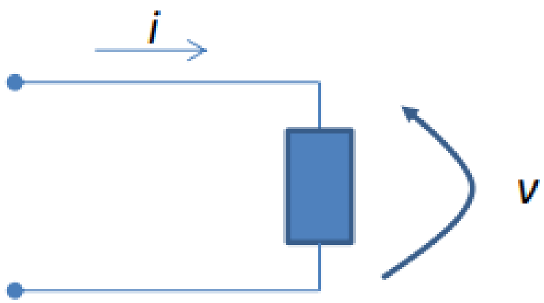
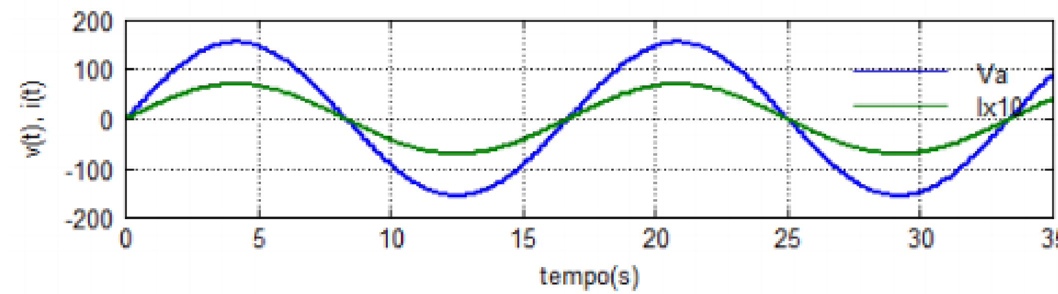
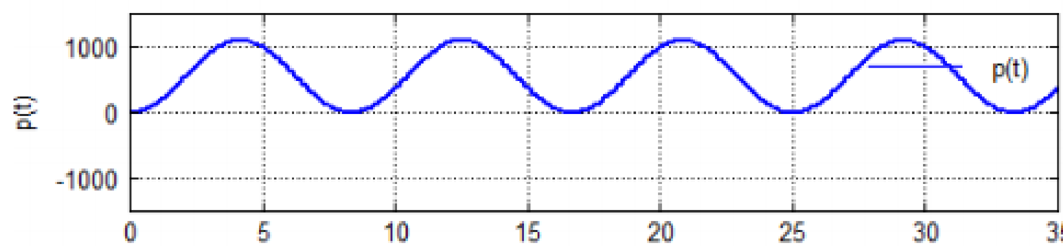
Circuitos Monofásicos
Circuitos Trifásicos

Carga Resistiva

Potência fornecida a **uma carga resistiva**, em corrente alternada senoidal:







v(t) e i(t) estão em fase:

$$v(t) = V_m sen(\omega t)$$
$$i(t) = I_m sen(\omega t)$$

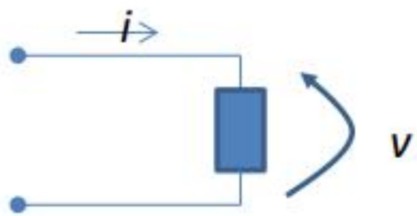
$$p(t) = V_{ef} I_{ef} - V_{ef} I_{ef} cos(2\omega t)$$

$$potência\ média = V_{ef} I_{ef} =$$
potência útil = potência ativa

Toda energia fornecida ao resistor é utilizada para realizar trabalho

Potência ativa: necessária para realizar trabalho (aquecimento, movimento, luz...)

Carga Indutiva Ideal



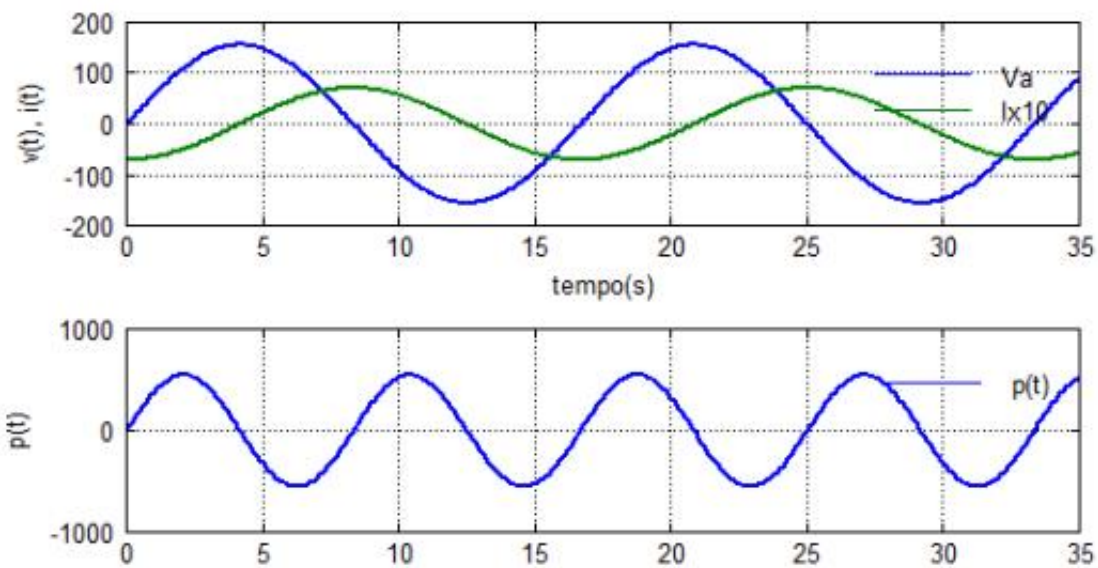
v(t) e i(t) estão defasados de θ = 90º:

$$v(t) = V_m sen(\omega t)$$
$$i(t) = I_m sen(\omega t - 90^o)$$

$$p(t) = V_{ef} I_{ef}\ cos\theta - V_{ef} I_{ef}\ cos\theta \cos(2\omega t) + V_{ef} I_{ef}\ sen\theta\ sen(2\omega t)$$

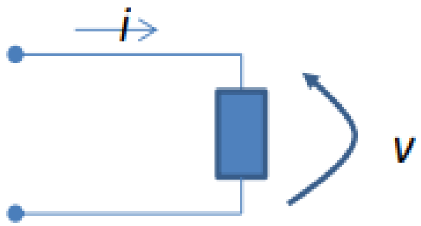
$$p(t,\ \theta = 90^o) = V_{ef} I_{ef}\ sen(2\omega t)$$

$$potência\ média = zero$$
$$= potência\ ativa$$



. Troca de potência entre fonte e carga num ciclo = nula;
. Nenhuma energia é perdida no processo

Carga Capacitiva



v(t) e i(t) estão defasados de 90º:

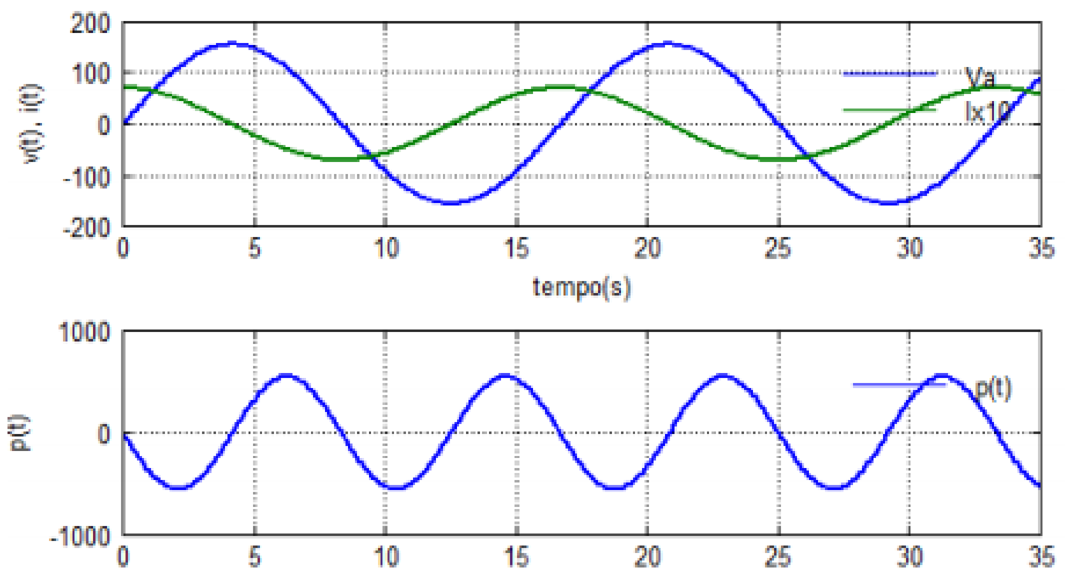
$$v(t) = V_m sen(\omega t)$$
$$i(t) = I_m sen(\omega t + 90^o)$$

$$p(t) = V_{ef} I_{ef}\; cos\theta - V_{ef} I_{ef}\; cos\theta\, \cos(2\omega t) + V_{ef} I_{ef}\; sen\theta\; sen(2\omega t)$$

$$p(t, \theta = -90^o) = -\, V_{ef} I_{ef}\; sen(2\omega t)$$

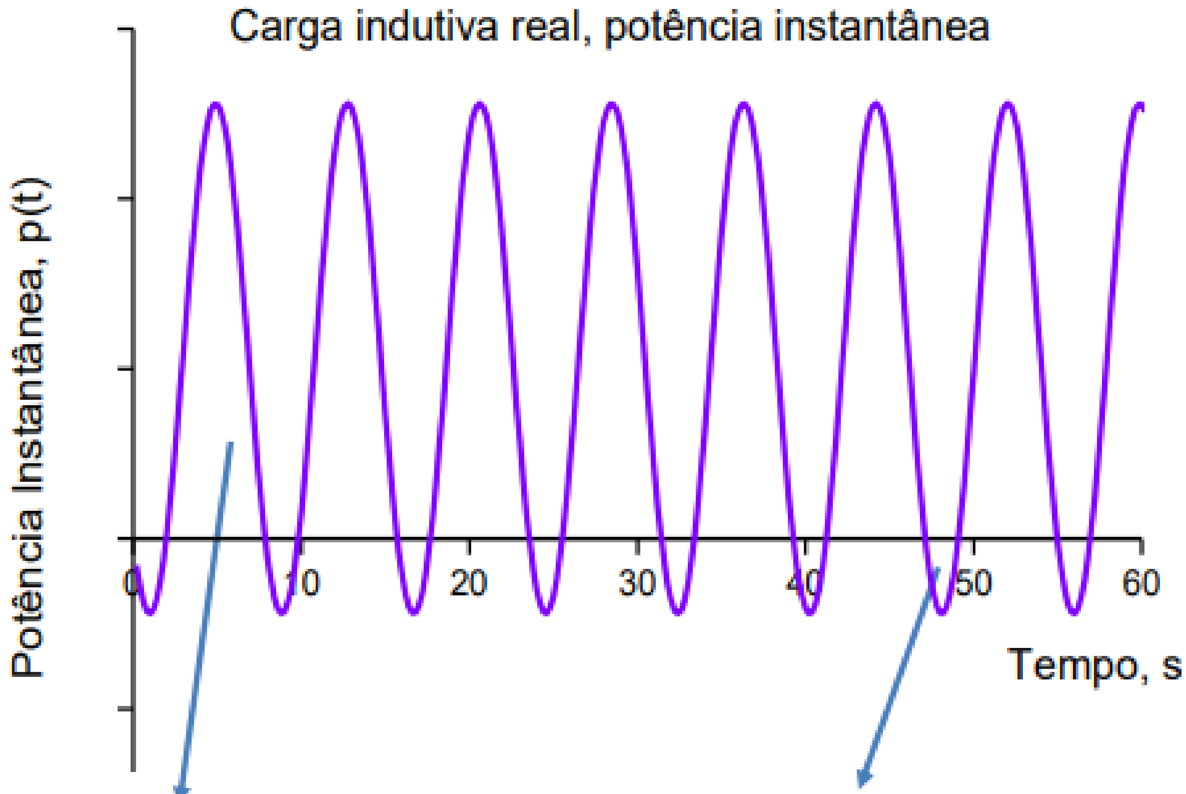
$$potência\ média = zero$$
$$= potência\ ativa$$

. Troca de potência entre fonte e carga num ciclo = nula;
. Nenhuma energia é perdida no processo.



Carga Indutiva Real

exemplos: Lâmpada Fluorescente ou Motor de Indução

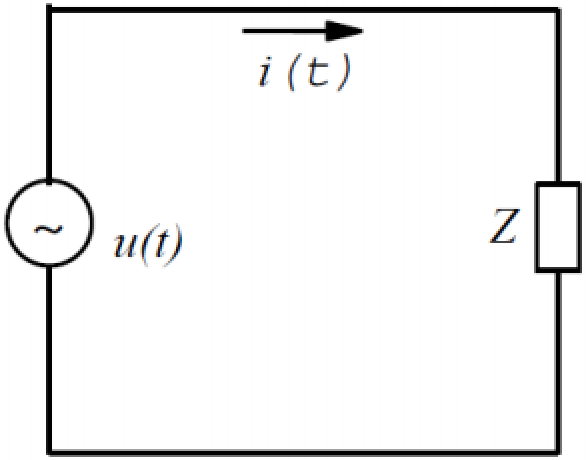


. Parte da energia absorvida pela carga realiza trabalho (calor ou movimento, por exemplo)

. Parte da energia fornecida à carga é devolvida para fonte, não realizando trabalho.

Potência em circuitos de corrente alternada

- Conceitos básicos.



