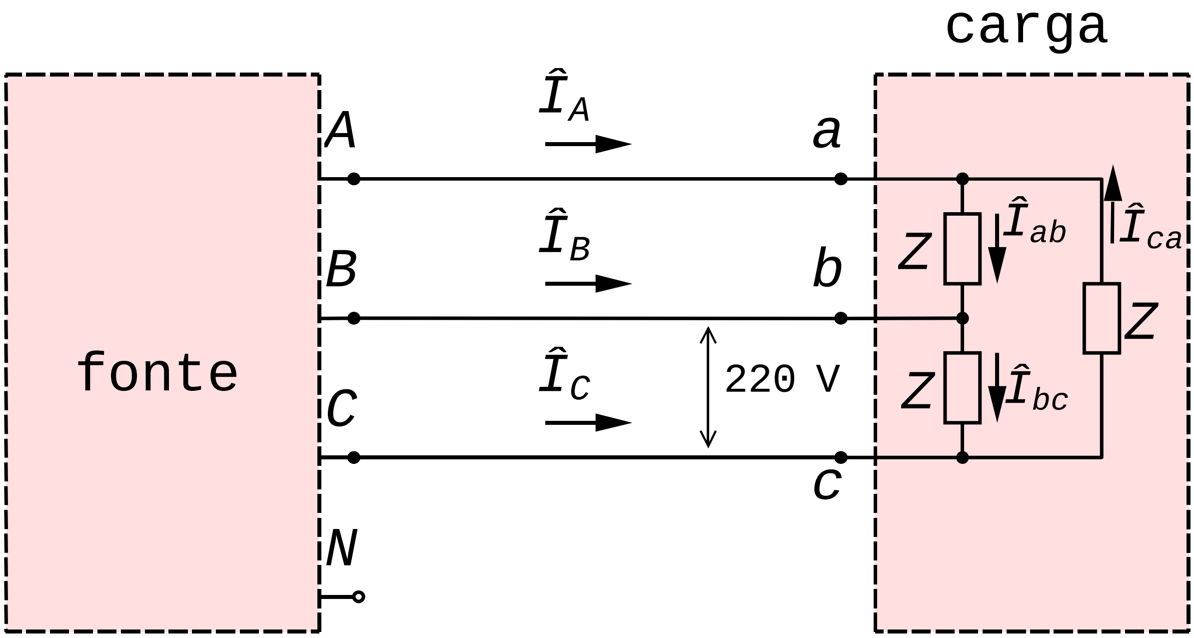
$$\hat{I}_B = \frac{\hat{U}_{bn}}{Z} = \frac{127\angle -120^\circ}{200\angle 53{,}13^\circ} = 0{,}635\angle -173{,}13^\circ \quad \text{A}$$

$$\hat{I}_C = \frac{\hat{U}_{cn}}{Z} = \frac{127\angle 120^\circ}{200\angle 53{,}13^\circ} = 0{,}635\angle 66{,}87^\circ \quad \text{A}$$

DIAGRAMA FASORIAL



Carga equilibrada em Δ



DENOMINAÇÃO:

AS CORRENTES QUE CIRCULAM NA IMPEDÂNCIA DA CARGA, SÃO AS *CORRENTES DE FASE*.

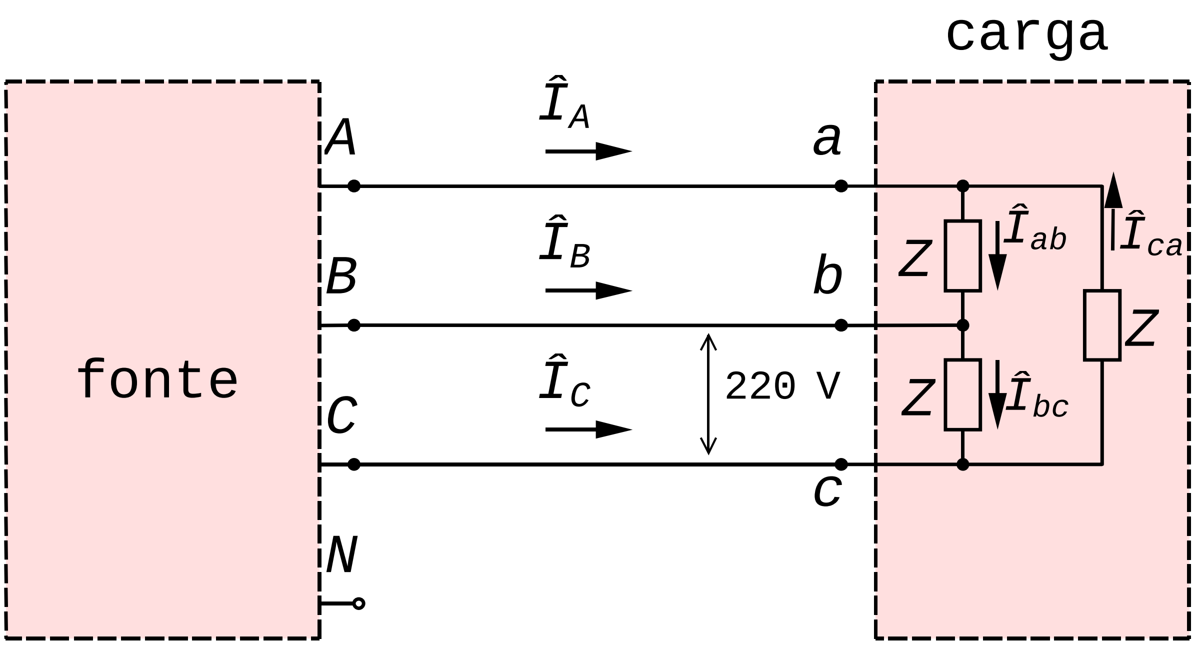
Convenção para o sentido das *correntes de fase*:

a) Para a seqüência de fases *ABC*:

$$\overset{\frown}{AB}\,\overset{\frown}{BC}\,\overset{\frown}{CA} \Rightarrow \quad \hat{I}_{ab} \qquad \hat{I}_{bc} \qquad \hat{I}_{ca}$$

b) Para a seqüência de fases *ACB*:

$$\overset{\frown}{AC}\,\overset{\frown}{CB}\,\overset{\frown}{BA} \Rightarrow \quad \hat{I}_{ac} \qquad \hat{I}_{cb} \qquad \hat{I}_{ba}$$



A carga trifásica tem em cada fase uma resistência de 120 Ω e uma reatância indutiva de 160 Ω. A tensão de linha é igual a 220 V.

