Eletricista de Sistemas de Energias Renováveis

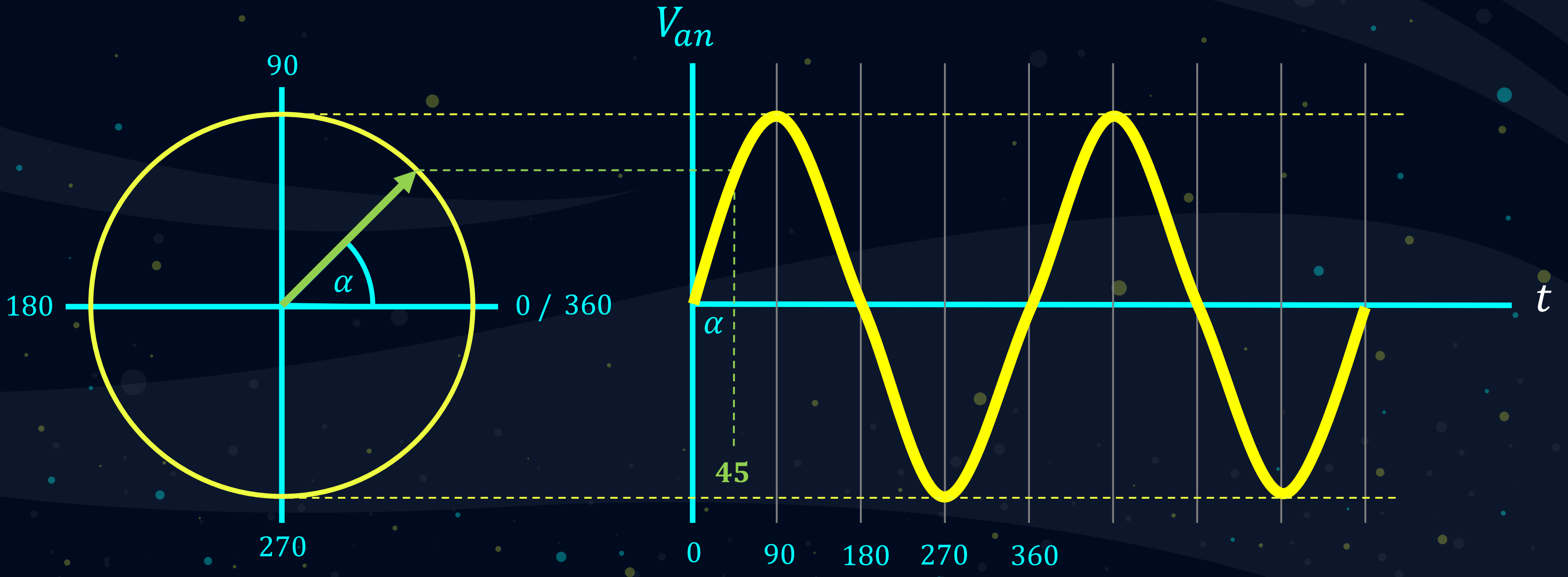
Módulo I

Na aula anterior vimos:

Corrente Alternada

Onda Senoidal

Um sistema balanceado de tensões trifásicas pode ser representado no domínio da frequência conforme a figura:

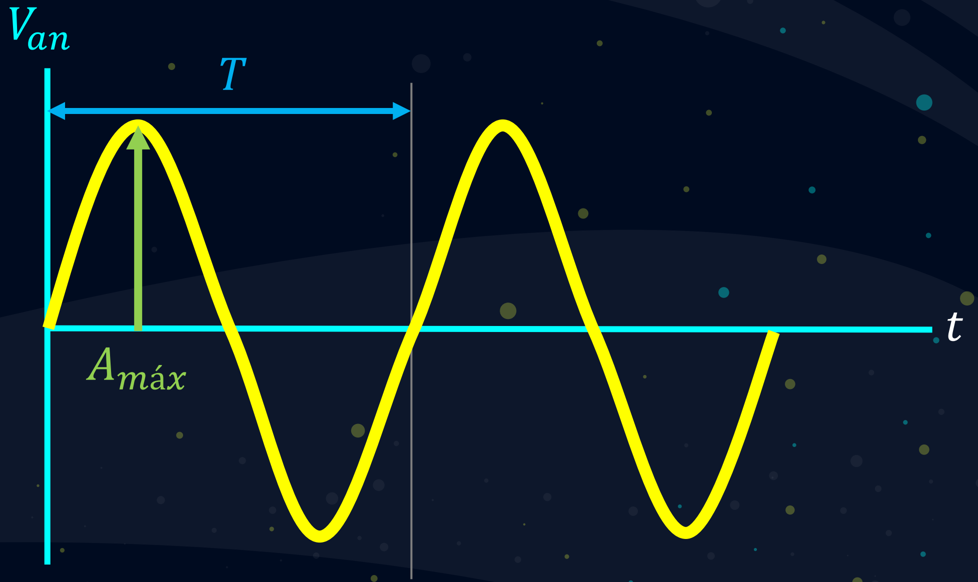


Onda Senoidal

Toda forma de onda senoidal possui um período e uma frequência. As duas grandezas são inversamente proporcionais, isto é, quando a frequência aumenta, o período diminui, e vice-versa.