- Nos terminais da fonte tem-se uma tensão senoidal expressa por:

$$u(t) = \sqrt{2} \cdot U_{ef}\, sen(wt)$$

$$\hat{U} = U_{ef} \angle 0^{o} \quad \text{V}$$

- A impedância Z pode ser expressa por:

$$Z = |Z| \angle \phi = R + j\,X \quad \Omega$$

- Nesse caso, a corrente em regime permanente corresponde a:

$$i(t) = \sqrt{2} \cdot I_{ef} \cdot \text{sen}(wt - \phi) = \sqrt{2} \cdot \frac{U_{ef}}{|Z|}.\text{sen}(wt - \phi)$$

$$\hat{I} = \frac{\hat{U}}{Z} = \frac{U_{ef} \angle 0^{o}}{|Z| \angle \phi} = \frac{U_{ef}}{|Z|} \angle -\phi = I_{ef} \angle -\phi \quad \text{A}$$

Potência em circuitos de corrente alternada

- Potência instantânea fornecida pela fonte:

$$p(t) = u(t) \cdot i(t)$$

- Substituindo $u(t)$ e $i(t)$ tem-se:

$$p(t) = 2 \cdot U_{ef} \cdot I_{ef} \cdot \mathrm{sen}(wt) \cdot \mathrm{sen}(wt - \phi)$$

- Através de algumas relações trigonométricas, obtém-se:

$$p(t) = \underbrace{U_{ef} \cdot I_{ef} \cdot \cos(\phi) \cdot [1 - \cos(2wt)]}_{\{A\}} \underbrace{- U_{ef} \cdot I_{ef} \cdot \mathrm{sen}(\phi) \cdot \mathrm{sen}(2wt)}_{\{B\}}$$

Potência em circuitos de corrente alternada

$$p(t) = \underbrace{U_{ef} \cdot I_{ef} \cdot \cos(\phi) \cdot [1 - \cos(2wt)]}_{\{A\}} \underbrace{- U_{ef} \cdot I_{ef} \cdot \mathrm{sen}(\phi) \cdot \mathrm{sen}(2wt)}_{\{B\}}$$

- O Termo {A} tem uma componente constante:

$$U_{ef} \cdot I_{ef} \cdot \cos(\phi)$$

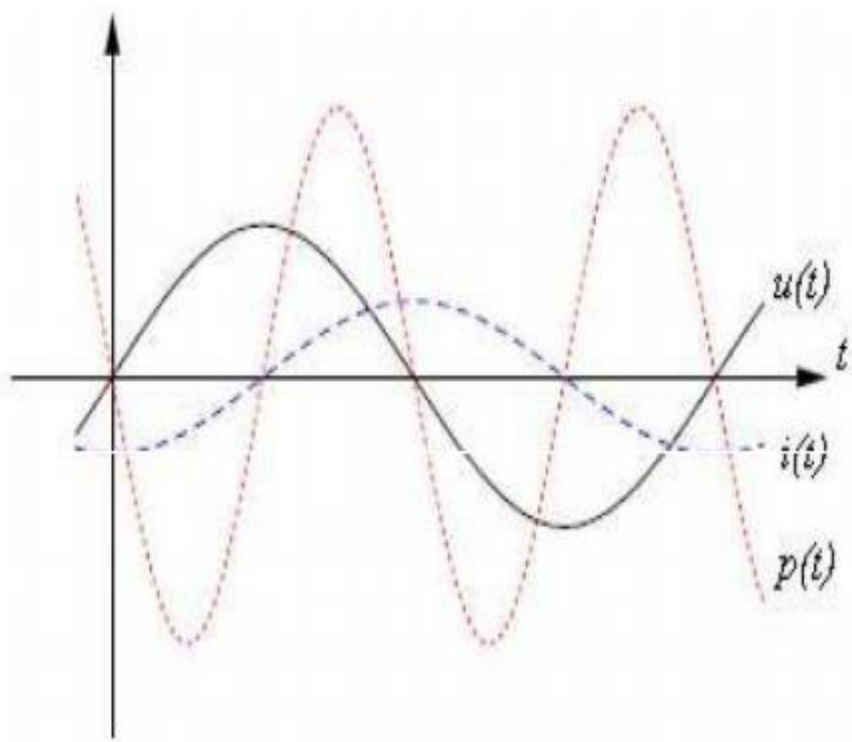
- e uma componente "cossenoidal" cuja frequência é o dobro da frequência da tensão:

$$-U_{ef} \cdot I_{ef} \cdot \cos(\phi) \cdot [\cos(2wt)]$$

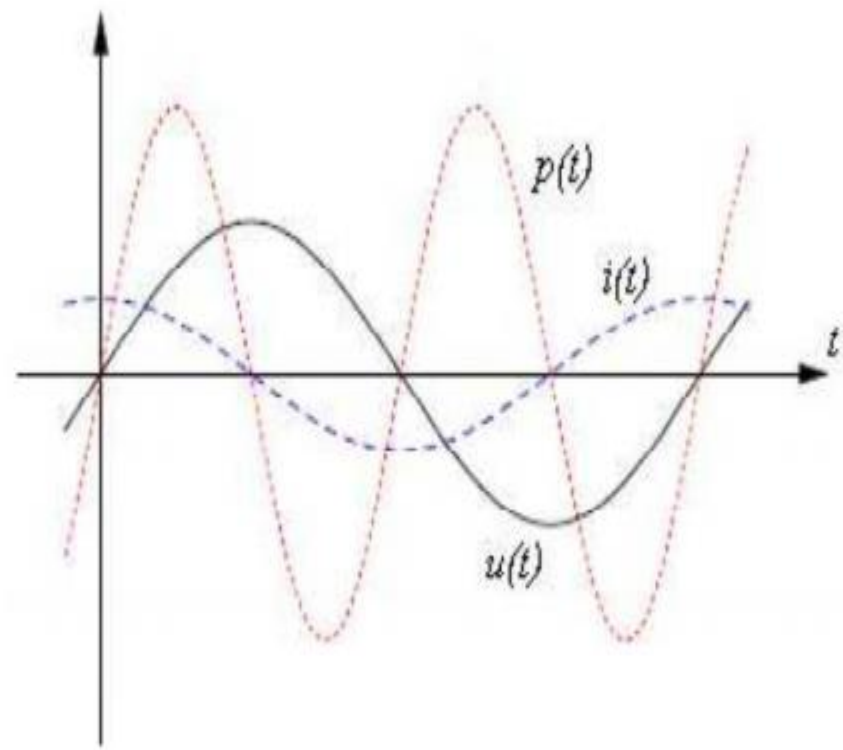
- O Termo {B} é "senoidal" com frequência dupla:

Potência em circuitos de corrente alternada

- Comportamento elétrico do capacitor e do indutor sob o ponto de vista da energia armazenada.



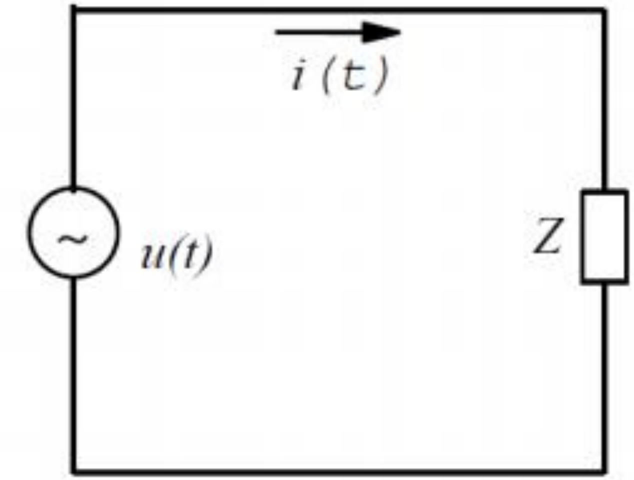
indutor



capacitor

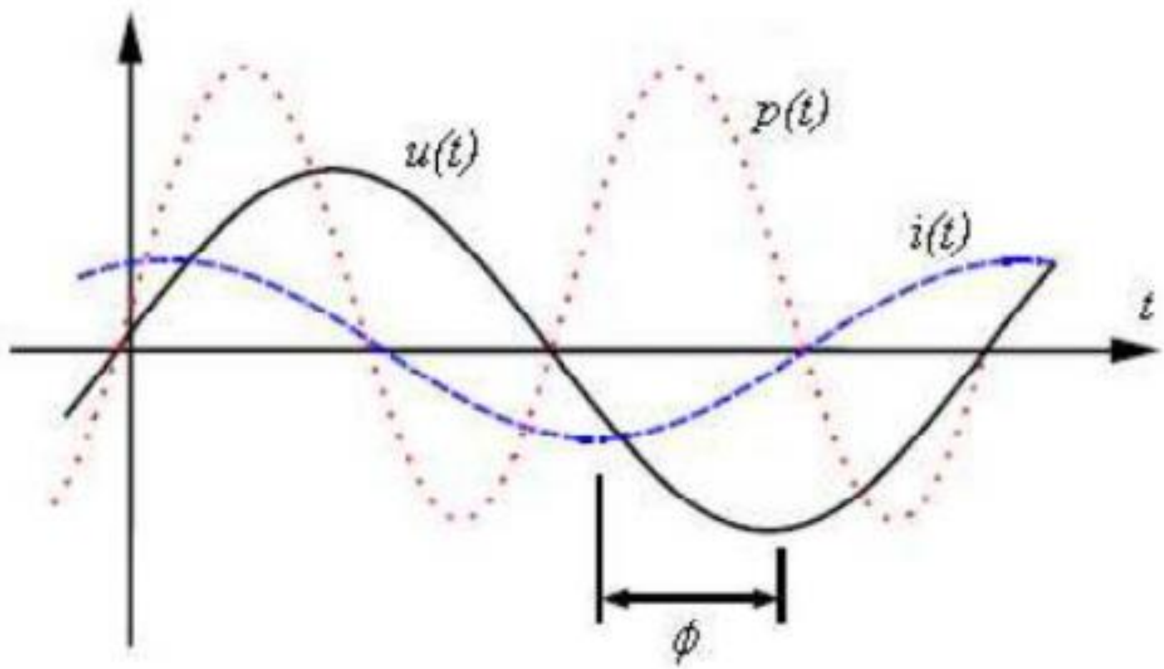
Potência em circuitos de corrente alternada

- Impedância RLC.

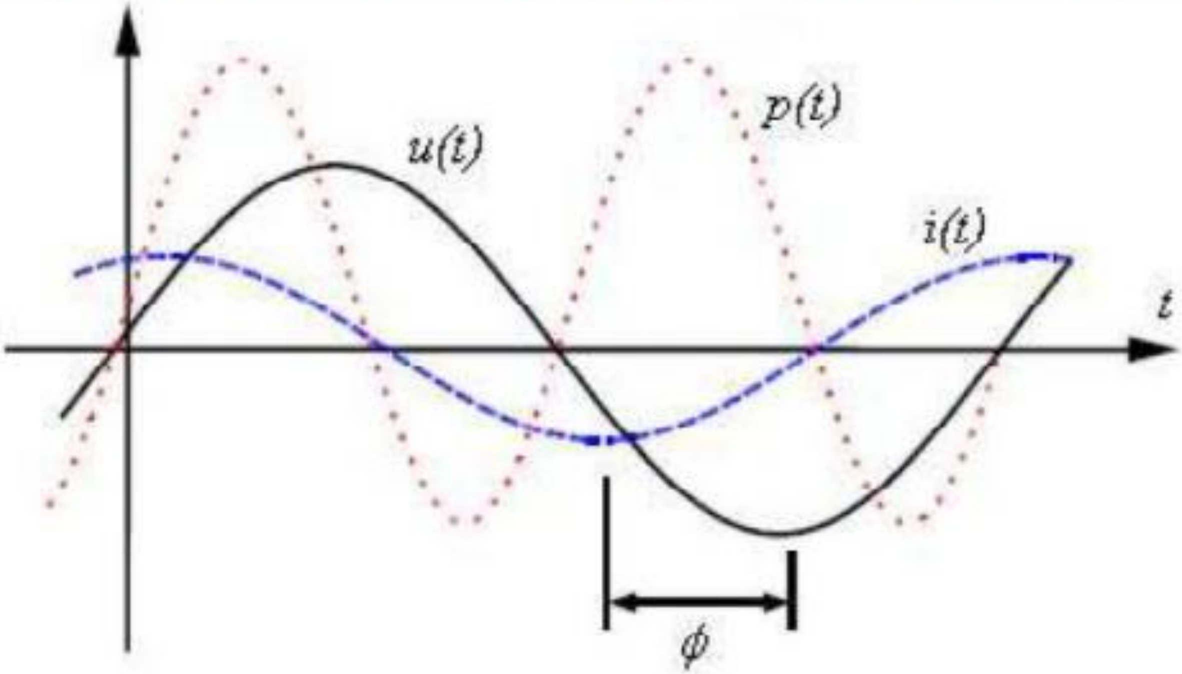


- Se a impedância Z corresponde a um RLC série com as formas de onda indicadas abaixo.

- Carga RLC com comportamento capacitivo.



Potência em circuitos de corrente alternada



A potência assume valores positivos e negativos ao longo do tempo e o valor médio da potência fornecida é dado por:

$$P_m = U_{ef} \cdot I_{ef} \cdot cos(\phi) \quad \text{[W]}$$

- Comparando-se a área sob a parte positiva da curva $p(t)$ com a área contida na parte negativa, conclui-se que a energia fornecida pela fonte é maior do que a energia que lhe é devolvida, indicando que ao longo do tempo há uma energia líquida que é consumida pela carga, devido à existência de bipolos resistivos na composição da carga.

Potência em circuitos de corrente alternada

- Definições:
- Retomando a expressão da potência instantânea:

$$p(t) = \underbrace{U_{ef} \cdot I_{ef} \cdot \cos(\phi) \cdot [1 - \cos(2wt)]}_{\{A\}\ ou\ \ p_A(t)} \underbrace{- U_{ef} \cdot I_{ef} \cdot \mathrm{sen}(\phi) \cdot \mathrm{sen}(2wt)}_{\{B\}\ ou\ \ p_R(t)}$$

- O termo {A}, representado por $p_A(t)$, é denominado **potência ativa instantânea.**
- O termo {B}, representado por $p_R(t)$, é denominado **potência reativa instantânea.**
- Valores médios de $p_A(t)$ e $p_R(t)$:

$$P_{Am} = U_{ef} \cdot I_{ef} \cdot \cos(\phi) = P_m$$

$$P_{Rm} = 0$$

Potência em circuitos de corrente alternada

- Simplificando, define-se:

$$P = P_{Am} = U_{ef} \cdot I_{ef} \cdot \cos(\phi) = P_m$$

- como a potência ativa, que corresponde ao valor médio de $p_A(t)$ e de $p(t)$.

- Define-se

$$Q = U_{ef} \cdot I_{ef} \cdot \mathrm{sen}(\phi)$$

como a potência reativa, que corresponde ao valor de pico de $p_R(t)$.