Considerando a seqüência de fases *ABC* e a tensão de linha $\hat{U}_{AB}$ como referência angular, as tensões de linha fornecidas pela fonte são iguais a:

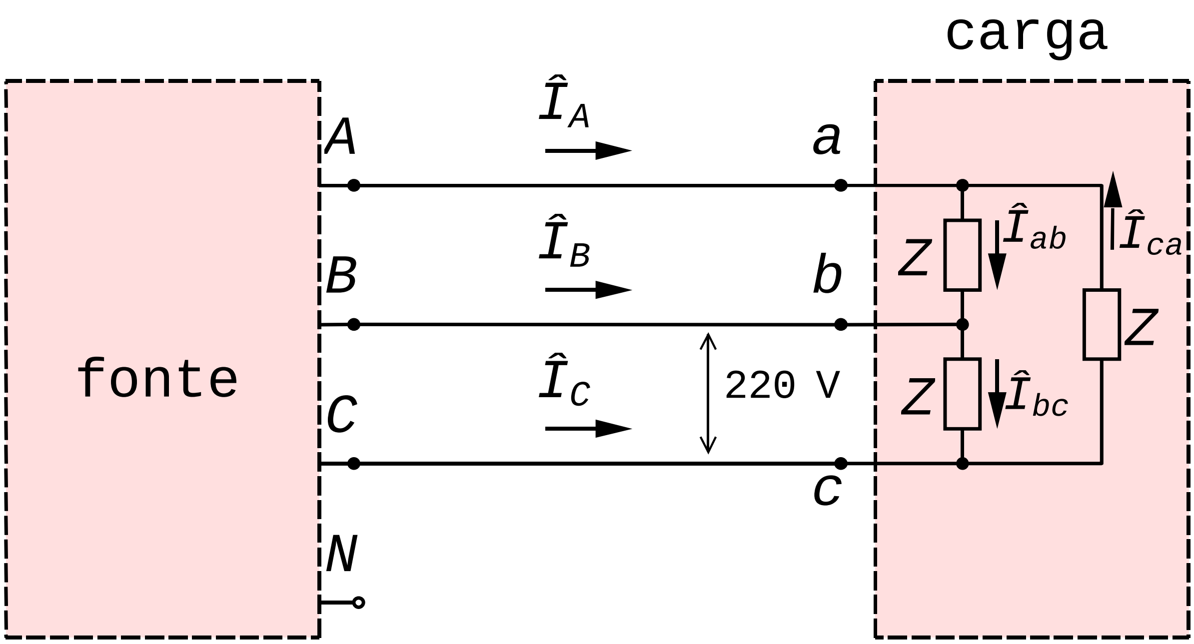
$$\hat{U}_{AB} = 220\angle 0° \text{ V}$$

$$\hat{U}_{BC} = 220\angle{-120°} \text{ V}$$

$$\hat{U}_{CA} = 220\angle 120° \text{ V}$$

A impedância na carga vale:

$$Z = R + jX = 120 + j160 = 200\angle 53{,}13^\circ \quad \Omega$$



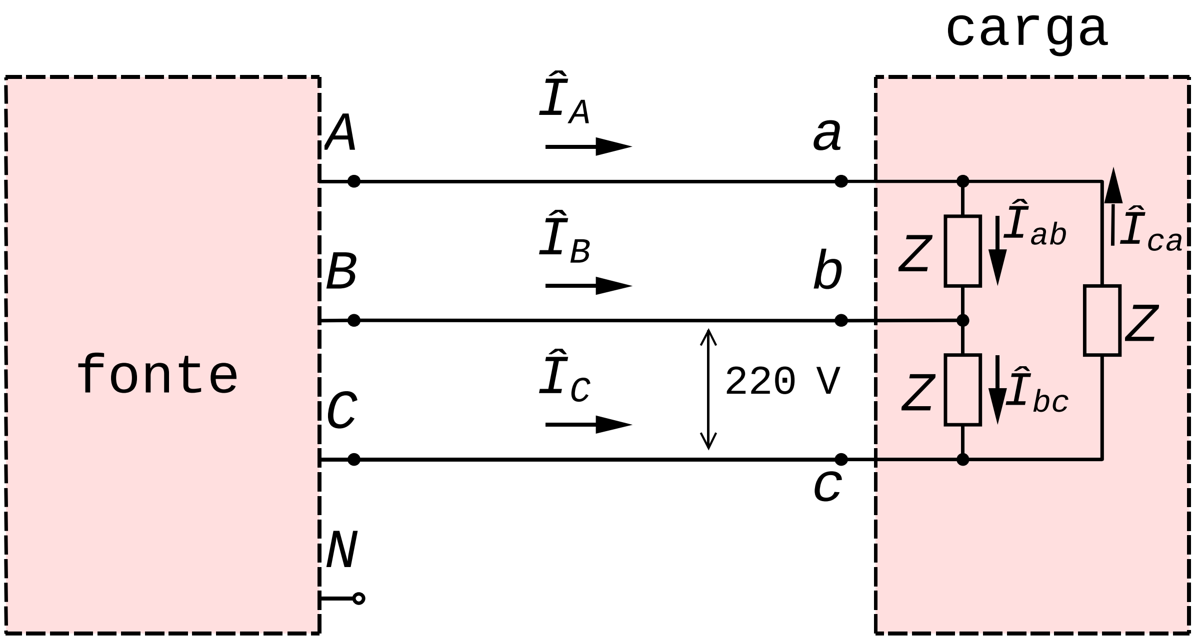
CÁLCULO DAS *CORRENTES DE FASE*

$$\hat{I}_{ab} = \frac{\hat{U}_{AB}}{Z} = \frac{220\angle 0^\circ}{200\angle 53{,}13^\circ} = 1{,}1\angle -53{,}13^\circ \quad \text{A}$$