$$T(s) = \frac{1}{f(Hz)}$$

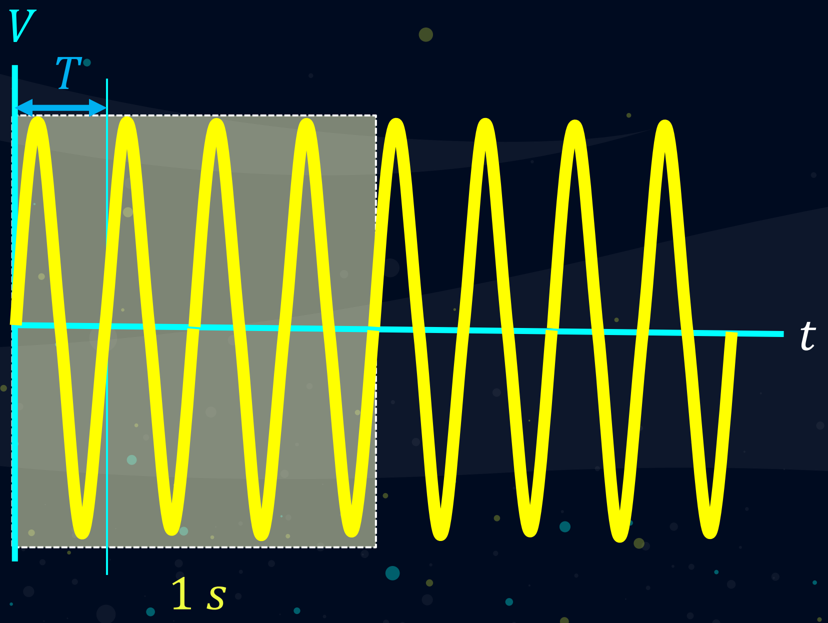
$$f(Hz) = \frac{1}{T(s)}$$

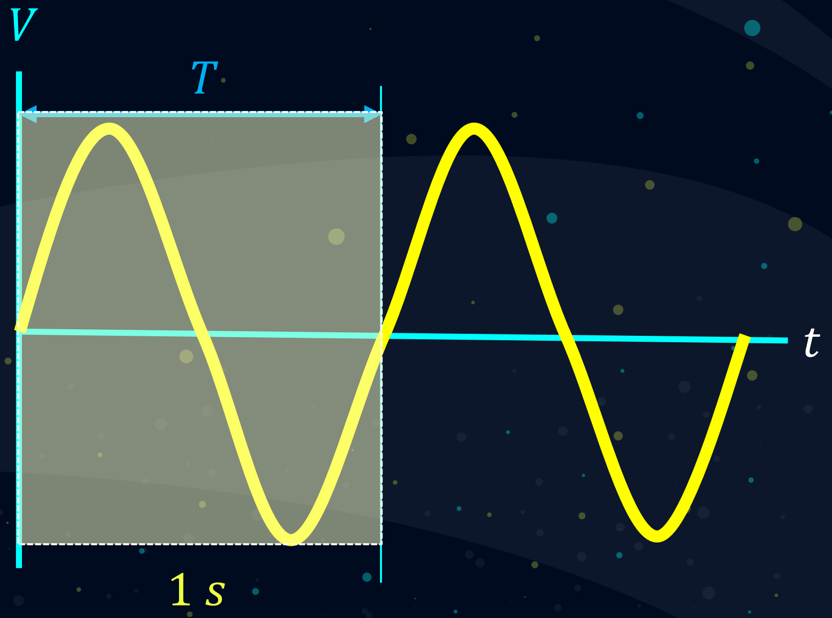


Onda Senoidal

Período de uma onda senoidal é a duração (em segundos) da onda para completar um ciclo completo, isto é, dar uma volta inteira de 360 graus.

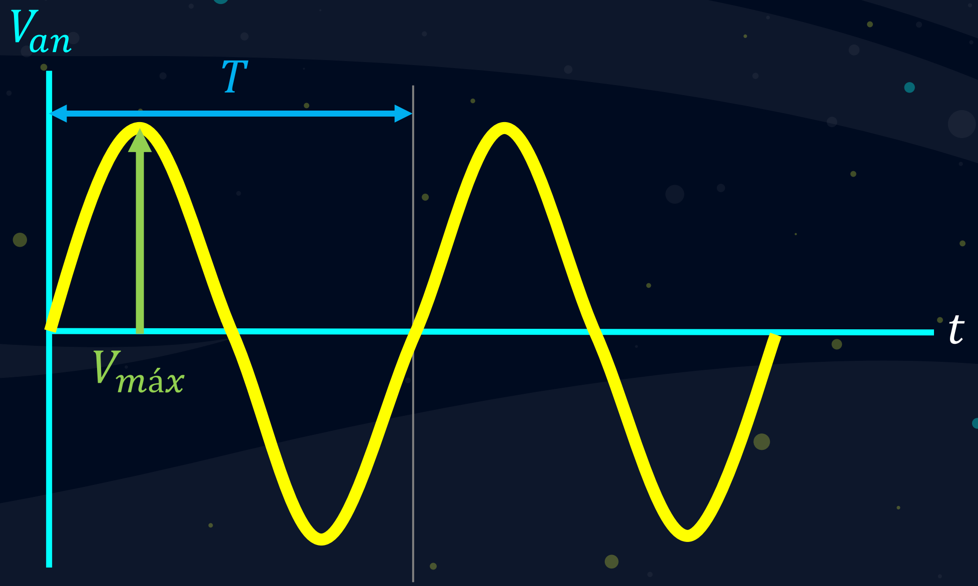
Frequência é a quantidade de ciclos completos em um segundo. A unidade de medida é Hertz (Hz).