Potência em circuitos de corrente alternada

- Retomando os fasores associados à tensão e à corrente:

$$\hat{U} = U_{ef} \angle 0^o \qquad \hat{I} = I_{ef} \angle -\phi$$

- define-se o número complexo S (potência complexa) como:

$$S = \hat{U} \cdot \hat{I}^*$$

$$S = U_{ef} \angle 0^o \cdot \left(I_{ef} \angle -\phi\right)^*$$

$$S = U_{ef} \cdot I_{ef} \cdot \cos\phi + jU_{ef} \cdot I_{ef} \cdot \operatorname{sen}\phi$$

- Retomando as expressões definidas para a P e para a Q:

$$P = U_{ef} \cdot I_{ef} \cdot \cos(\phi) \qquad Q = U_{ef} \cdot I_{ef} \cdot \operatorname{sen}(\phi)$$

- a expressão para a potência complexa resulta:

$$S = P + jQ$$

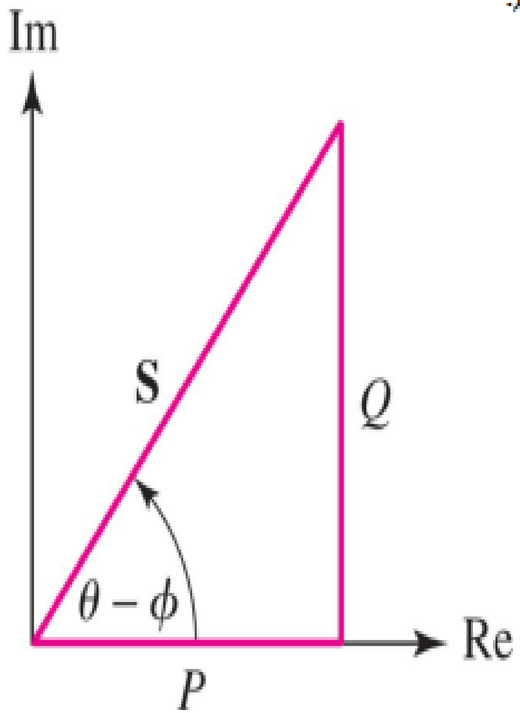
$$S = |S| \angle \phi \qquad |S| = U_{ef} \cdot I_{ef} = \sqrt{P^2 + Q^2} \qquad tg\phi = \frac{Q}{P}$$

- $|S|$ é denominado potência aparente.

Potência Complexa

- Define-se a potência complexa **S** como:

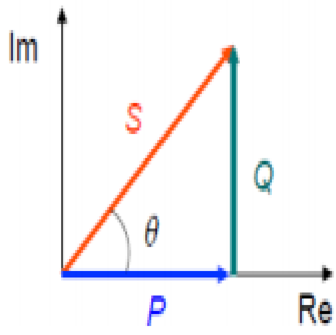
$$\mathbf{S} = \mathbf{V}_{eff}\mathbf{I}_{eff}^{*} = V_{eff} I_{eff} e^{j(\theta-\phi)} = P + jQ$$



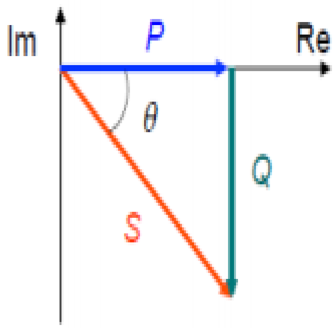
- A parte real de **S** é P, potência média.
- A parte imaginária de **S** é Q, potência reativa.

Potência Complexa em termos de um diagrama:

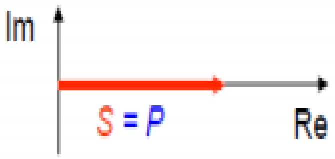
- Carga Indutiva (FP atrasado) $0 < \theta \leq 90°$, $Q > 0$:



- Carga Capacitiva (FP adiantado) $-90° < \theta \leq 0°$, $Q < 0$



- Carga com FP =1 requer Q=0, pois $\theta = 0°$:



$$\boxed{\theta = \tan^{-1}\left(\frac{Q}{P}\right)}$$

Conceito de Potência Aparente, Potência Ativa e Potência Reativa

POTÊNCIA ATIVA (P):
. Potência que é paga para a concessionária
. Usada para realizar trabalho (geração de luz, calor, rotação de um motor, etc...)
. **Unidade física: W**
. É o valor médio de p(t); (p(t) = potência instantânea, oscila com o dobro da frequência da rede)

POTÊNCIA REATIVA (Q):
. Potência que é usada para gerar e manter os campos eletromagnéticos (fundamentais na aplicação de motores, geradores, transformadores)
. Não realiza trabalho útil
. **Unidade física: VAr**

POTÊNCIA APARENTE (Pap):
. Potência que é solicitada da concessionária;
. **Unidade física: VA**;
. É a soma vetorial de P e Q. Seu módulo é calculado por $V_{ef}.I_{ef}$

Potência em circuitos de corrente alternada

- A potência aparente é a grandeza utilizada no dimensionamento de instalações elétricas industriais e de equipamentos em geral (transformadores, motores, etc.).

- A potência ativa é associada à energia que, ou nos circuitos ou nos equipamentos, é convertida em outras formas: mecânica, térmica, acústica, etc.

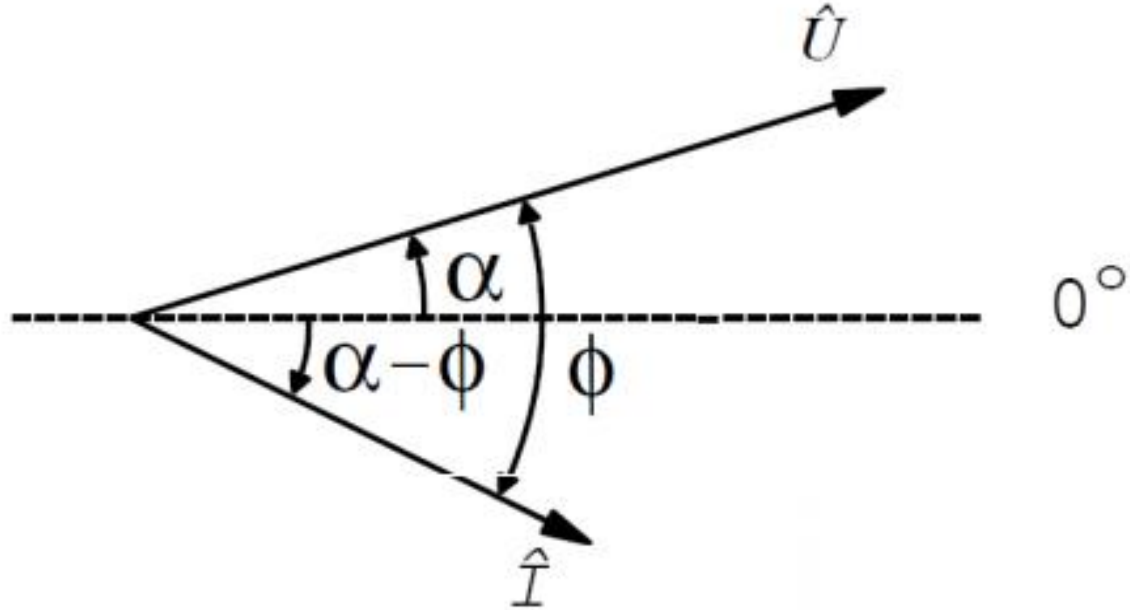
- A potência reativa é associada à energia necessária para formar os campos elétricos e/ou magnéticos necessários em determinados equipamentos, como por exemplo, nos motores.

Potência em circuitos de corrente alternada

- Unidades:
- Potência complexa (S)
- Potência **Aparente** (|S|)
  - Volt-Ampère (VA)
  - kilo-volt-ampère (kVA)
  - Mega-volt-ampère (MVA)
- Potência **Reativa** (Q)
  - Volt-Ampère reativo (VAr)
  - kilo-volt-ampère reativo (kVAr)
  - Mega-volt-ampère reativo (MVAr)
- Potência **Ativa** (P):
  - Watt (W)
  - kilo-Watt (kW)
  - Mega-Watt (MW)

Fator de potência

$$\hat{U} = U_{ef} \angle \alpha \qquad \hat{I} = I_{ef} \angle (\alpha - \phi)$$



- Potência complexa:

$$S = \hat{U} \cdot \hat{I}^* = U_{ef} \cdot I_{ef} \angle \phi$$

- Potência ativa:

$$P = |S| \cdot \cos(\phi) = U_{ef} \cdot I_{ef} \cdot \cos(\phi)$$

Fator de potência

- Potência complexa:

$$S = \hat{U} \cdot \hat{I}^* = U_{ef} \cdot I_{ef} \angle \phi$$

- Potência ativa:

$$P = |S| \cdot \cos(\phi) = U_{ef} \cdot I_{ef} \cdot \cos(\phi)$$

- O cos(ϕ) pode ser interpretado como um fator que define a parcela da potência aparente que é dissipada nos elementos resistivos do circuito. Este fator é denominado de fator de potência.

- Da definição de potência ativa, tem-se:

$$fp = cos(\phi) = \frac{P}{|S|} = \frac{P}{U_{ef} \cdot I_{ef}}$$

O fator de potência é o cosseno do ângulo de defasagem entre a tensão e a corrente do circuito.

Fator de potência - Convenção

Para tornar explícita a diferença entre as características das cargas, diz-se que:

1. para uma carga **indutiva**, o fator de potência é **indutivo** ou **atrasado**, indicando que a **corrente** está **atrasada** em relação à **tensão**.

2. Para a carga **capacitiva**, o fator de potência é **capacitivo** ou **adiantado**, indicando que a **corrente** está **adiantada** em relação à **tensão**.

Potência em circuitos de corrente alternada

- A Potência Ativa (W) representa a porção líquida do copo, ou seja, a parte que realmente será utilizada para matar a sede.
- Como na vida nem tudo é perfeito, junto vem uma parte de espuma, representada pela Potência Reativa (VAr).
- Essa espuma está ocupando lugar no copo, porém não é utilizada para matar a sede.
- O conteúdo total do copo representa a Potência Aparente (VA).
- A analogia da cerveja pode ser utilizada para tirarmos algumas conclusões iniciais:
    - Quanto menos espuma tiver no copo, haverá mais cerveja.
    - Da mesma maneira, quanto menos Potência Reativa for consumida, maior será o Fator de Potência.
    - Se um sistema não consome Potência Reativa, possui um Fator de Potência unitário, ou seja, toda a potência drenada da fonte (rede elétrica) é convertida em trabalho.

Resumo das Grandezas Associadas à Potência Complexa

Grandeza	Símbolo	Fórmula	Unidades
Potência Média	P	$V_{ef}I_{ef}cos(\theta - \phi)$	Watt (W)
Potência Reativa	Q	$V_{ef}I_{ef}sen(\theta - \phi)$	Volt-ampèrerreativo (VAR)
Potência Complexa	**S** $(\vec{S})$	$P + jQ$ $V_{ef}I_{ef}\underline{\angle(\theta\text{-}\phi)}$ $\overrightarrow{V_{ef}}.\overrightarrow{I_{ef}^{*}}$	Volt-ampère (VA)
Potência Aparente	|S|	$V_{ef}I_{ef}$	Volt-ampère (VA)

Potência em circuitos de corrente alternada

- Exemplo: Um circuito RL série é composto por um resistor de 10 Ω e um indutor de 1 / 37,7 H e está conectado a uma fonte de tensão alternada, 60 Hz:

$$u(t) = 100 \cdot \sqrt{2}\,\mathrm{sen}(wt)$$

Obter:

a) a corrente $i(t)$ fornecida pela fonte;

b) a potência $p(t)$ na carga;

c) as potências complexa, ativa e reativa;

d) o triângulo de potências.

Potência em circuitos de corrente alternada

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

$$Z = 10 + j377 \cdot \frac{1}{37{,}7} = 10 + j10 = 10\sqrt{2}\angle 45^\circ \quad \Omega$$

$$\hat{I} = \frac{\hat{U}}{Z} = \frac{100\angle 0^o}{10\sqrt{2}\angle 45^\circ} = 5\sqrt{2}\angle -45^\circ \text{ A}$$

$$i(t) = \sqrt{2} \cdot 5 \cdot \sqrt{2} \cdot \text{sen}(wt - 45^\circ) = 10 \cdot \text{sen}(wt - 45^\circ) \text{ A}$$

- Note que o ângulo de 45º da impedância total da carga, também é o ângulo da defasagem entre a corrente e a tensão na fonte.

$$P = U_{ef} \cdot I_{ef} \cdot \cos(\phi) = 100 \cdot 5\sqrt{2} \cdot \cos 45^\circ = 500 \text{ W}$$

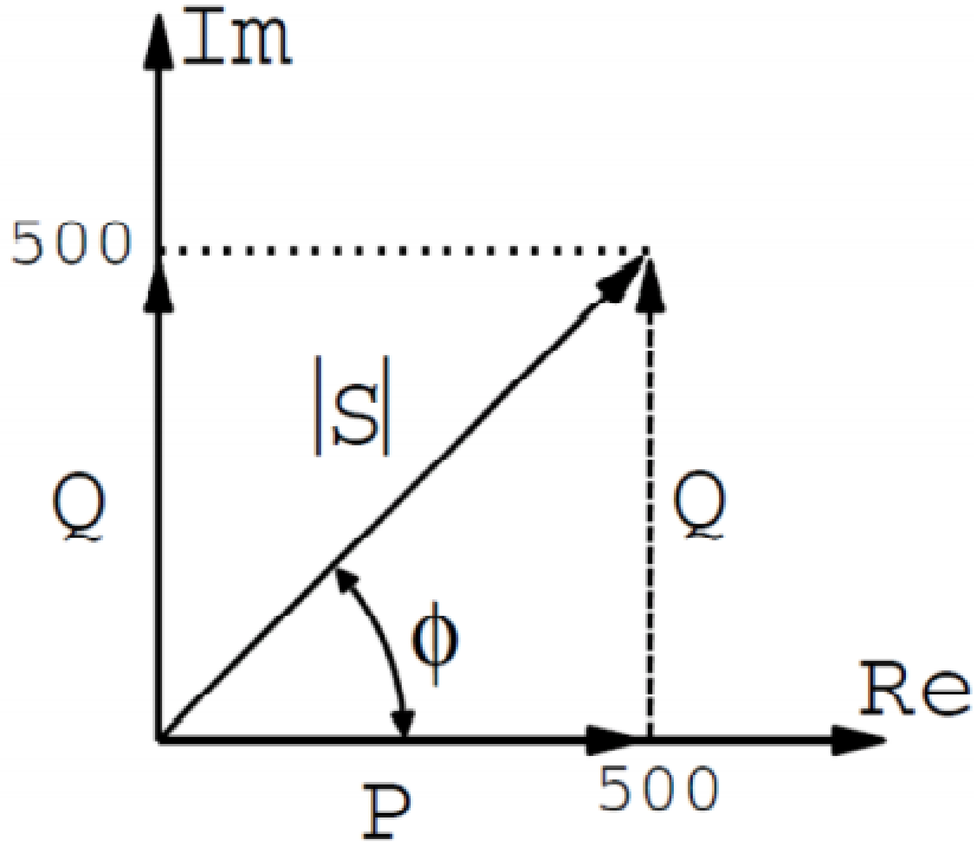
$$Q = 100 \cdot 5\sqrt{2} \cdot \text{sen } 45^\circ = 500 \text{ VAr}$$

$$p(t) = 500 \cdot [1 - \cos(2wt)] - 500 \cdot \text{sen}(2wt) \text{ W}$$

Potência em circuitos de corrente alternada

$$S = \hat{U} \cdot \hat{I}^* = 500\sqrt{2}\angle 45^\circ \text{ VA}$$

$$|S| = U_{ef} \cdot I_{ef} = \sqrt{P^2 + Q^2} = 500\sqrt{2} \text{ VA} \qquad tg\,\phi = \frac{Q}{P} = 1 \rightarrow \phi = 45^\circ$$



Potência Aparente e Fator de Potência

- Potência aparente: $$\boxed{S = V_{\text{rms}} I_{\text{rms}}}$$

  – É o produto dos valores eficazes de corrente e tensão com "dimensão" VA = Volt Ampére

- Fator de Potência: $\cos(\theta_v - \theta_i)$

$$\boxed{\text{pf} = \frac{P}{S} = \cos(\theta_v - \theta_i)}$$

O *power factor* (pf) é adimensional.