$$\hat{I}_{bc} = \frac{\hat{U}_{BC}}{Z} = \frac{220\angle -120^\circ}{200\angle 53{,}13^\circ} = 1{,}1\angle -173{,}13^\circ \quad \text{A}$$

$$\hat{I}_{ca} = \frac{\hat{U}_{CA}}{Z} = \frac{220\angle 120^\circ}{200\angle 53{,}13^\circ} = 1{,}1\angle 66{,}87^\circ \quad \text{A}$$

CÁLCULO DAS *CORRENTES DE LINHA*



Para o nó *a* tem-se:

$$\hat{I}_A + \hat{I}_{ca} - \hat{I}_{ab} = 0$$

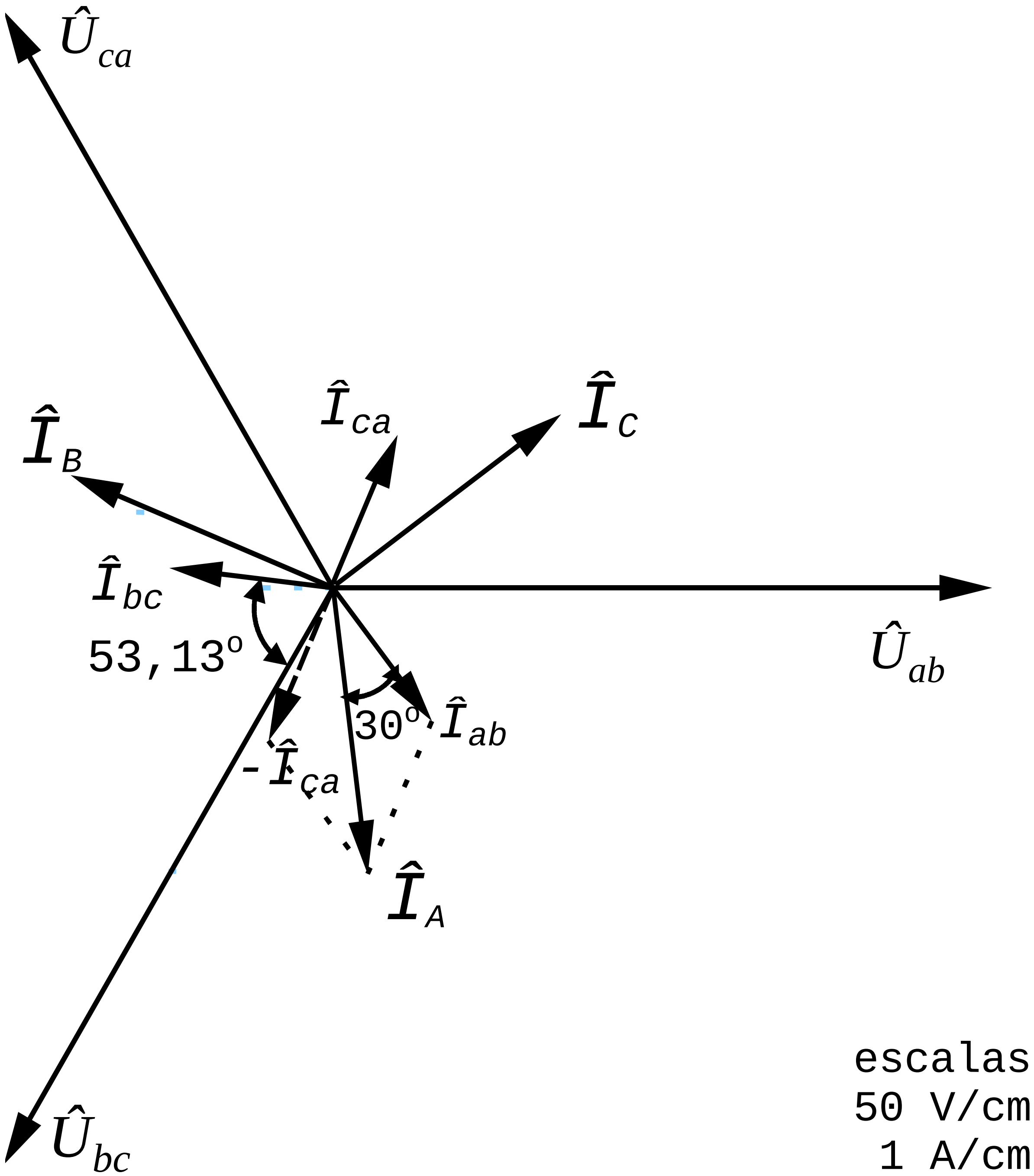
$$\hat{I}_A = \hat{I}_{ab} - \hat{I}_{ca} = 0{,}2279 - j1{,}8916 = 1{,}9053\angle -83{,}13^\circ \quad \textbf{A}$$

De forma similar, obtém-se para as outras fases:

$$\hat{I}_B = 1{,}9053\angle 156{,}87^\circ \quad \textbf{A}$$

$$\hat{I}_C = 1{,}9053\angle 36{,}87^\circ \quad \textbf{A}$$

DIAGRAMA FASORIAL



Relação entre *corrente de linha* e *corrente de fase*:

$$\frac{\hat{I}_A}{\hat{I}_{ab}} = \frac{1{,}9053\angle -83{,}13^\circ}{1{,}1\angle -53{,}13^\circ} = \sqrt{3}\angle -30^\circ$$

A *CORRENTE DE LINHA* É $\sqrt{3}$ VEZES MAIOR QUE A *CORRENTE DE FASE* E ESTÁ ATRASADA DE 30^{o}.