Onda Senoidal

Outro elemento da onda senoidal é a amplitude, este valor também pode ser denominado Valor de Pico ou Valor máximo (V_{max}),

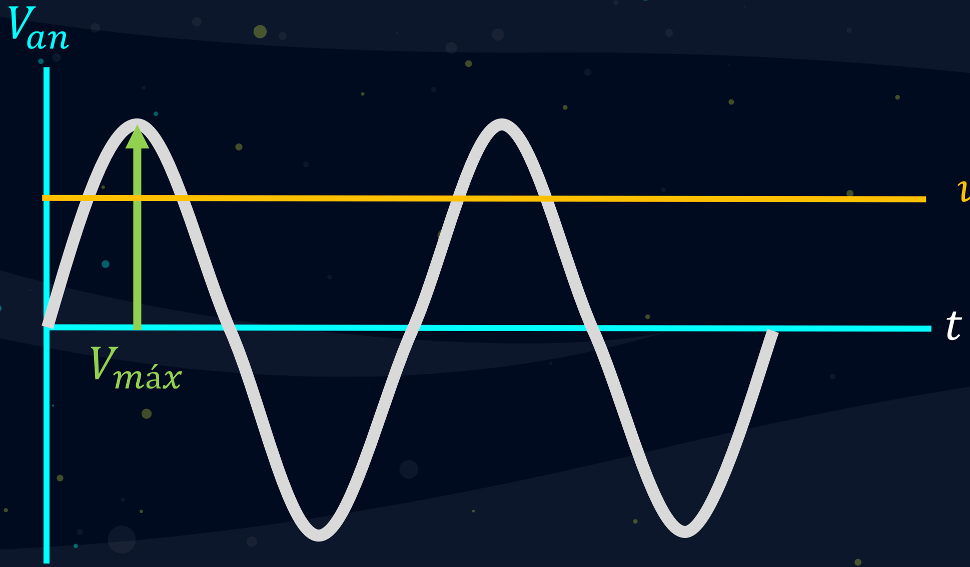


O valor instantâneo é o valor que a amplitude assume em um determinado instante (s). A equação da onda é apresentada a seguir:

$$v(t) = V_m \operatorname{sen}(\alpha + \theta)\ \mathrm{V}$$

Onda Senoidal

Um conceito importante é o Valor eficaz de uma forma de onda senoidal. O cálculo é realizado através da expressão:

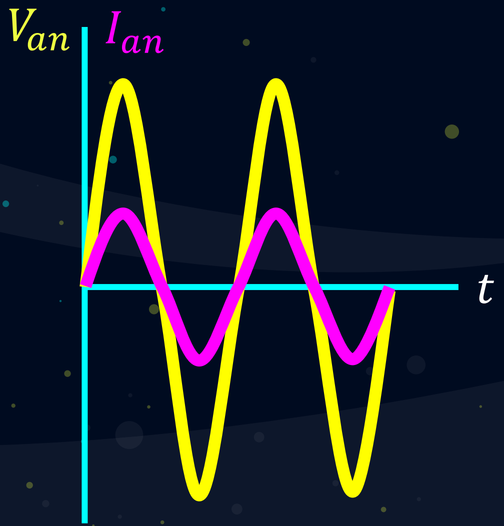


$$v_{ef} = \frac{V_{max}}{\sqrt{2}} = 0{,}707 \cdot V_{max}$$

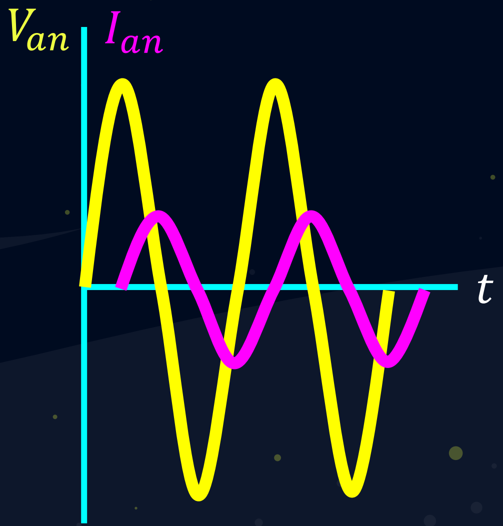
O valor RMS (Root mean Square) ou valor eficaz é o valor de tensão ou corrente alternada (CA) que produz o mesmo efeito de dissipação de calor que seu equivalente de tensão ou corrente, em corrente contínua (CC) sobre uma mesma resistência.

Onda Senoidal

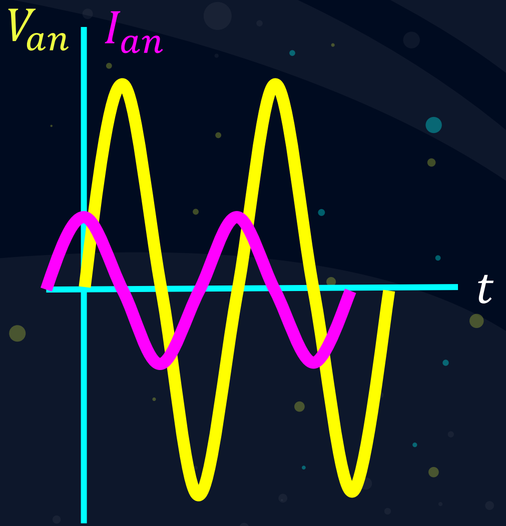
Dependendo das características de uma instalação elétrica, muitas vezes haverá uma defasagem entre a tensão e a corrente, isto se deve ao tipo de carga presente prioritariamente presente na instalação:



$v(t) = V_{max}\,\mathrm{sen}(\alpha + \theta)\,\mathrm{V}$
$i(t) = I_{max}\,\mathrm{sen}(\alpha + \theta)\,A$