O FP é igual ao ângulo de impedância ou da carga:

$$\mathbf{Z} = \frac{\mathbf{V}}{\mathbf{I}} = \frac{V_m \angle \theta_v}{I_m \angle \theta_i} = \frac{V_m}{I_m} \angle \theta_v - \theta_i$$

Reforçando

- O fator de potência é o cosseno da diferença angular entre tensão e corrente ou também o cosseno do ângulo da impedância da carga.
- Para cargas/circuitos puramente resistivos

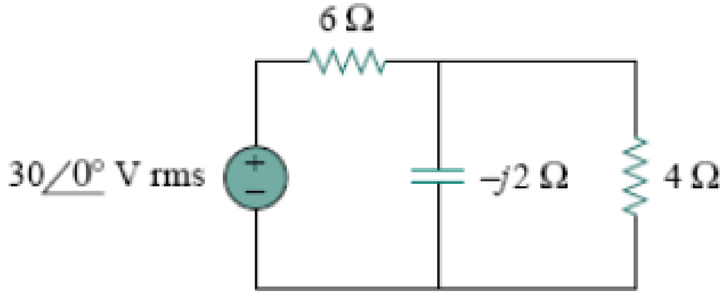
$\theta_v - \theta_i = 0$ e o fator de potência é unitário; Obs.: se o circuito estiver em ressonância o FP também é unitário;

- Para cargas/circuitos que só contém reatâncias

$\theta_v - \theta_i = \pm 90^\circ$ e o fator de potência é nulo;

Exemplo

- Determine o FP do circuito e a potência fornecida pela fonte:



$$\mathbf{Z} = 6 + 4 \parallel (-j2) = 6 + \frac{-j2 \times 4}{4 - j2} = 6.8 - j1.6 = 7\angle -13.24\ \Omega$$

- Cuidado: Note que o ângulo da impedância é negativo, assim o FP está adiantado

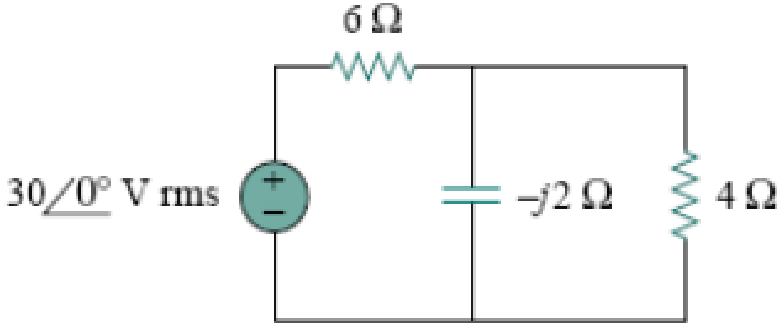
$$\text{pf} = \cos(-13.24) = 0.9734 \qquad \text{(leading)}$$

- Na dúvida, confirme calculando a corrente

$$\mathbf{I}_{rms} = \frac{\mathbf{V}_{rms}}{\mathbf{Z}} = \frac{30\angle 0^\circ}{7\angle -13.24^\circ} = 4.286\angle 13.24^\circ\ \text{A}$$

Exemplo

- Determine o FP do circuito e a potência ativa fornecida pela fonte:



- Potência ativa fornecida pela fonte:

$$P = V_{\text{rms}} I_{\text{rms}}\, \text{pf} = (30)(4.286)0.9734 = 125 \text{ W}$$

Ou:

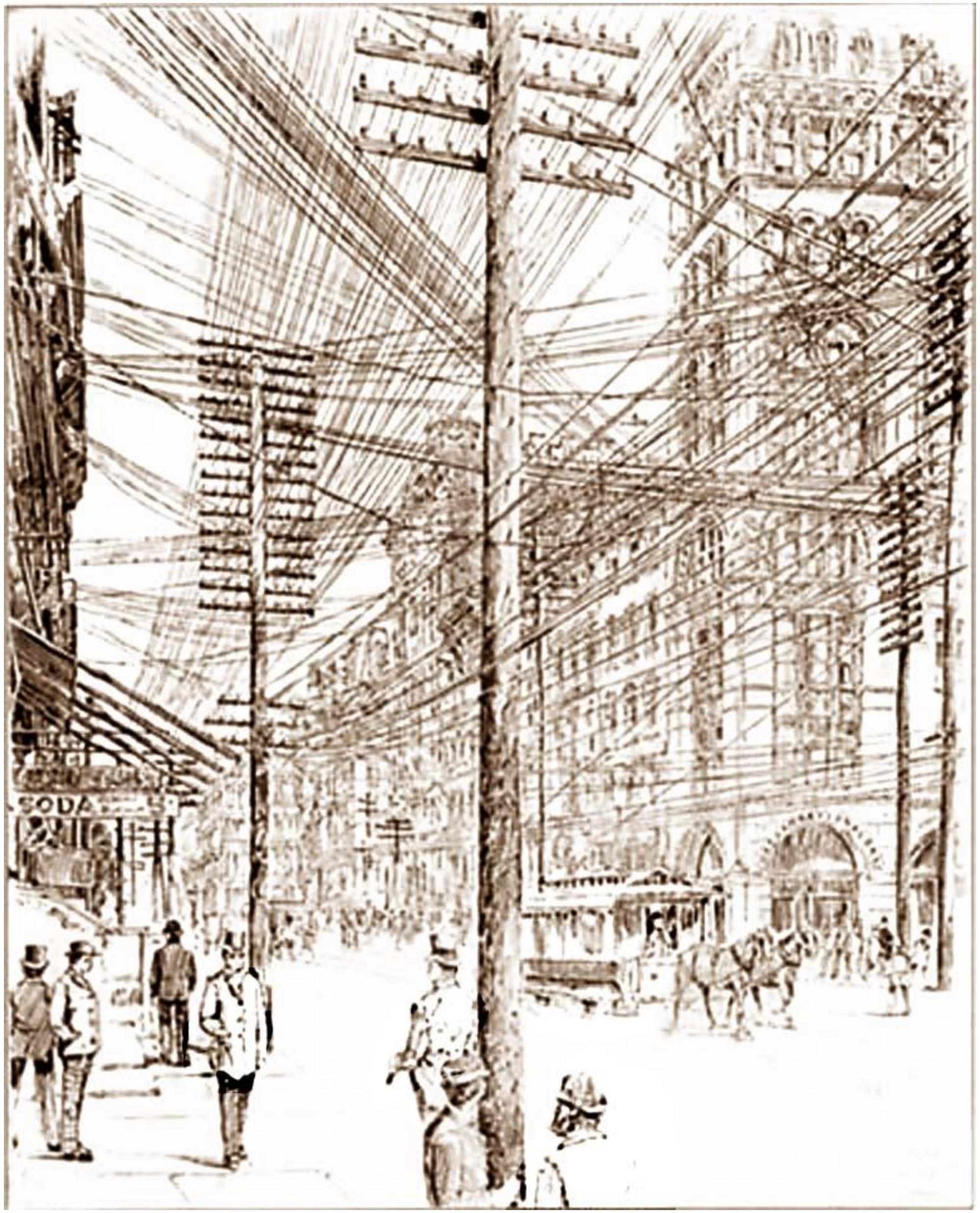
$$P = I_{\text{rms}}^2 R = (4.286)^2(6.8) = 125 \text{ W}$$

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.

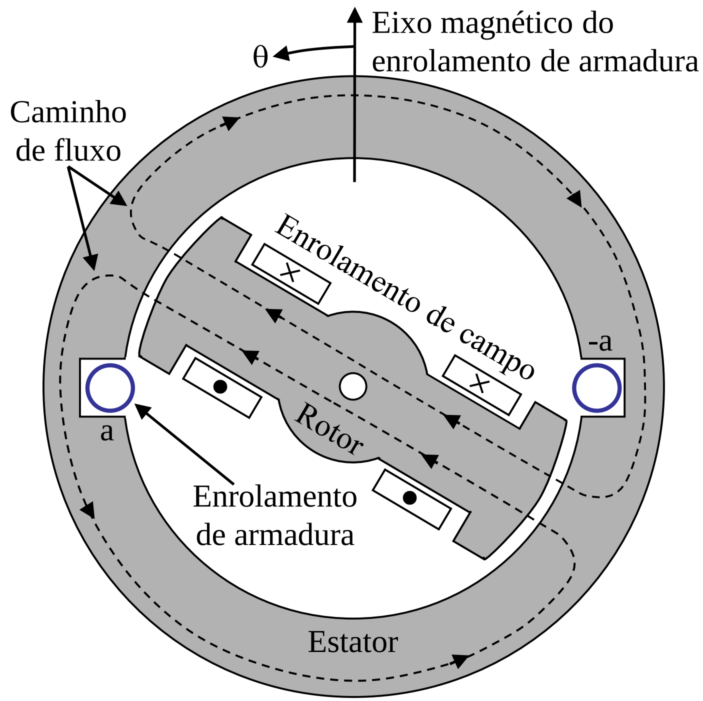


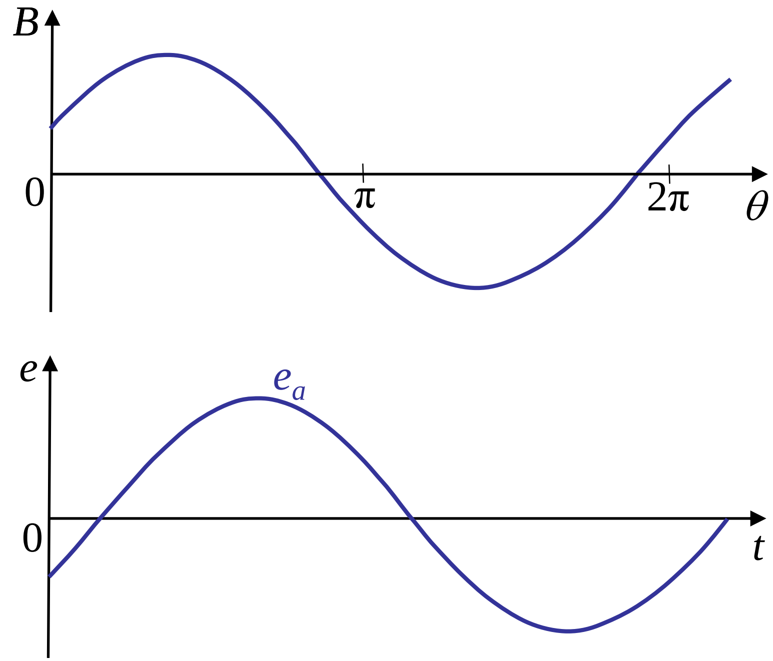
http://en.wikipedia.org/wiki/Electric_power_transmission

Introdução (3/3)

- 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 continua 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;

Geração em corrente alternada (Monofásico)



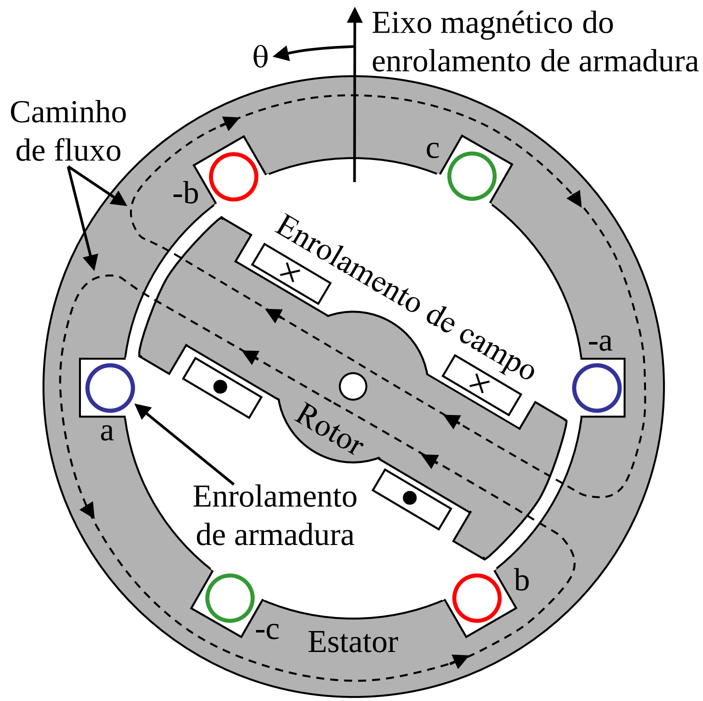


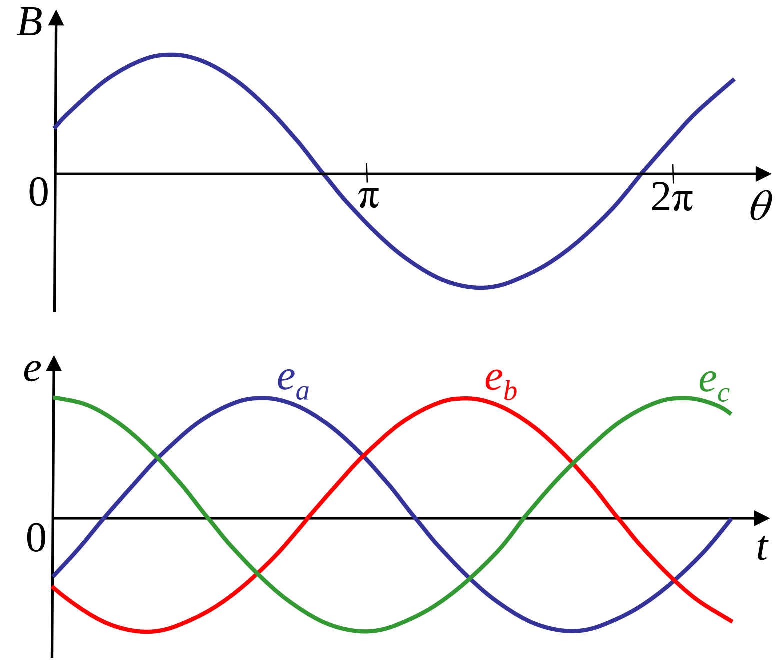
- Se o enrolamento de campo é excitado por uma corrente continua e o rotor gira a uma velocidade constante, então a tensão induzida (*e*) será proporcional à magnitude da densidade de fluxo (*B*).
- Desvantagem: um espaço significante não é utilizado no estator e a existência de uma potência pulsante.
- Sugestão: usar sistemas polifásicos.