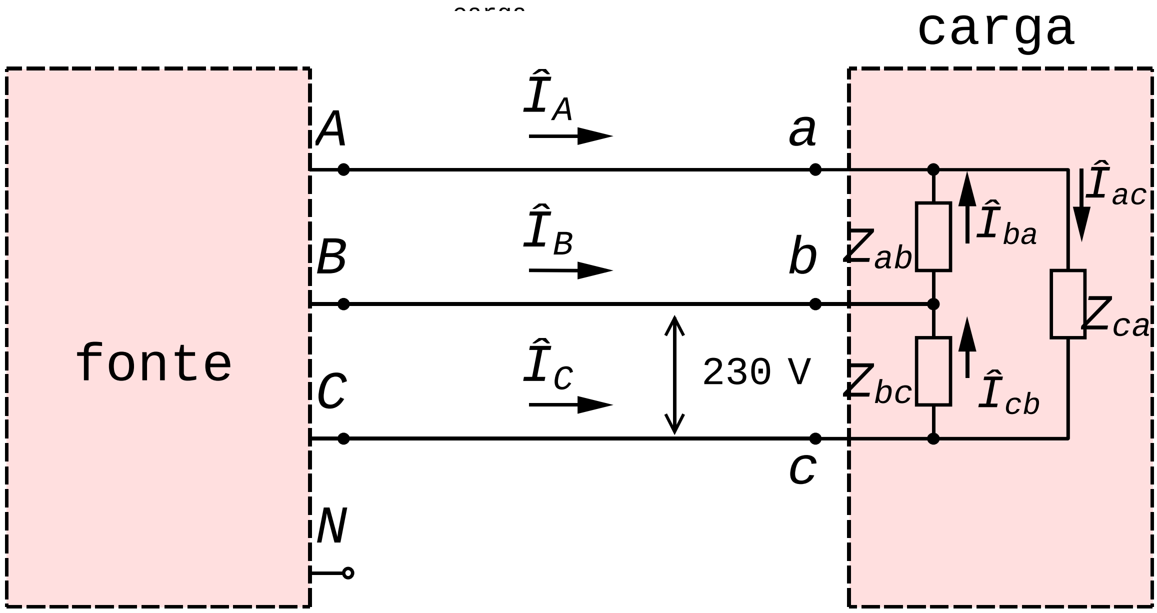
$$\left|\hat{I}_{LINHA}\right| = \sqrt{3}\cdot\left|\hat{I}_{FASE}\right|$$

ATENÇÃO:

Esta relação é válida somente para carga Δ-equilibrada.

Circuitos desequilibrados

Carga desequilibrada em Δ



As impedâncias por fase valem:

$$Z_{ab} = 100 + j100\sqrt{3} = 200\angle 60^\circ \quad \Omega$$

$$Z_{bc} = 100 - j100 = 100\sqrt{2}\angle -45^\circ \quad \Omega$$

$$Z_{ca} = 150 = 150\angle 0^\circ \quad \Omega$$

Para a seqüência de fases *ACB* e assumindo a tensão de linha $\hat{U}_{ba}$ como referência angular, as tensões de linha valem:

$$\hat{U}_{ba} = 230\angle 0^\circ \quad \text{V}$$

$$\hat{U}_{cb} = 230\angle 120^\circ \quad \text{V}$$

$$\hat{U}_{ac} = 230\angle -120^\circ \quad \text{V}$$

***As correntes de fase* são iguais a:**

$$\hat{I}_{ba} = \frac{\hat{U}_{ba}}{Z_{ab}} = \frac{230\angle 0^\circ}{200\angle 60^\circ} = 1{,}15\angle -60^\circ \quad \text{A}$$

$$\hat{I}_{cb} = \frac{\hat{U}_{cb}}{Z_{bc}} = \frac{230\angle 120^\circ}{100\sqrt{2}\angle -45^\circ} = 1{,}6263\angle 165^\circ \quad \text{A}$$

$$\hat{I}_{ac} = \frac{\hat{U}_{ac}}{Z_{ca}} = \frac{230\angle -120^\circ}{150} = 1{,}5333\angle -120^\circ \quad \text{A}$$