$v(t) = V_{max}\,\mathrm{sen}(\alpha + \theta)\,\mathrm{V}$
$i(t) = I_{max}\,\mathrm{sen}(\alpha + 90)\,A$



$v(t) = V_{max}\,\mathrm{sen}(\alpha + \theta)\,\mathrm{V}$
$i(t) = I_{max}\,\mathrm{sen}(\alpha - 90)\,A$

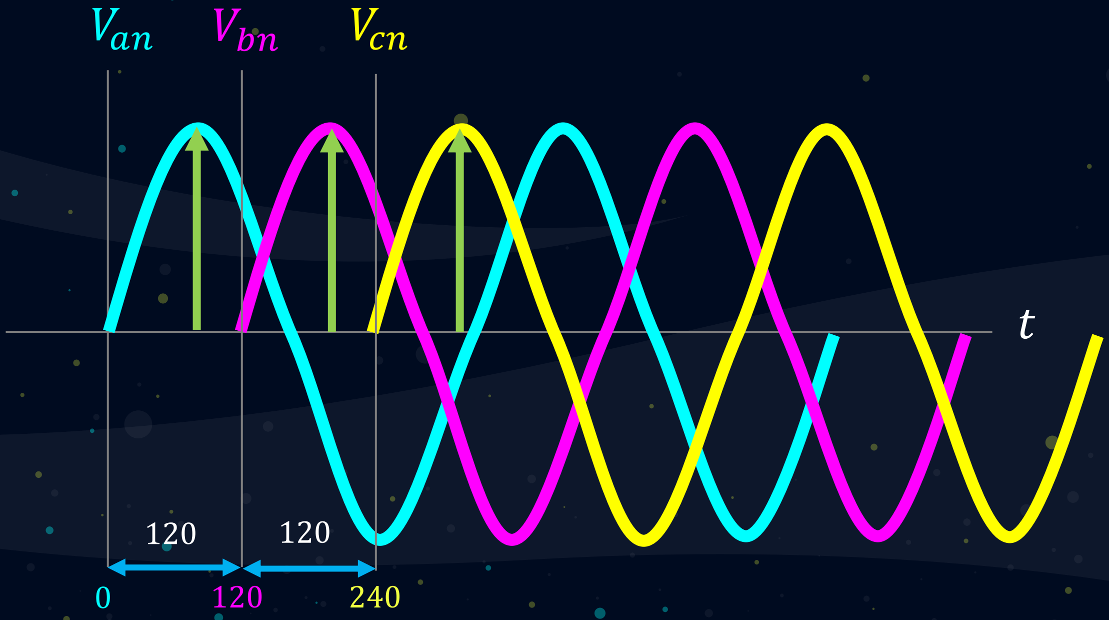
Sistemas Trifásicos

Os circuitos trifásicos são aqueles nos quais a alimentação é formado por um sistema trifásico de tensões.

Se as três fontes de tensão senoidal possuírem a mesma magnitude e a mesma frequência, e as tensões estiverem defasadas em 120 graus entre si, as tensões estão balanceadas ou em equilíbrio.

Se as cargas alimentadas forem tais que as correntes produzidas pelas tensões também estiverem balanceadas, o circuito como um todo será chamado de circuito trifásico balanceado ou equilíbrio.

Um sistema balanceado de tensões trifásicas pode ser representado no domínio da frequência conforme a figura:



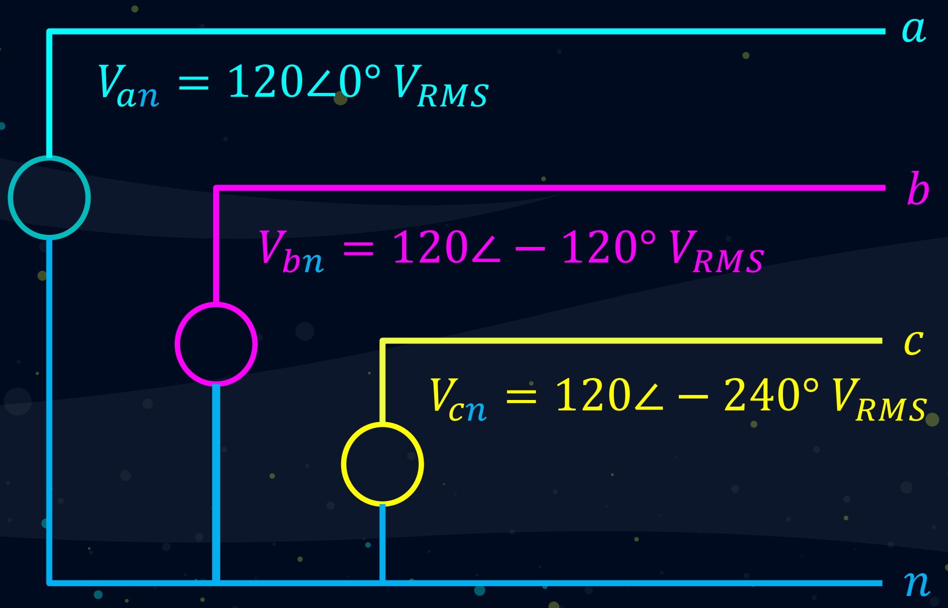
$$V_{an} = V\angle 0° \; V_{RMS}$$

$$V_{bn} = V\angle -120° \; V_{RMS}$$

$$V_{cn} = V\angle -240° \; V_{RMS}$$

Sistemas Trifásicos

Graficamente as notações são utilizadas na representação de problemas e situações de circuitos trifásicos como mostra o esquema abaixo:



Conexões Trifásicas

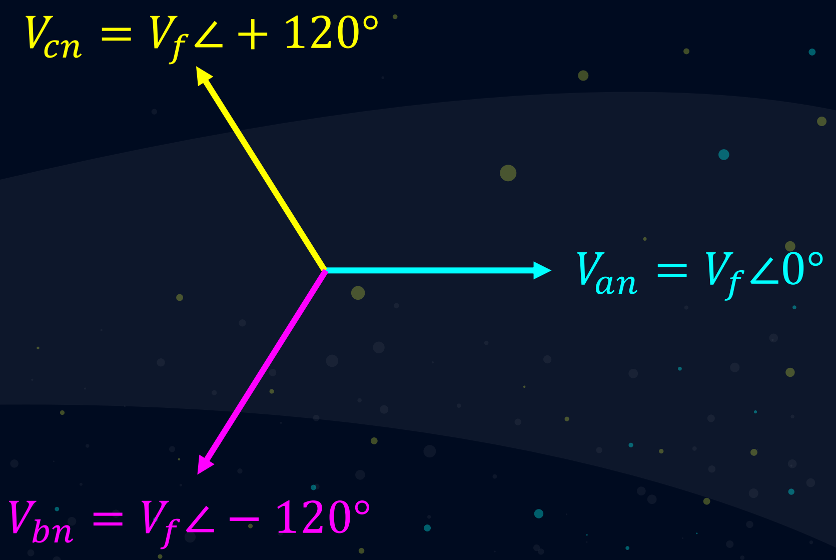
Uma das mais importantes fontes de alimentação de um sistema polifásico é a fonte trifásica balanceada. As tensões nesta configuração estão em fase, isto é, cada uma das linhas $\boldsymbol{a}$, $\boldsymbol{b}$ e $\boldsymbol{c}$, referenciadas ao neutro estão:

O diagrama fasorial das tensões está apresentado a continuação:

$$V_{an} = V_f\angle 0°$$

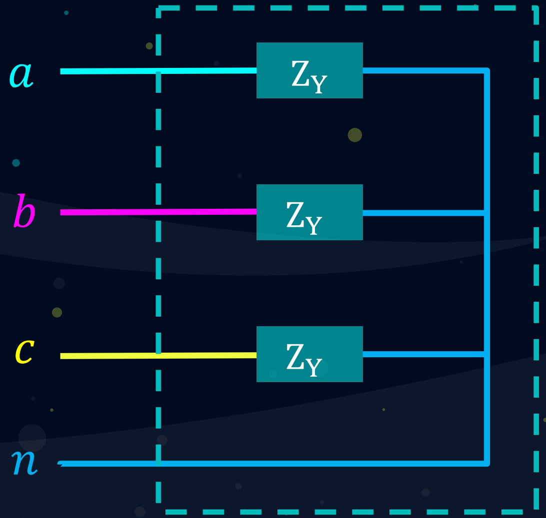
$$V_{bn} = V_f\angle -120°$$

$$V_{cn} = V_f\angle +120°$$



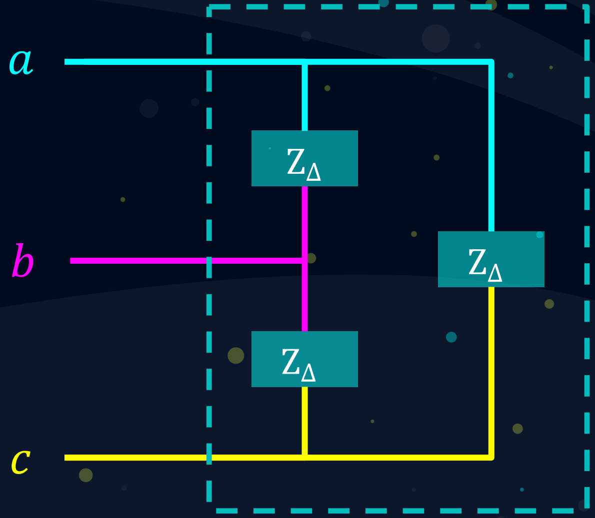
Conexões Trifásicas

Conexão Estrela ou Y:



Fornece um local de conexão à terra dos sistemas de proteção

Conexão Delta (Δ):



Melhor permanência de equilíbrio ao atender cargas desbalanceadas.

Conexões Fonte/Carga

Lembrando que a tensão V_f representa a intensidade da tensão de fase. As tensões de linha-linha, ou tensões de fase-fase, podem ser calculadas utilizando a LKT:

$$V_{ab} = V_{an} - V_{bn}$$

$$V_{ab} = V_f\angle 0° - V_f\angle -120°$$

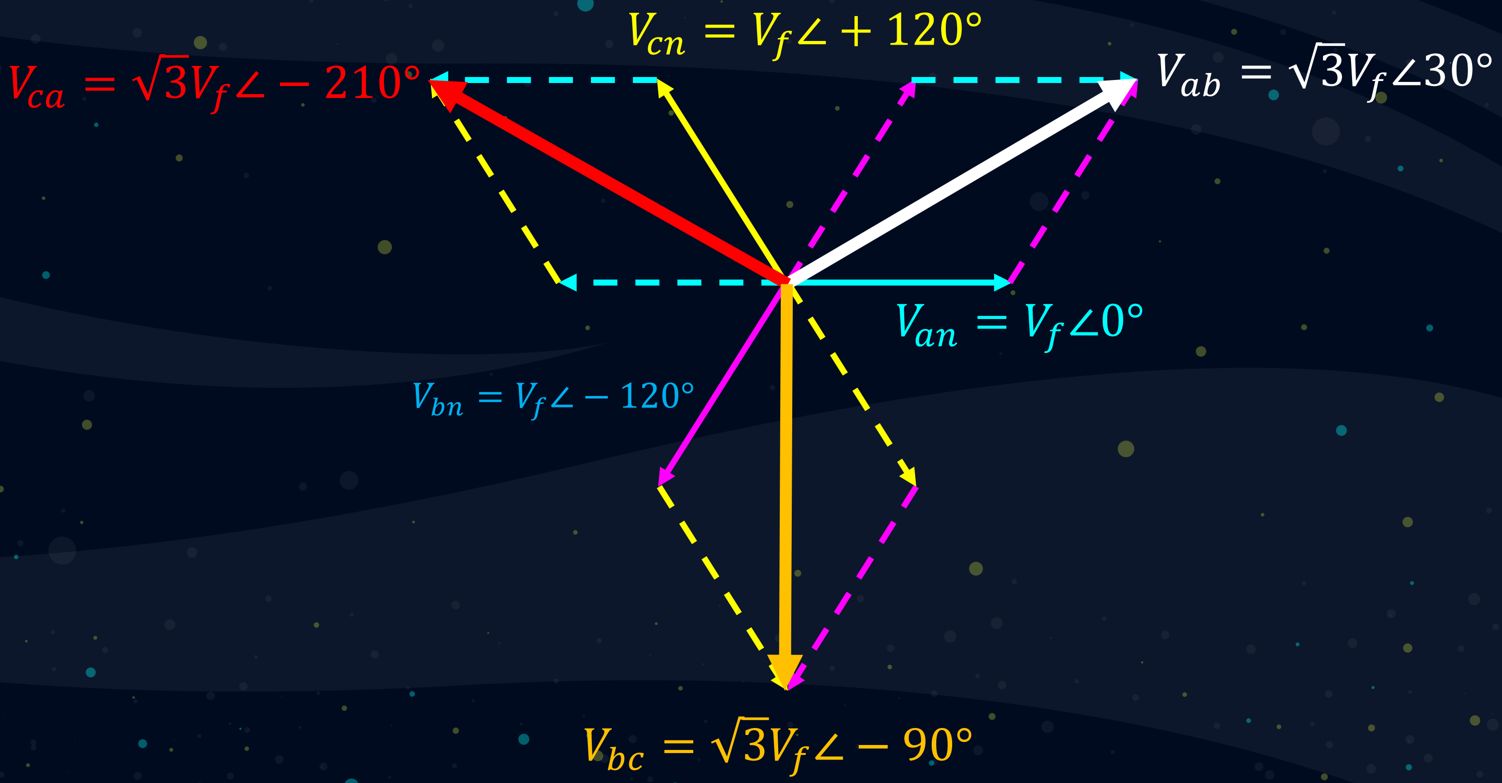
$$V_{ab} = \sqrt{3}\cdot V_f\angle 30°$$

Replicando o processo para as demais tensões de linha, obtém-se:

$$V_{bc} = \sqrt{3}\cdot V_f\angle -90°$$

$$V_{ca} = \sqrt{3}\cdot V_f\angle -210°$$

Conexões Fonte/Carga



Conexões Fonte/Carga

Pelo que foi constatado, as magnitudes das tensões de linha são representados como $\boldsymbol{V_L}$, e portanto, para um sistema equilibrado, temos que:

$$V_L = \sqrt{3} \cdot V_f$$

Dessa forma, em um sistema com conexão em estrela, a tensão de linha é $\sqrt{3}$ a tensão de fase.

A corrente na linha para a fase a, pode ser calculada pela lei de Ohm:

$$I_a = \frac{V_{an}}{Z_Y} = \frac{V_f\angle 0°}{Z_Y}$$

Em que $\boldsymbol{I_b}$ e $\boldsymbol{I_c}$ possuem a mesma magnitude de $\boldsymbol{I_a}$, porém estão defasadas de $\boldsymbol{I_a}$ em $\mathbf{120°}$ e $\mathbf{240°}$, respectivamente.

Na aula de hoje:

Aula 6

Potência CA

Triângulo de Potência

Fator de Potência (FP)

Correção do FP

Exemplo

Revisão

Quiz – Casa

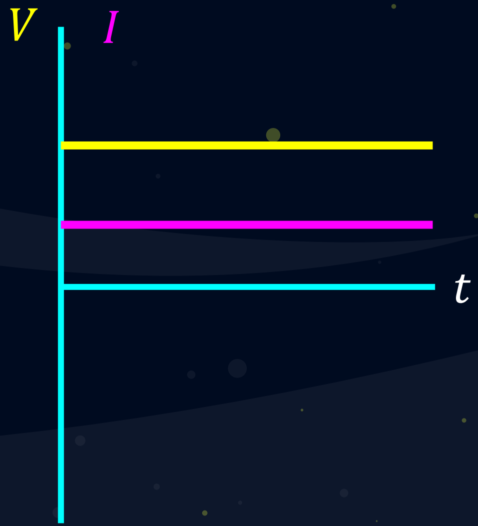
Exercícios - Casa

Potência

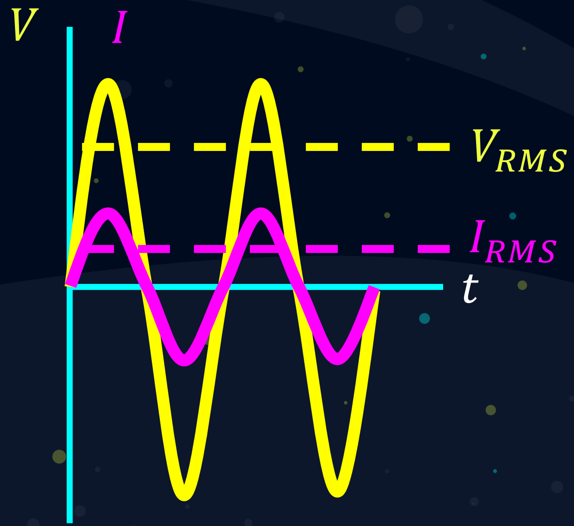
INSTITUTO FEDERAL
Sul-rio-grandense
Campus
Passo Fundo