Geração em corrente alternada

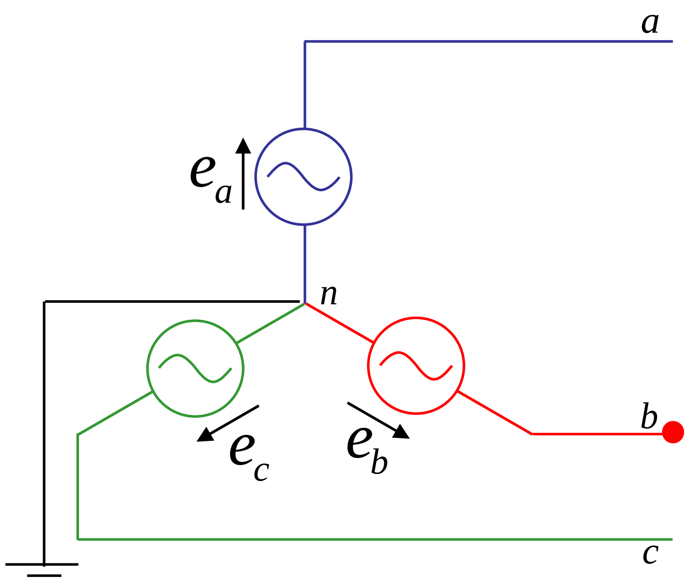
- Porque usar um sistema trifásico?
  - Um gerador trifásico aproveita melhor o espaço físico, resultando em um gerador de tamanho reduzido e mais barato, comparado com os geradores monofásicos de igual potência.
  - Um sistema monofásico precisa de dois condutores; e um sistema trifásico (perfeitamente 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.

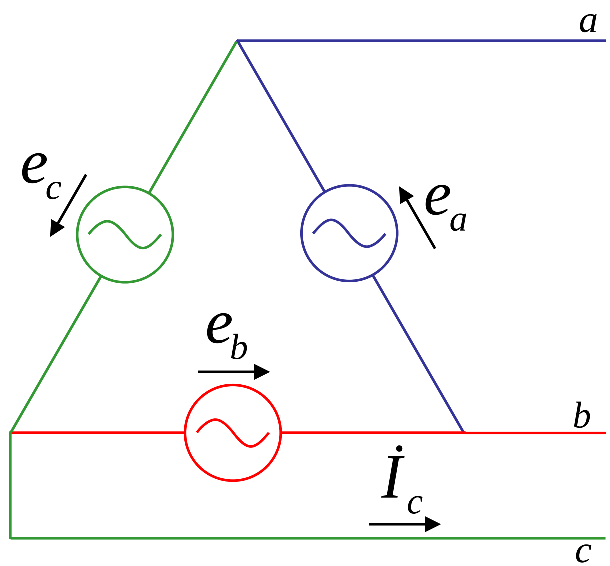
Geração em corrente alternada (Trifásico)





- 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.





- 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

Geração em corrente alternada

- Sistemas de tensões trifásicas

Representação temporal

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

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

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

Representação fasorial

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

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

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

- 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 freqüência 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

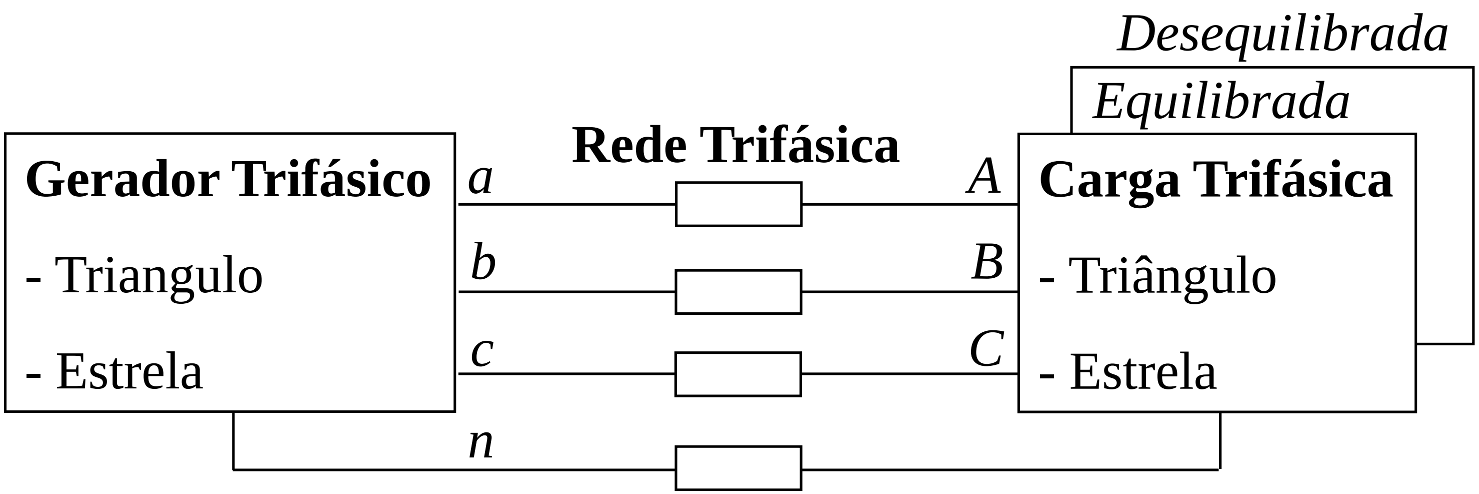
- <u>Linha (ou rede) trifásica desequilibrada</u>: Linha (ou rede) trifásica em que não se verifica alguma das condições de equilíbrio ;

- <u>Carga trifásica equilibrada</u>: Carga trifásica constituída por três impedâncias iguais ligadas em estrela (Y) ou triângulo (Δ). ;

- <u>Carga trifásica desequilibrada</u>: 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)



Quando a carga e o gerador estão conectados em estrela.

- 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).

Definições

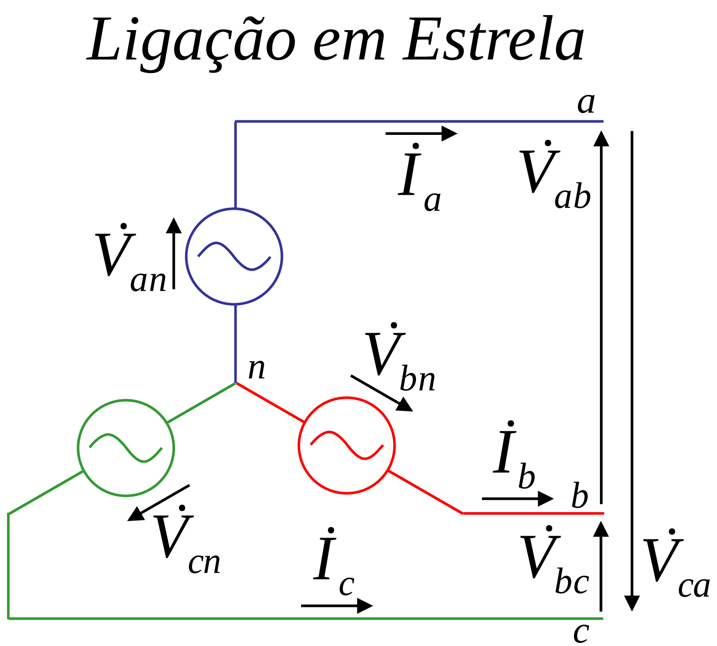
1. Tensão de fase: medida entre qualquer terminal do gerador ou carga e o centro-estrela;

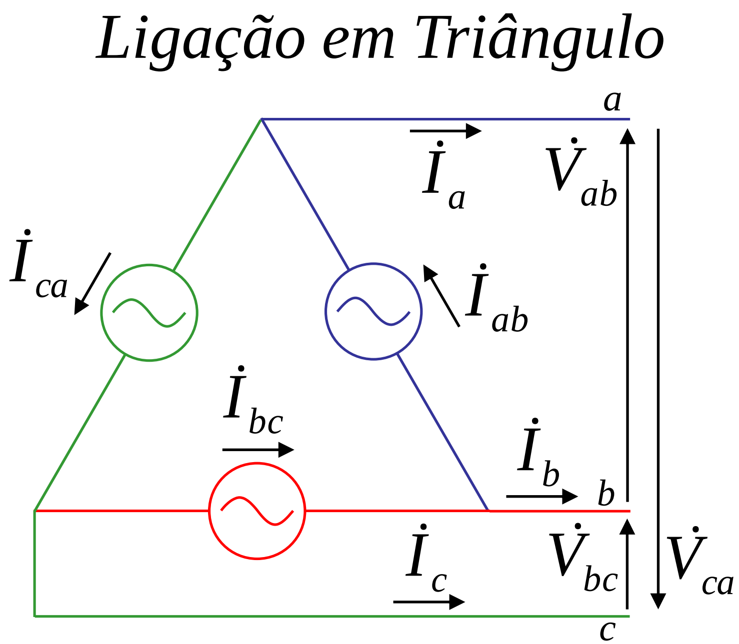
2. Tensão de linha: medida entre quaisquer dois terminais do gerador ou da carga, nenhum deles sendo o centro-estrela;

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





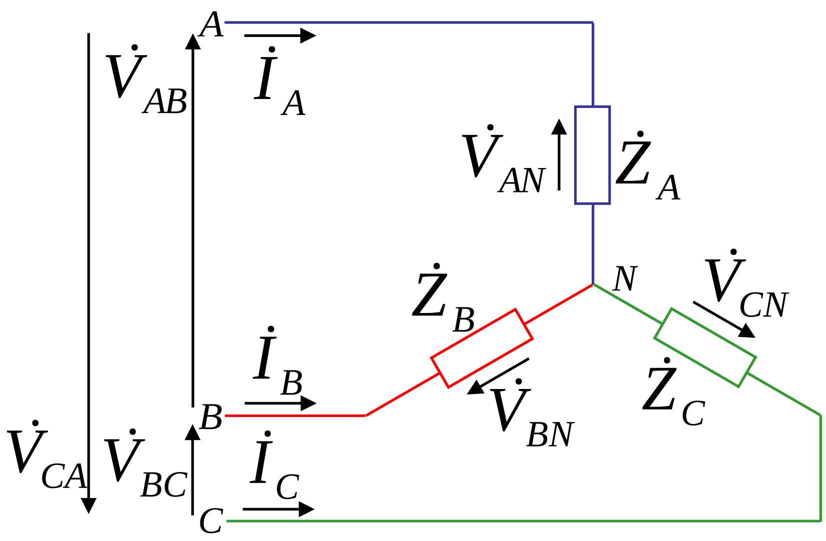
- *n* é o neutro (centro-estrela) do gerador.
- Para um sistema trifásico simétrico:

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

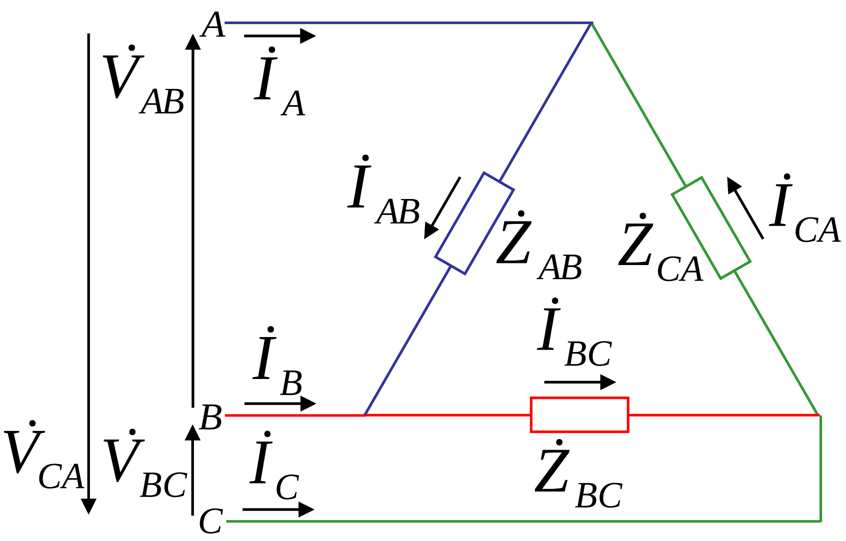
$$\dot{V}_a + \dot{V}_b + \dot{V}_c = 0$$

Ligações triângulo e estrela - Carga

Ligação em Estrela



Ligação em Triângulo



- *n* é o neutro (centro-estrela) da carga.
- Para uma carga trifásica equilibrada:

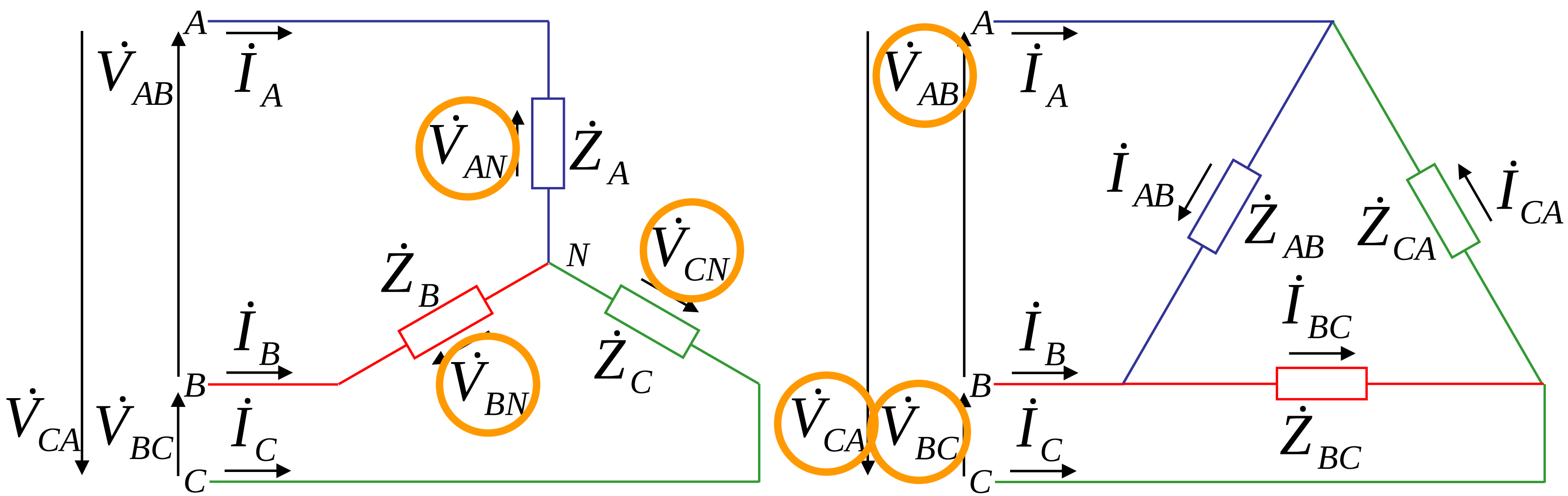
$$\dot{Z}_A = \dot{Z}_B = \dot{Z}_C$$

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

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.