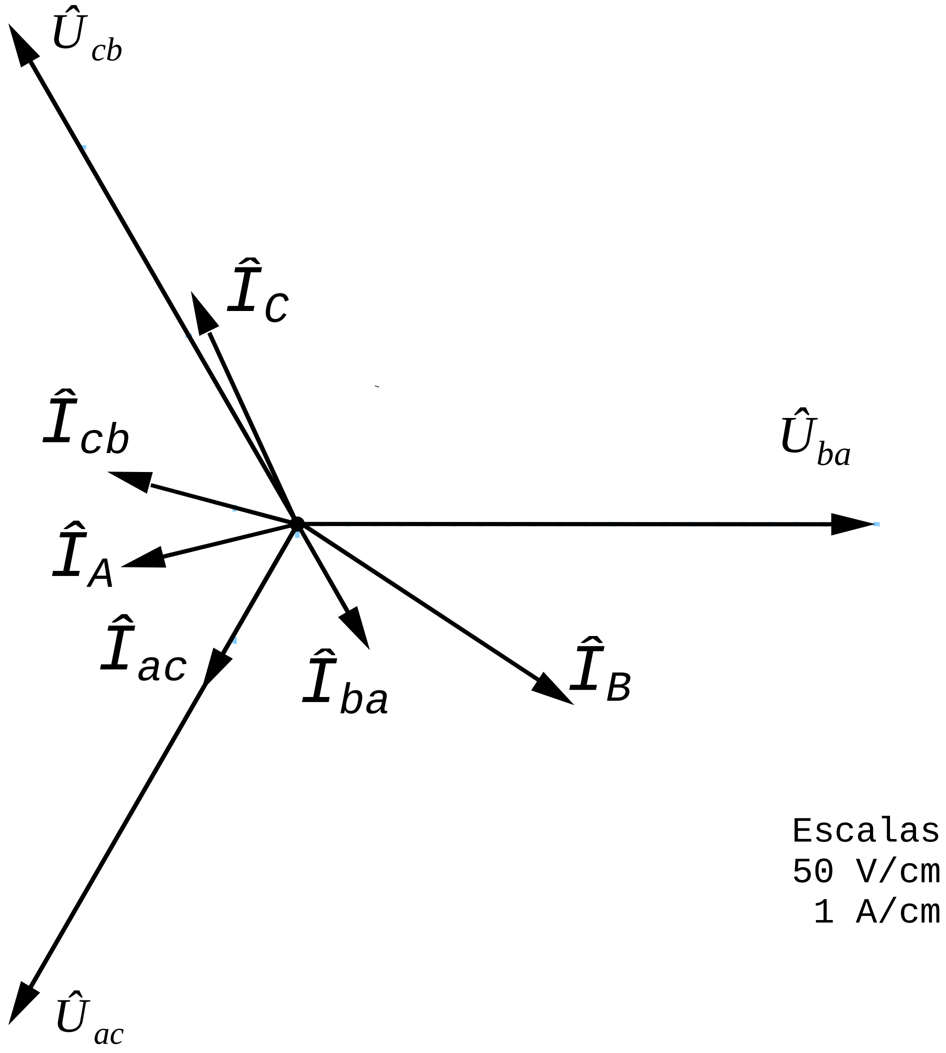
As *correntes de linha* são calculadas por:

$$\hat{I}_A = \hat{I}_{ac} - \hat{I}_{ba} = -1{,}3416 - j0{,}332 = 1{,}3820\angle -166{,}10^\circ \quad \text{A}$$

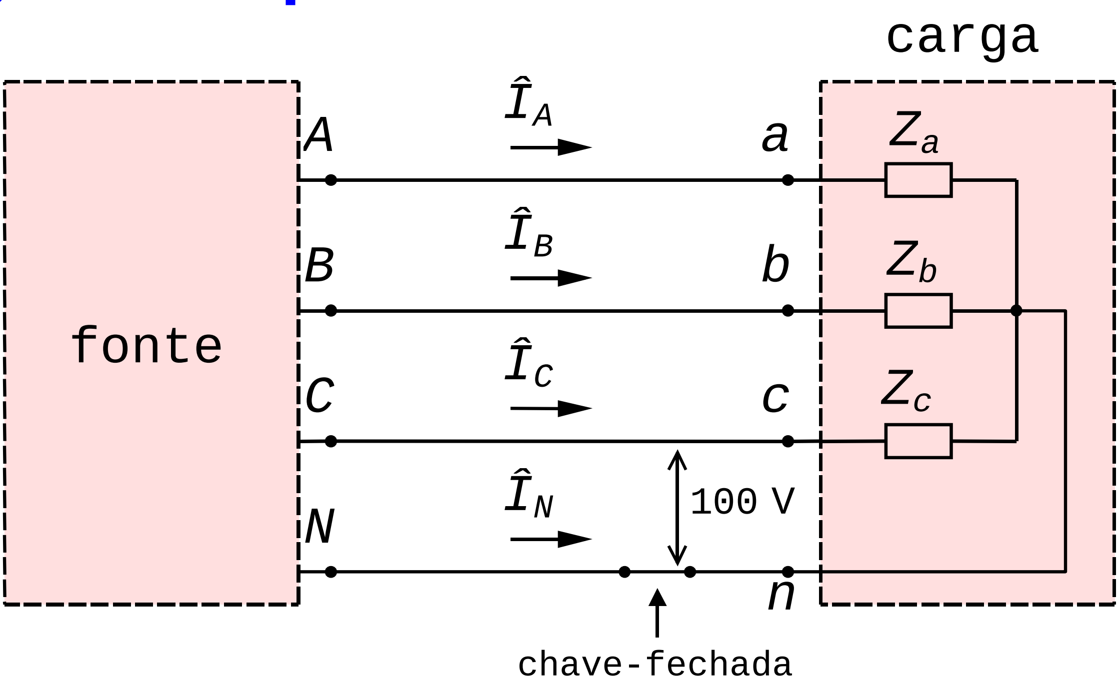
$$\hat{I}_B = \hat{I}_{ba} - \hat{I}_{cb} = 2{,}1459 - j1{,}4168 = 2{,}5714\angle -33{,}43^\circ \quad \text{A}$$

$$\hat{I}_C = \hat{I}_{cb} - \hat{I}_{ac} = -0{,}8043 + j1{,}7488 = 1{,}9249\angle 114{,}70^\circ \quad \text{A}$$

DIAGRAMA FASORIAL



Carga desequilibrada em Y-4 fios



As impedâncias da carga por fase valem:

$$Z_a = 100 = 100\angle 0^\circ \quad \Omega$$

$$Z_b = 30 - j40 = 50\angle -53{,}13^\circ \quad \Omega$$

$$Z_c = 50 + j50 = 50\sqrt{2}\angle 45^\circ \quad \Omega$$

Considerando a tensão de fase $\hat{U}_{AN}$ como referência angular tem-se:

$$\hat{U}_{an} = 100\angle 0^\circ \quad \text{V}$$

$$\hat{U}_{bn} = 100\angle -120^\circ \quad \text{V}$$

$$\hat{U}_{cn} = 100\angle 120^\circ \quad \text{V}$$

As *correntes de linha* valem:

$$\hat{I}_A = \frac{\hat{U}_{an}}{Z_a} = \frac{100\angle 0^\circ}{100} = 1{,}0\angle 0^\circ \quad \text{A}$$

$$\hat{I}_B = \frac{\hat{U}_{bn}}{Z_b} = \frac{100\angle -120^\circ}{50\angle -53{,}13^\circ} = 2\angle -66{,}87^\circ \quad \text{A}$$

$$\hat{I}_C = \frac{\hat{U}_{cn}}{Z_c} = \frac{100\angle 120^\circ}{50\sqrt{2}\angle 45^\circ} = 1{,}4142\angle 75^\circ \quad \text{A}$$