Potência CC e CA

Vimos que quando as correntes e tensões são contínuas, o valor que obtemos de Potência relaciona diretamente a tensão e corrente consumidas, por exemplo por um resistor.
Já na Corrente Alternada, as tensões e correntes tem comportamentos dinâmicos, e estes tem efeitos diretos nas cargas que alimentam.



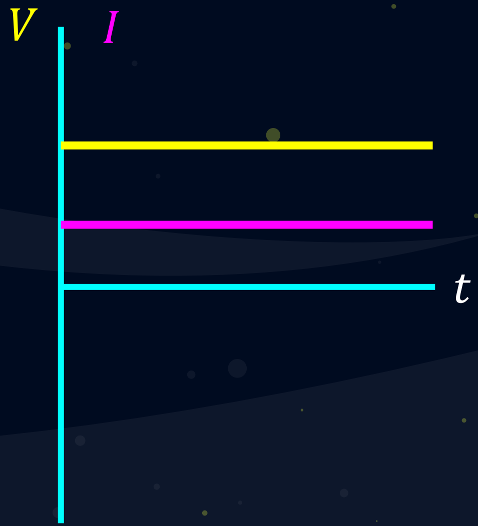
$$P = V . I \ (W)$$



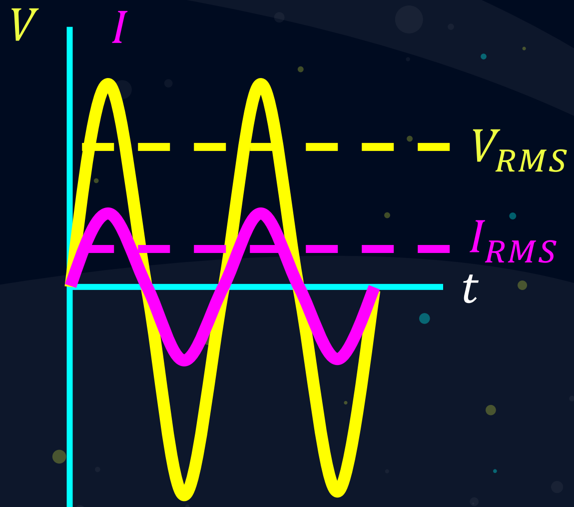
$$P = V_{RMS} . I_{RMS} \ (W)$$

Potência CC e CA

Vimos também que para chegar a valores correspondentes de potência CA e CC devemos trabalhar com Valores eficazes (RMS)



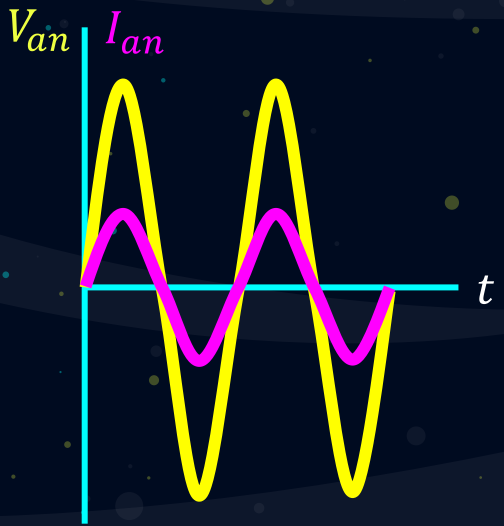
$$P = V.I\ (W)$$



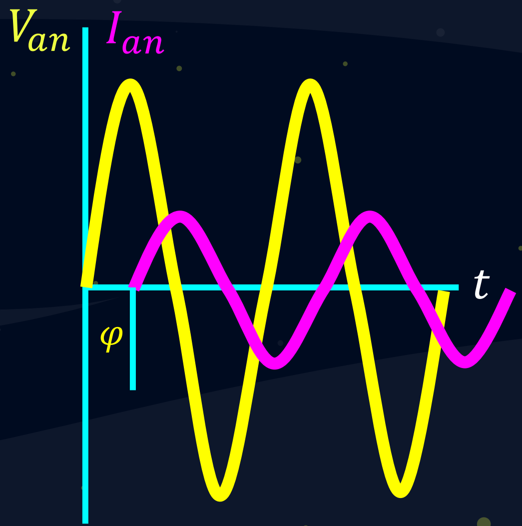
$$P = V_{RMS}.I_{RMS}\ (W)$$

Potência

Neste sentido podemos ter três situações diferentes conforme o tipo de carga predominante na instalação elétrica.