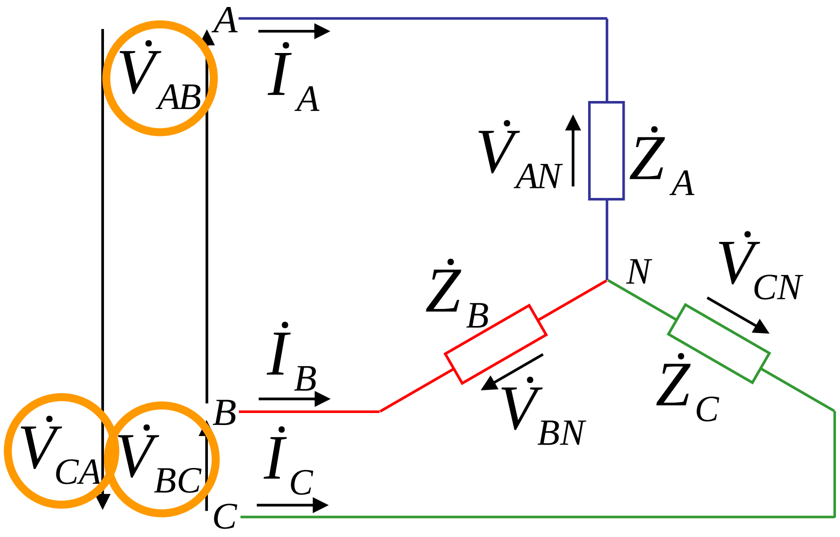
Ligação em Estrela *Ligação em Triângulo*

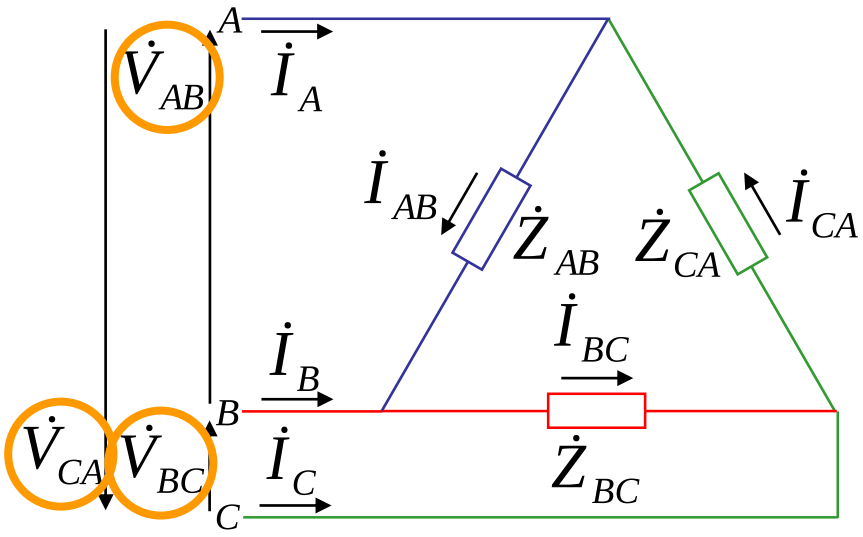


Relações entre os valores de fase e linha

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

Ligação em Estrela *Ligação em Triângulo*

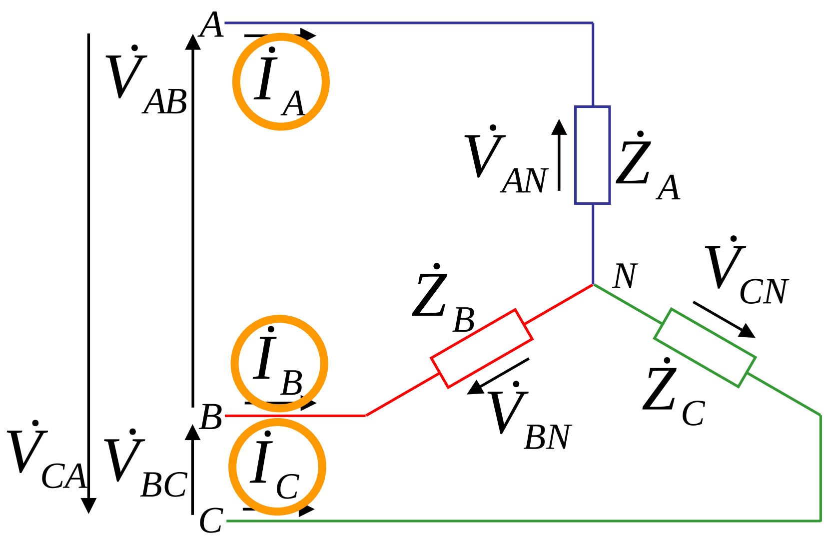




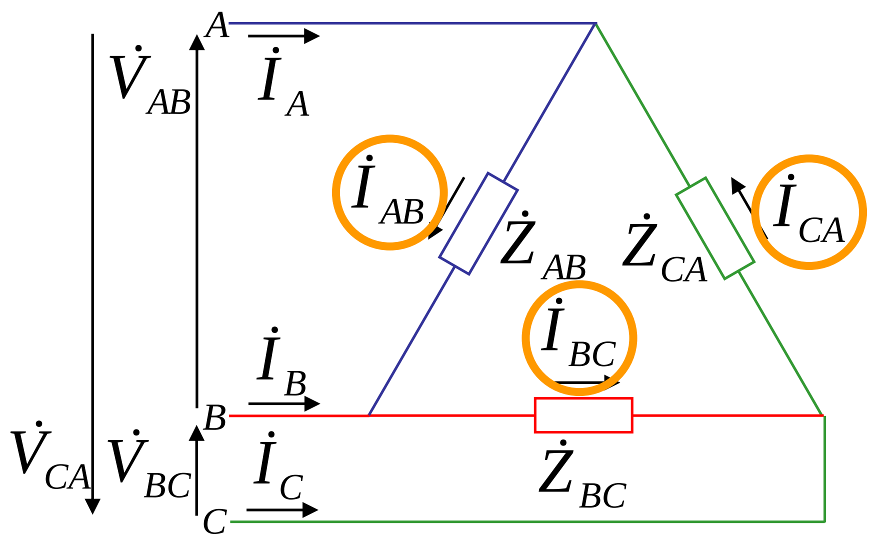
Relações entre os valores de fase e linha

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

Ligação em Estrela



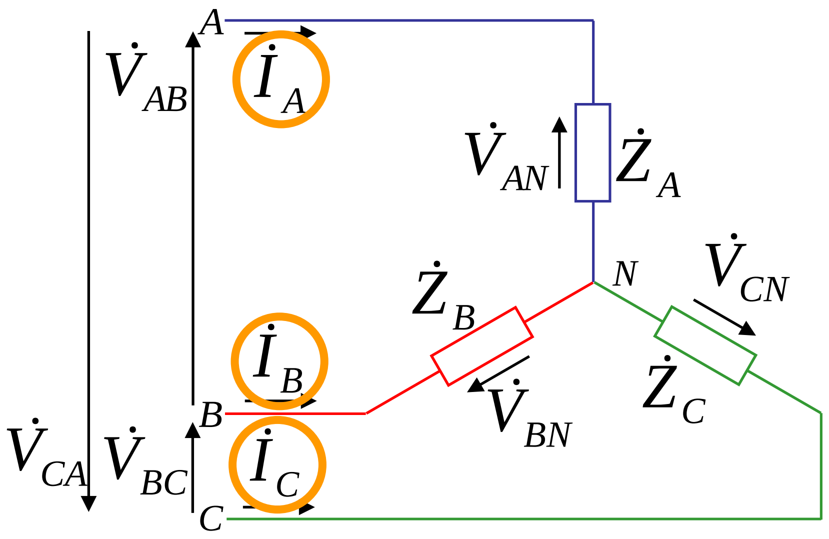
Ligação em Triângulo



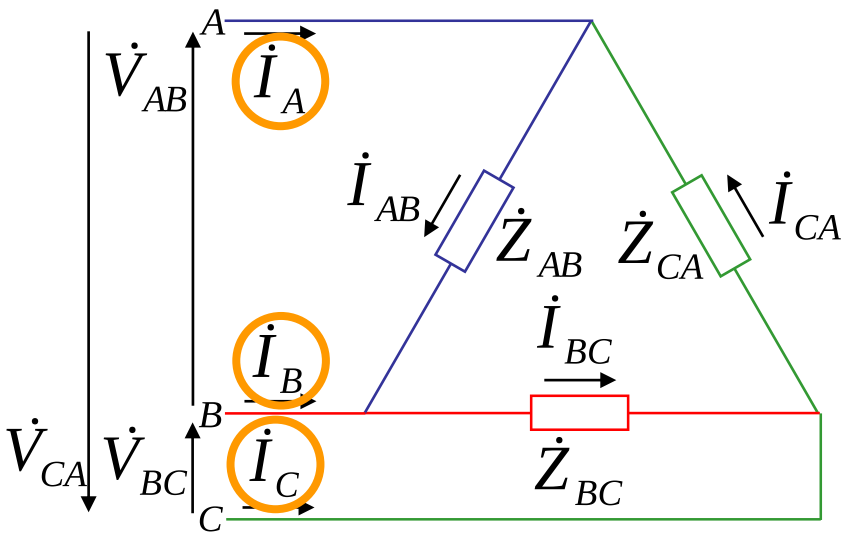
Relações entre os valores de fase e linha

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

Ligação em Estrela



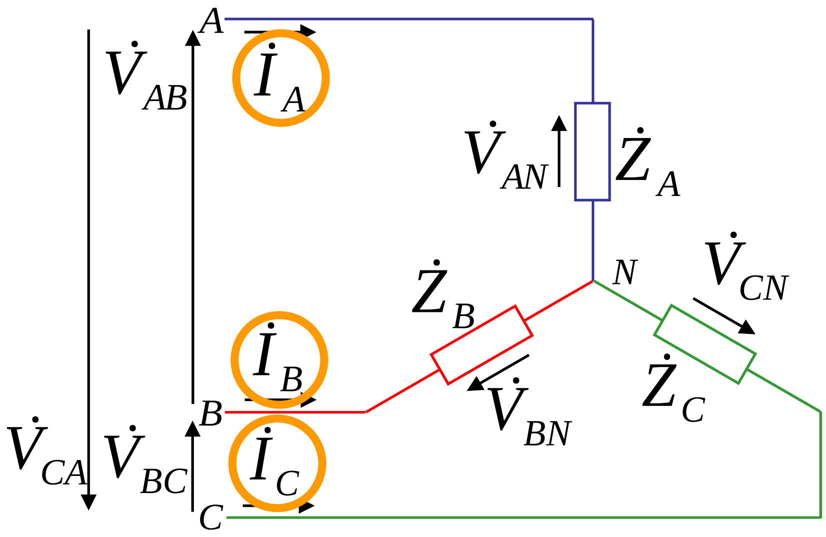
Ligação em Triângulo



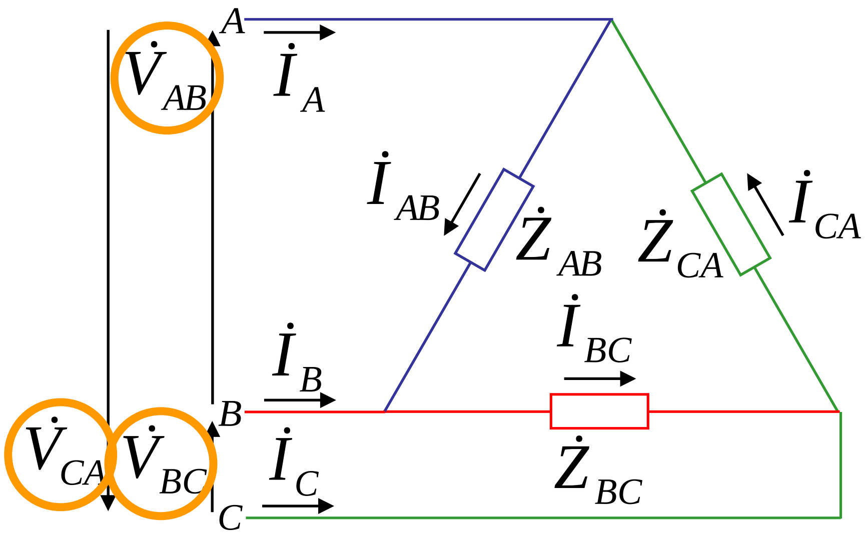
Relações entre os valores de fase e linha