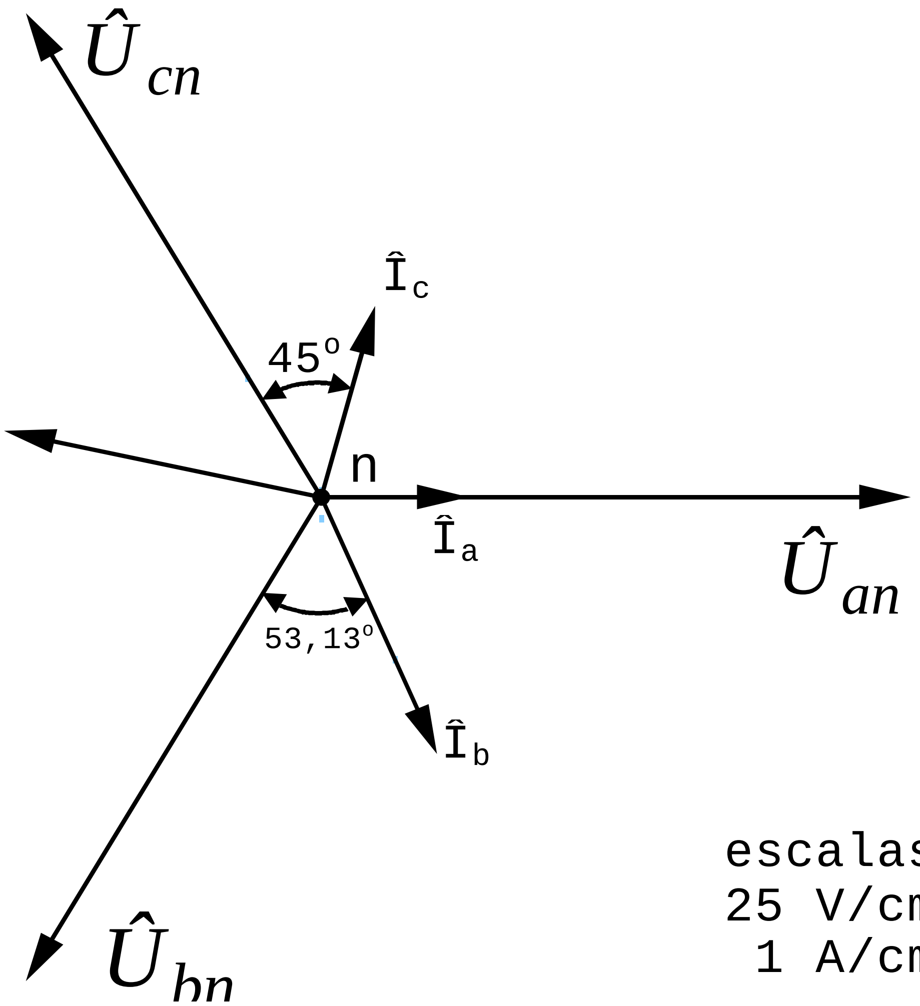
Corrente no condutor neutro:

Aplica-se a lei de nós de Kirchhoff para o ponto neutro da carga:

$$\hat{I}_N = -\left(\hat{I}_A + \hat{I}_B + \hat{I}_C\right)$$

$$\hat{I}_N = -2{,}1516 + j0{,}4732 = 2{,}2030\angle 167{,}60^\circ \quad \text{A}$$