- 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



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

- Resumo

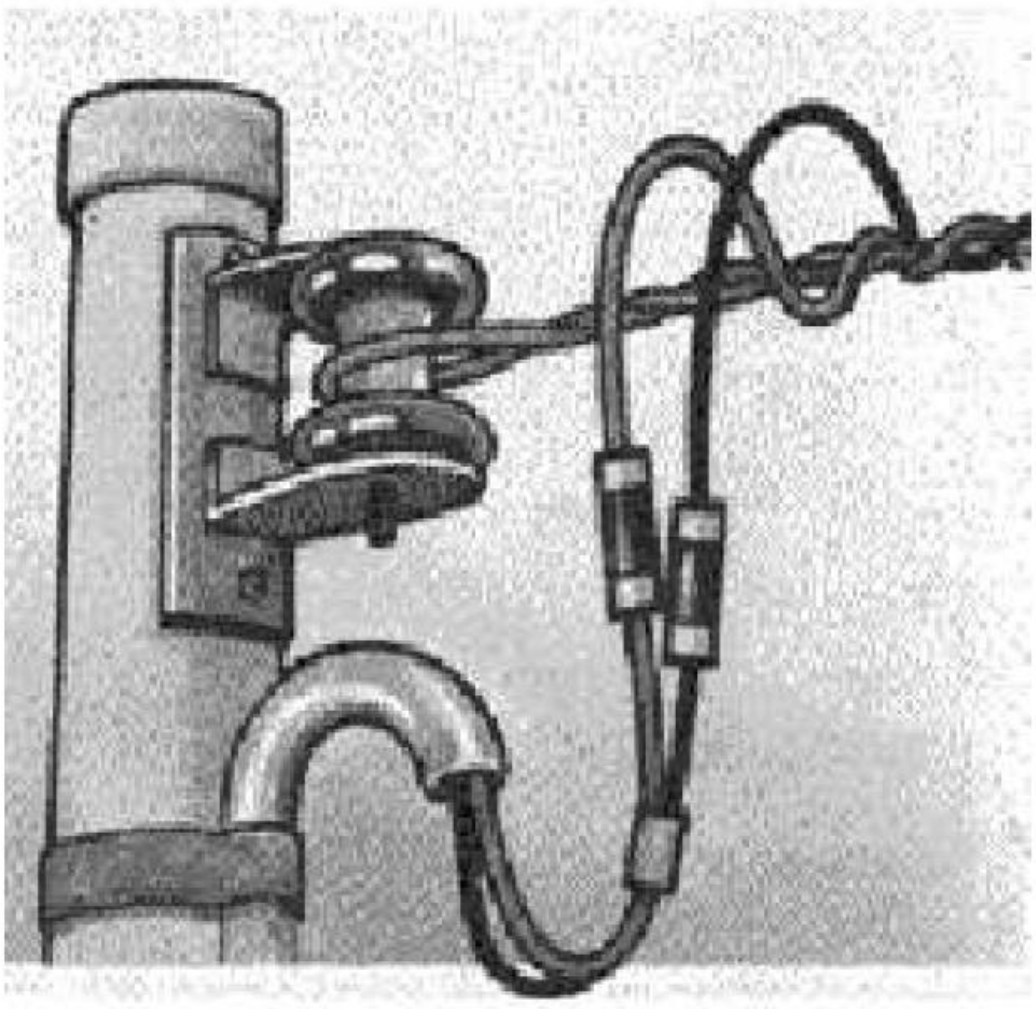
	Seqüência positiva
Ligação em estrela	$\dot{I}_{linha} = \dot{I}_{fase}$ $\begin{bmatrix} \dot{V}_{ab} \\ \dot{V}_{bc} \\ \dot{V}_{ca} \end{bmatrix} = \sqrt{3}\angle 30^o \begin{bmatrix} \dot{V}_{an} \\ \dot{V}_{bn} \\ \dot{V}_{cn} \end{bmatrix}$
Ligação em triângulo	$\dot{V}_{linha} = \dot{V}_{fase}$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

Conexões Residenciais na Rede Elétrica

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

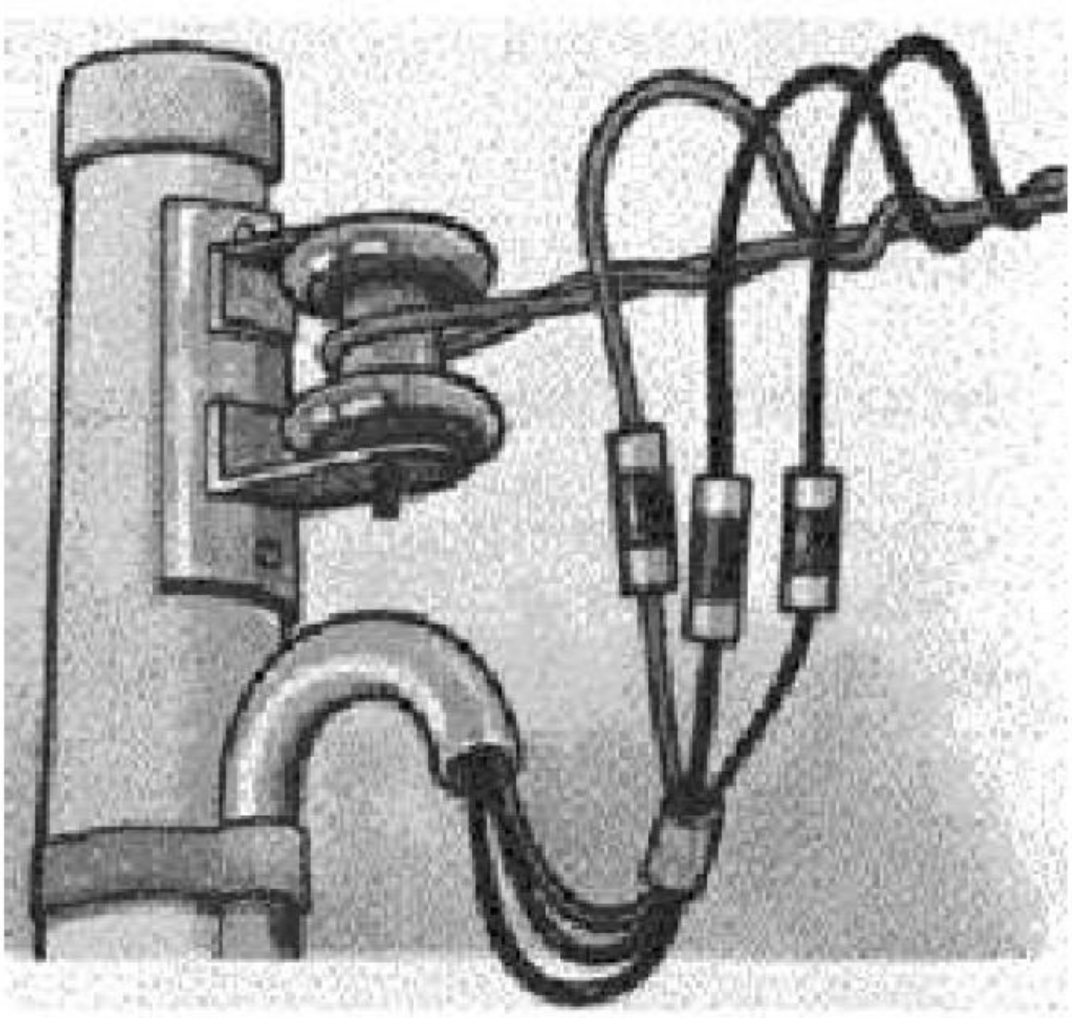
Ligações domiciliarias (1/3)

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



Fase e Neutro

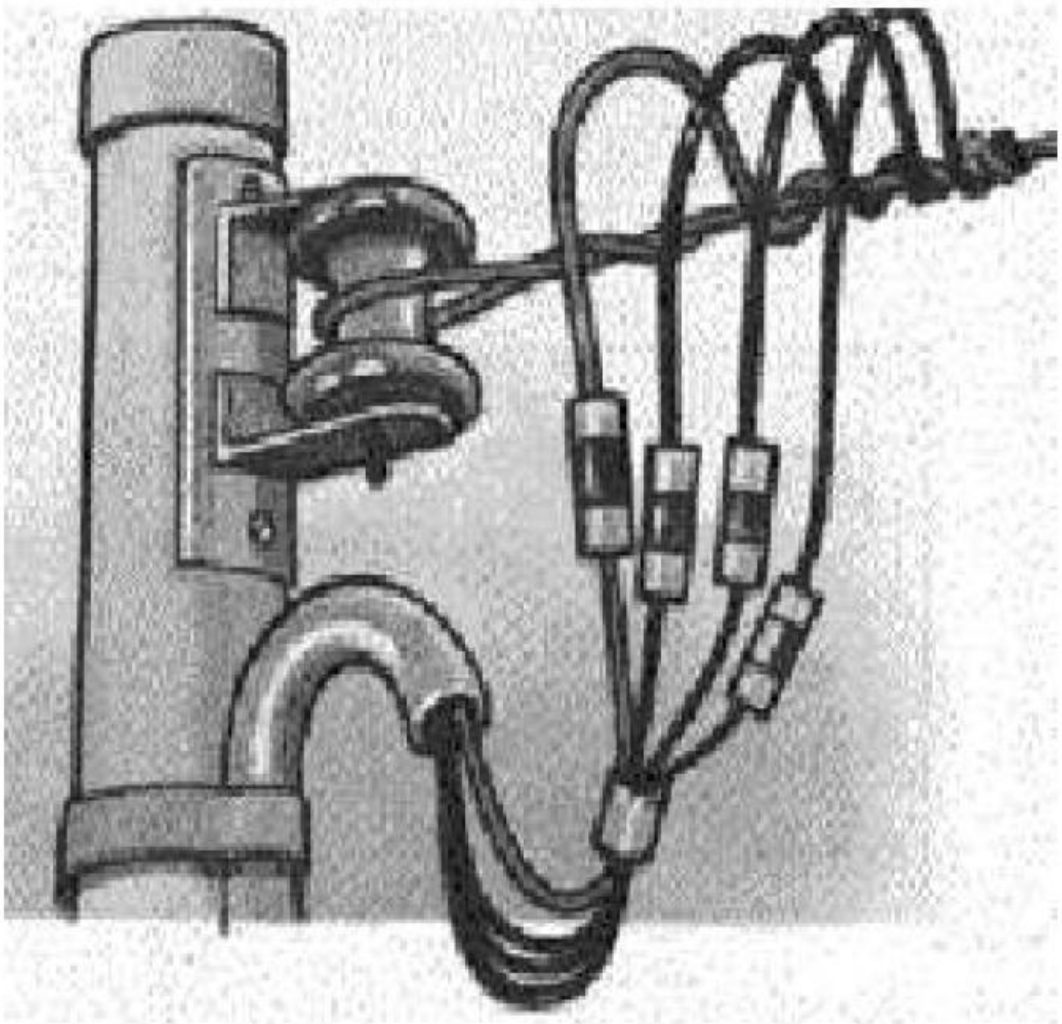
- Nas áreas de concessão das empresas do estado de São Paulo, tem-se três tipos de atendimento:



2 Fases e Neutro

Ligações domiciliarias (3/3)

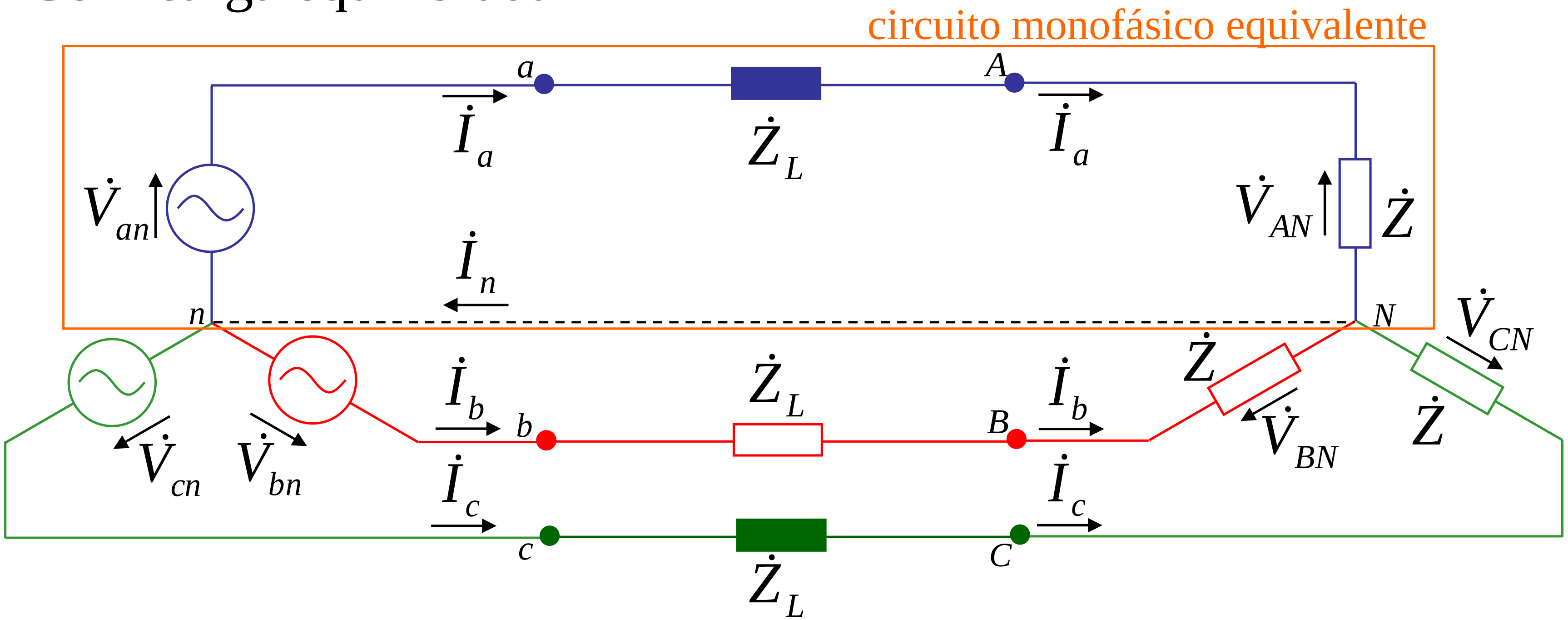
- Nas áreas de concessão das empresas do estado de São Paulo, tem-se três tipos de atendimento:



3 Fases e Neutro

Sistemas trifásicos simétricos e equilibrados (1/3)

- Com carga equilibrada

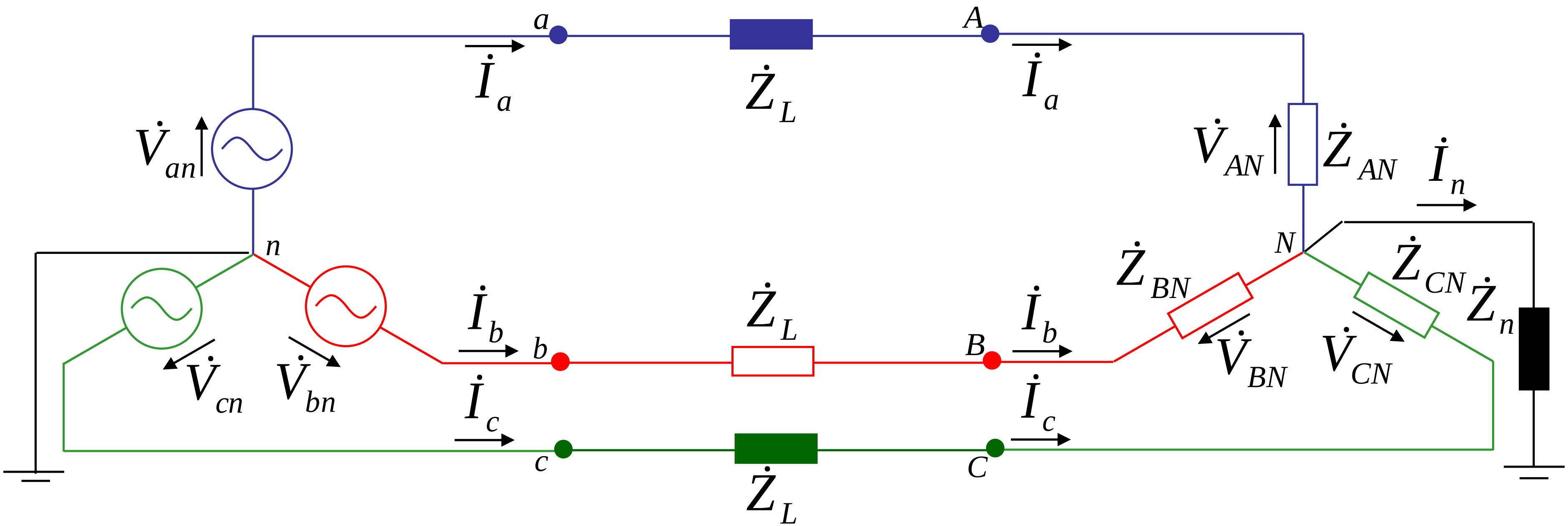


- Os centros-estrelas $n - N$ estão ao mesmo potencial.
- A corrente pelo condutor neutro

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

- Um circuito monofásico equivalente.