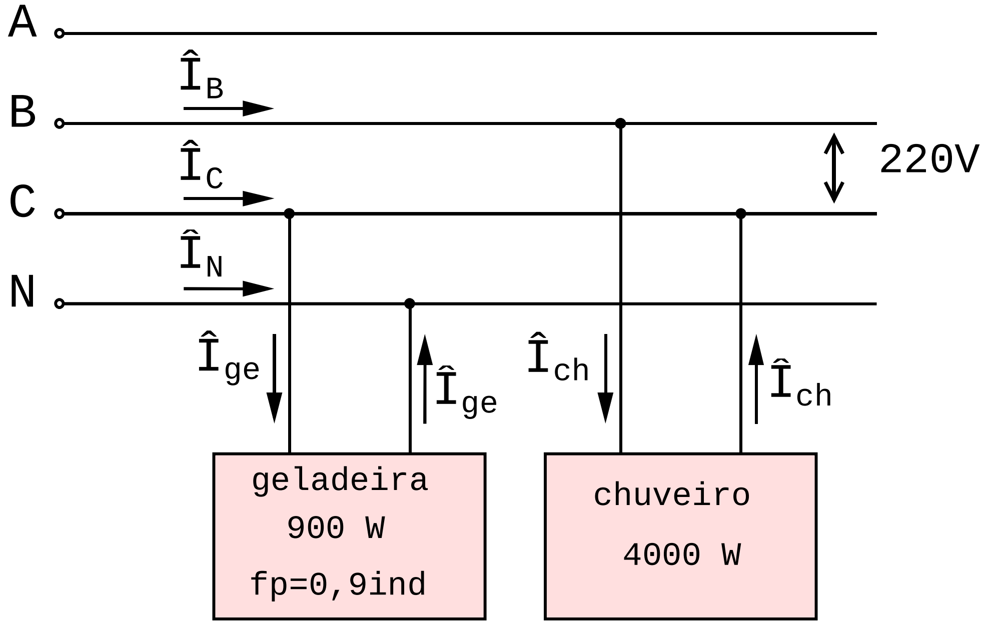
DIAGRAMA FASORIAL



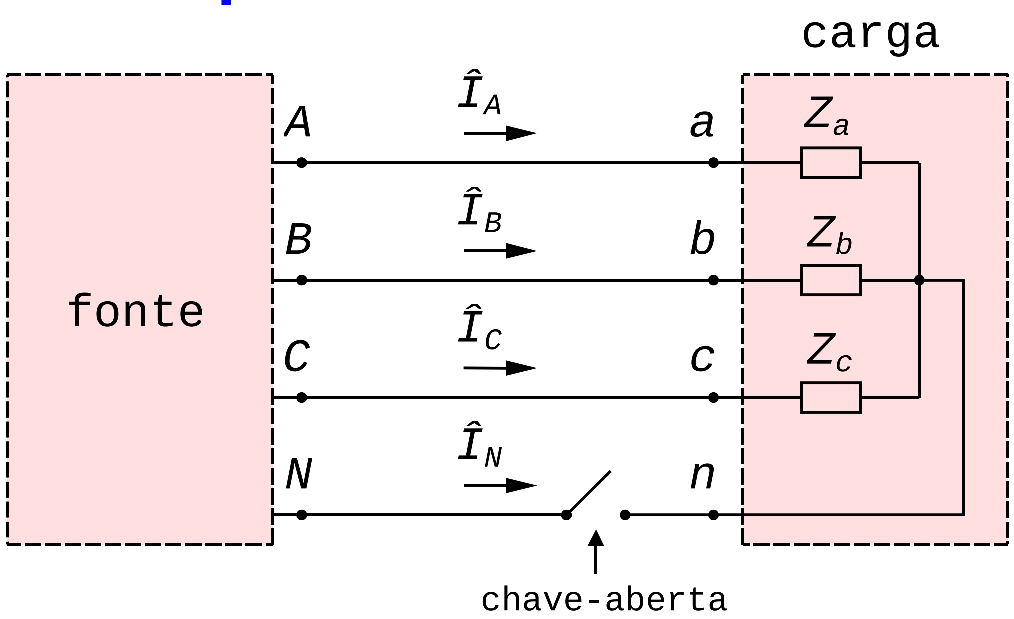
escalas
25 V/cm
1 A/cm

DESTAQUE:

Estudar Exemplo 8.2



Carga desequilibrada em Y-3fios



Detalhes:

- **A fonte trifásica é equilibrada e portanto, os valores definidos para as *tensões de fase e de linha* fornecidas pela fonte continuam os mesmos já definidos anteriormente.**

- **As *tensões de linha* aplicadas sobre a carga são iguais às *tensões de linha* fornecidas pela fonte, e portanto, equilibradas.**

- **No entanto, devido ao fato de que o neutro da carga n e o da fonte N não estão conectados, há uma diferença de potencial entre esses dois pontos, devido ao desequilíbrio da carga trifásica, levando à conclusão de que as *tensões de fase* aplicadas à carga não são iguais às *tensões de fase* fornecidas pela fonte.**

- **Devido à não conexão dos neutros, a *corrente no neutro é nula*.**

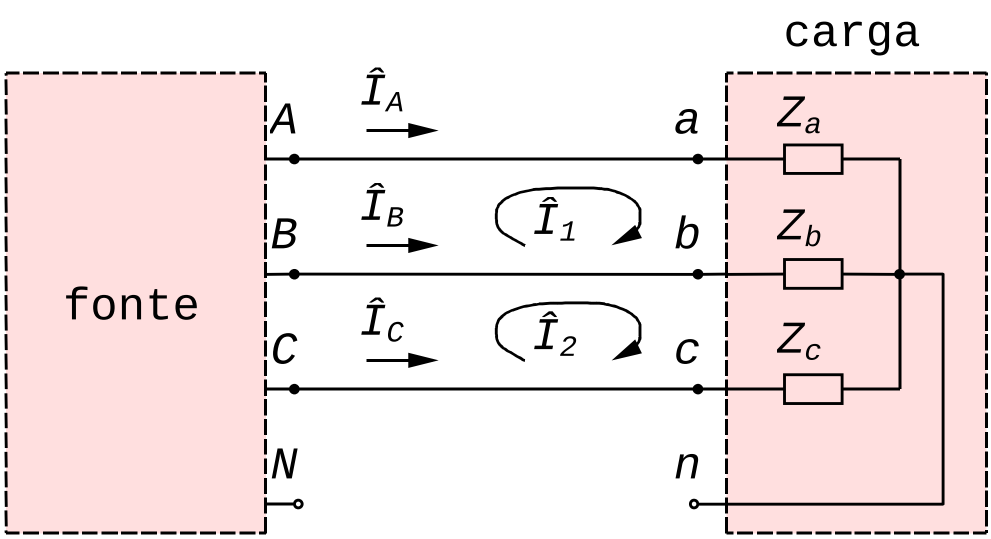
- **Aplicando a lei dos nós de Kirchhoff para o ponto neutro da carga, tem-se:**

$$\hat{I}_A + \hat{I}_B + \hat{I}_C = 0$$

NO MATERIAL DIDÁTICO ESTÃO DESCRITOS DOIS MÉTODOS PARA A SOLUÇÃO DE UM CIRCUITO TRIFÁSICO COM CARGA Y-3FIOS DESEQUILIBRADA:

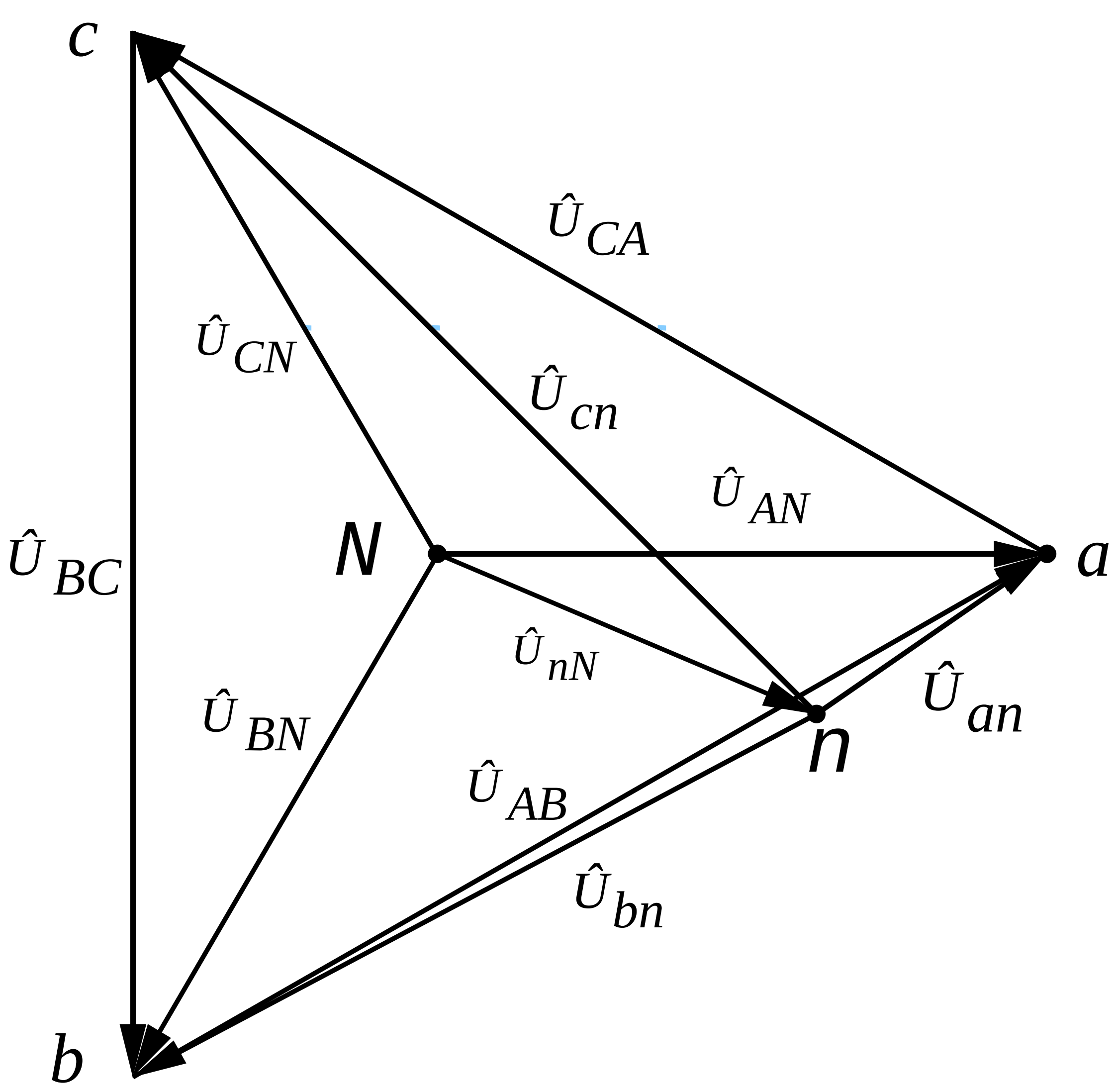
A) Método das equações de malha

Corresponde a determinar um sistema de equações das malhas do circuito e resolvê-lo, de forma a obter os valores das correntes de malha.



B) Método deslocamento de neutro

Devido à carga ser desequilibrada, e não havendo conexão do neutro da fonte com o neutro da carga, há um deslocamento do neutro da carga em relação ao neutro da fonte.



DETALHE:

O método do deslocamento de neutro apresenta uma quantidade menor de cálculos.

O *método do deslocamento de neutro* baseia-se em obter a diferença de potencial entre os pontos neutros e, em seguida, as demais tensões e correntes.

$$\hat{U}_{nN} = \frac{Y_a \cdot \hat{U}_{AN} + Y_b \cdot \hat{U}_{BN} + Y_c \cdot \hat{U}_{CN}}{Y_a + Y_b + Y_c}$$

Y_a **,** Y_b **e** Y_c **- admitâncias da carga**

São calculadas através do inverso das respectivas impedâncias $\left[\frac{1}{Z}\right]$**.**

Tendo-se $\hat{U}_{nN}$**, pode-se então obter as tensões de fase na carga:**

$$\hat{U}_{an} = \hat{U}_{AN} - \hat{U}_{nN}$$

$$\hat{U}_{bn} = \hat{U}_{BN} - \hat{U}_{nN}$$

$$\hat{U}_{cn} = \hat{U}_{CN} - \hat{U}_{nN}$$

e tendo-se as tensões de fase, pode-se calcular as correntes de linha (Lei de Ohm).

É importante destacar que, na realidade, espera-se que nunca ocorra um desligamento (rompimento) do condutor neutro em qualquer instalação elétrica, pois o rompimento do condutor neutro pode resultar em tensões de fase muito altas ou baixas, comprometendo as condições de operação de equipamentos conectados entre uma fase e o neutro, sob pena de serem danificados, dependendo da localização do rompimento.

O rompimento do condutor neutro não afeta as condições de operação de equipamentos que estejam conectados entre fases, como é o caso, p. ex. de um chuveiro conectado entre duas fases, pois se considera que as tensões fornecidas pela companhia distribuidora são equilibradas e independem da carga conectada.

Vídeos:

Tensões Trifásicas
http://www.youtube.com/watch?v=22434JHXYjs

Carga Trifásica em Estrela Desequilibrada
http://www.youtube.com/watch?v=22434JHXYjs