- Com carga desequilibrada



- Um sistema de equações lineares

$$\dot{V}_{an} = \dot{I}_a(\dot{Z}_L + \dot{Z}_{AN}) + \dot{I}_n\dot{Z}_N$$
$$\dot{V}_{bn} = \dot{I}_b(\dot{Z}_L + \dot{Z}_{BN}) + \dot{I}_n\dot{Z}_N$$
$$\dot{V}_{cn} = \dot{I}_c(\dot{Z}_L + \dot{Z}_{CN}) + \dot{I}_n\dot{Z}_N$$
$$\dot{I}_n = \dot{I}_a + \dot{I}_b + \dot{I}_c$$

Potência em sistemas trifásicos (1/7)

- A potência aparente complexa monofásica e dada por:

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

- Nos circuitos trifásico, a potência aparente toral é a soma das potências aparente individual 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:

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

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

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

$$\boxed{\begin{aligned} S &= \sqrt{3} V_{AB} I_A \\ P &= \sqrt{3} V_{AB} I_A \cos\varphi \\ Q &= \sqrt{3} V_{AB} I_A \sin\varphi \end{aligned}}$$

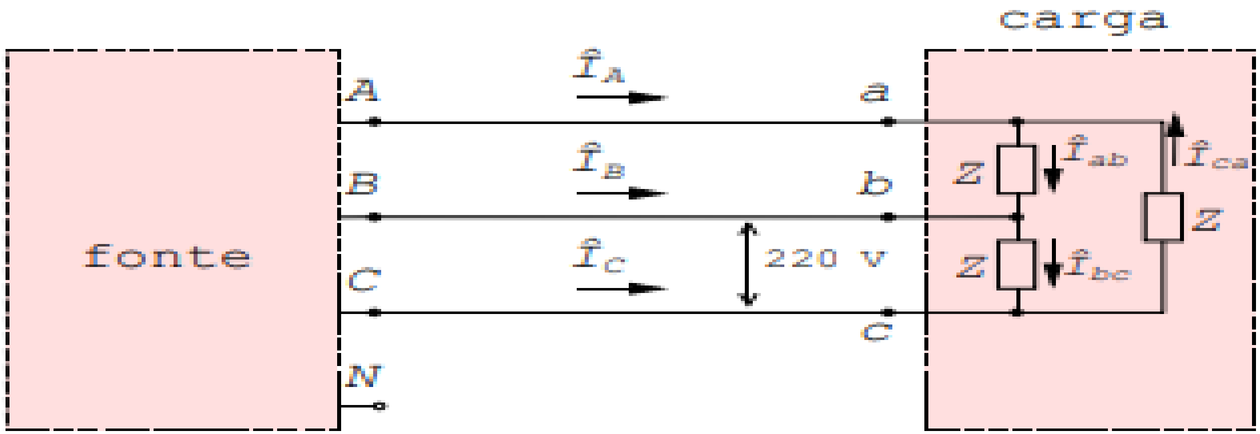
Ligação em Triângulo

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

$$\boxed{\begin{aligned} S &= \sqrt{3} V_{AB} I_A \\ P &= \sqrt{3} V_{AB} I_A \cos\varphi \\ Q &= \sqrt{3} V_{AB} I_A \sin\varphi \end{aligned}}$$

- 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.

Carga equilibrada em Δ



DENOMINAÇÃO:

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

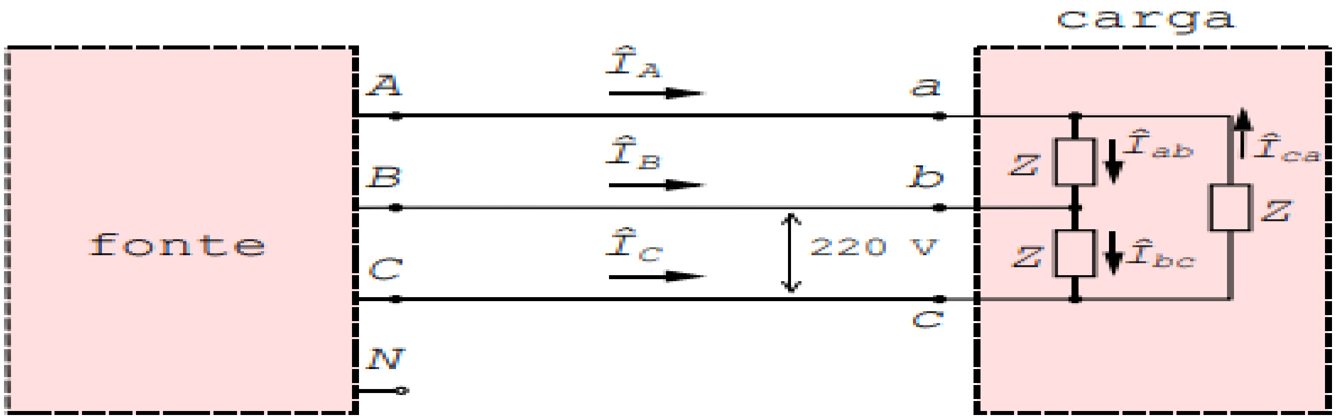
Convenção para o sentido das *correntes de fase*:

a) Para a seqüência de fases *ABC*:

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

b) Para a seqüência de fases *ACB*:

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



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:

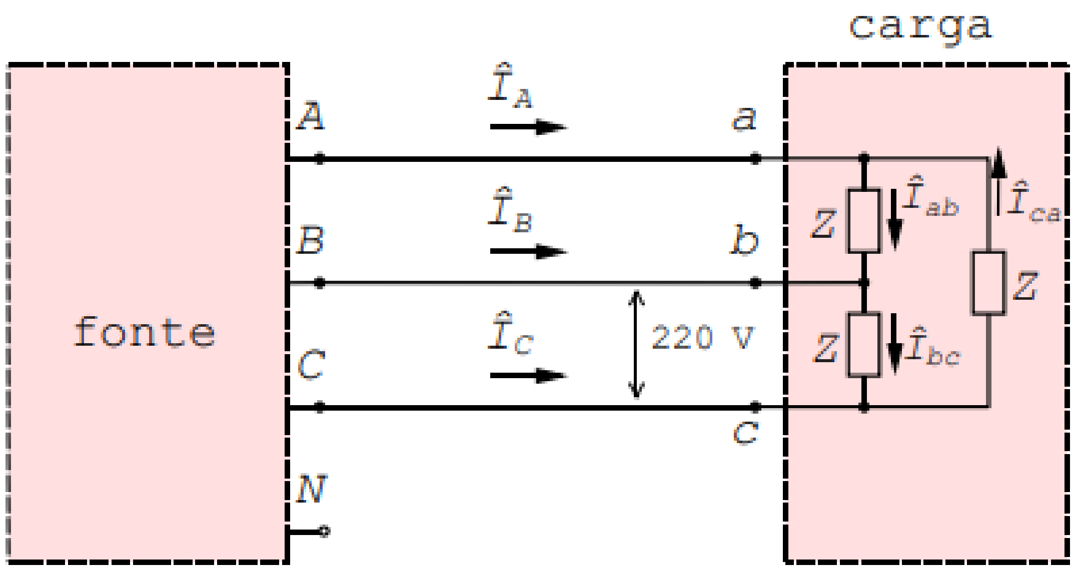
$$\hat{U}_{AB} = 220\angle 0° \quad V$$

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

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

A impedância na carga vale:

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



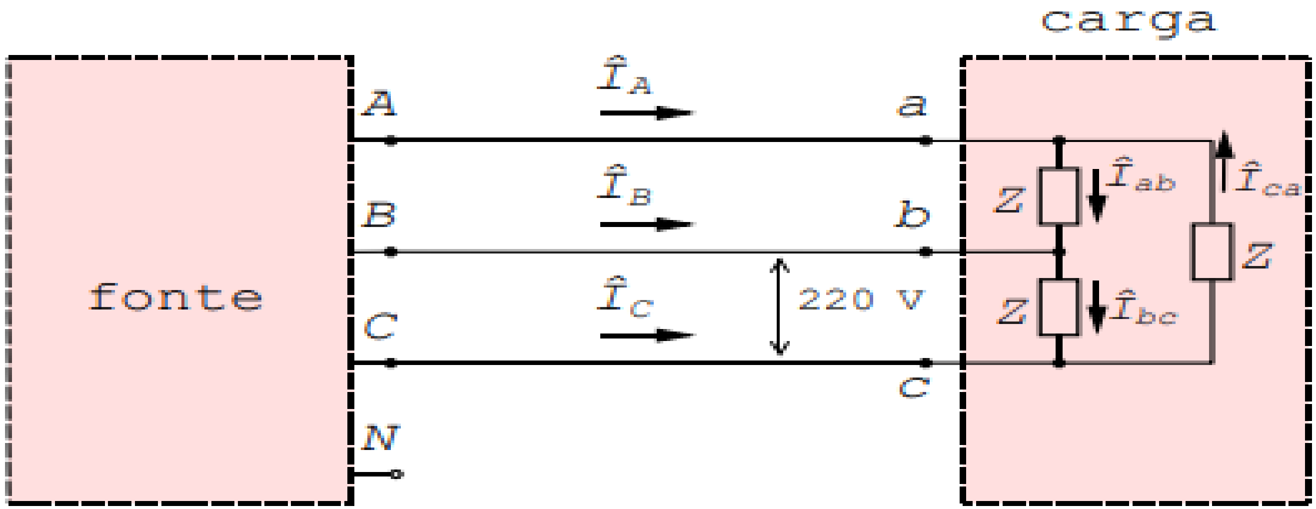
CÁLCULO DAS *CORRENTES DE FASE*

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

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

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

CÁLCULO DAS CORRENTES DE LINHA



Para o nó a tem-se:

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

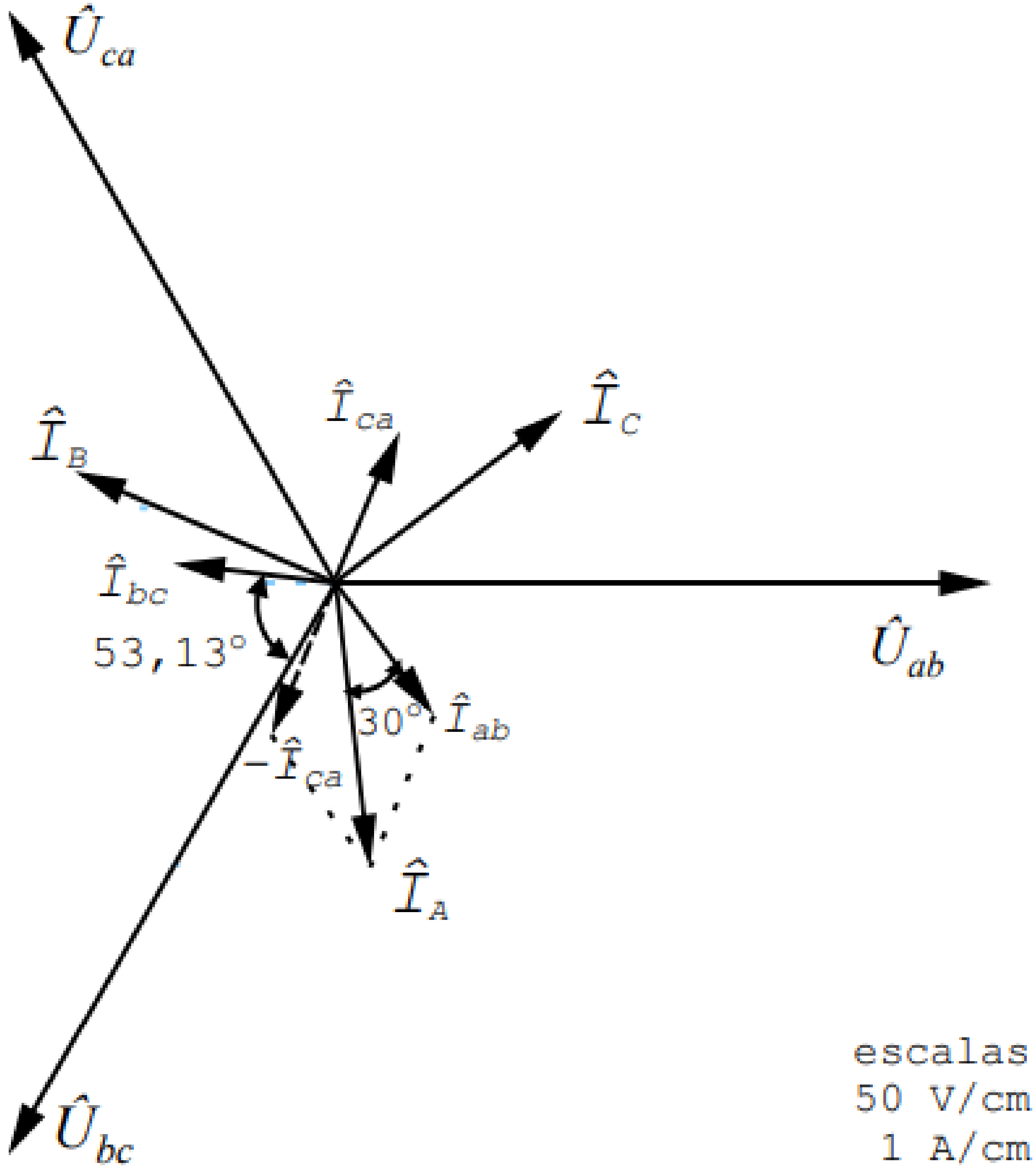
$$\hat{I}_A = \hat{I}_{ab} - \hat{I}_{ca} = 0{,}2279 - j1{,}8916 = 1{,}9053\angle -83{,}13^\circ \quad \textbf{A}$$

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°.

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

ATENÇÃO:

Esta relação é válida somente para carga Δ-equilibrada.