Carga Puramente Resistiva
$(\varphi = 0)$



Cargas Indutivas, a corrente atrasada da tensão
$(0 < \varphi \leq 90)$

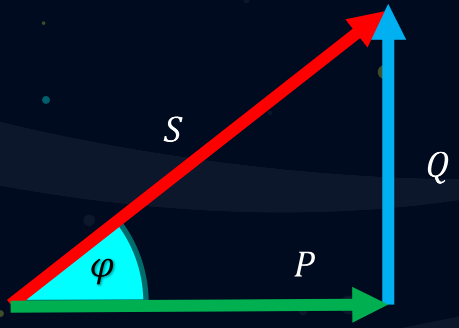
Cargas Capacitivas, a corrente adiantada da tensão
$(0 < \varphi \leq -90)$

Triângulo de Potências

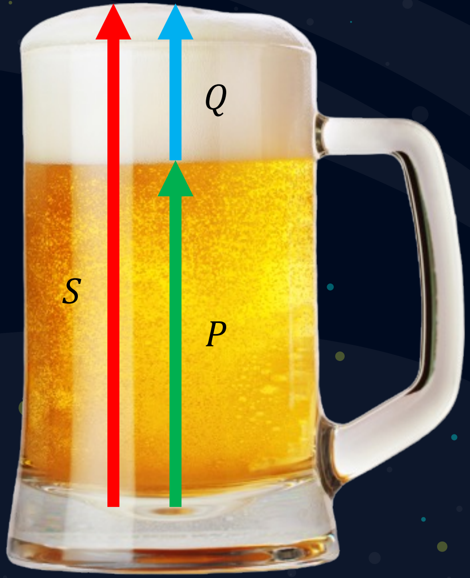
INSTITUTO FEDERAL
Sul-rio-grandense
Campus
Passo Fundo

Triângulo de Potências

Tendo visto alguns aspectos sobre defasagem angular provocadas por cargas indutivas e capacitivas, vamos analisar o triângulo das potências.

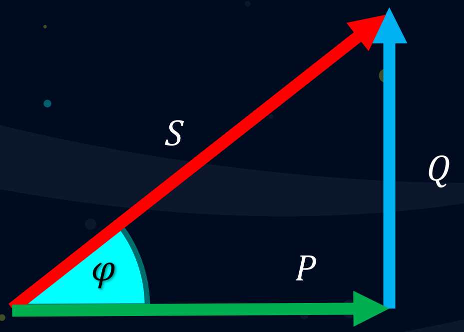


No gráfico temos a representação em um triângulo retângulo de três vetores diferentes, um correspondente à Potência Aparente (S), outro para a Potência Ativa (P) e finalmente, um para a Potência Reativa (Q).

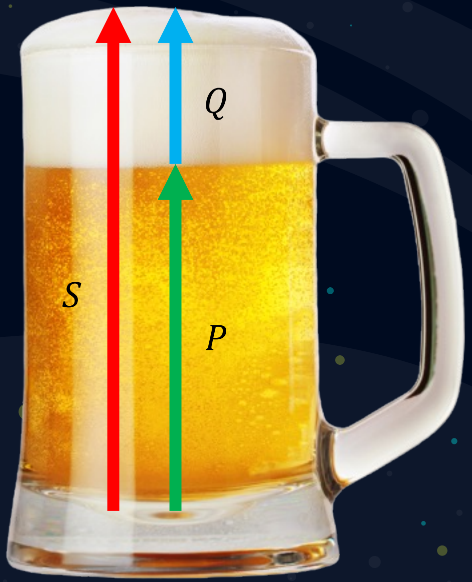


A Potência Aparente é medida em (VA – Volt-Ampère), a Potência Ativa ou Real (W – Watt) e a Potência Reativa (VAr – Volt-Ampère reativo).

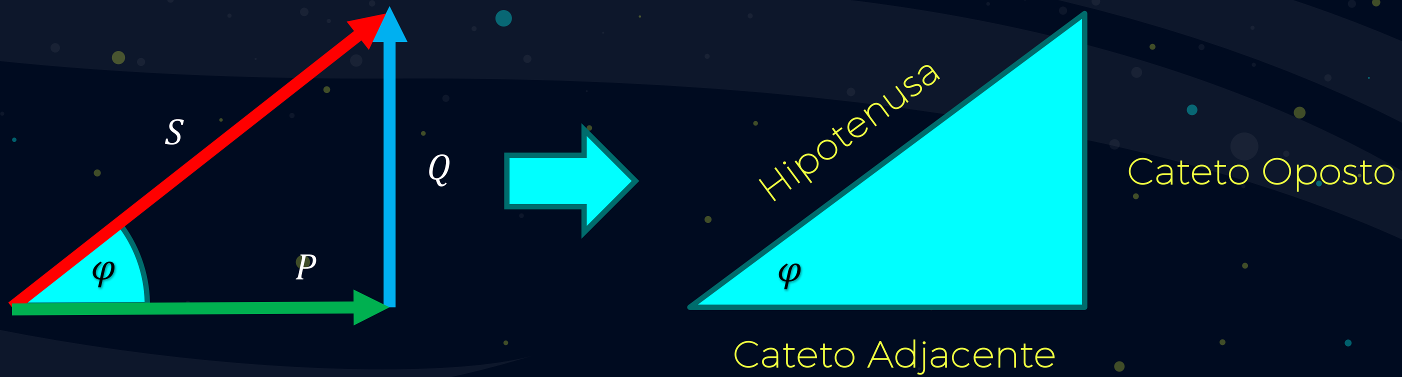
Triângulo de Potências



A Potência Ativa é responsável por executar o trabalho, isto é, ela transforma efetivamente a energia elétrica em energia mecânica, por exemplo, no caso de motores. Já a Potência Reativa não realiza nenhum trabalho, é uma energia necessária para gerar o fluxo magnético em motores e transformadores para coloca-los em operação.



Triângulo de Potências



$$\text{sen}\,\varphi = \frac{Q}{S}$$

$$\cos\varphi = \frac{P}{S}$$

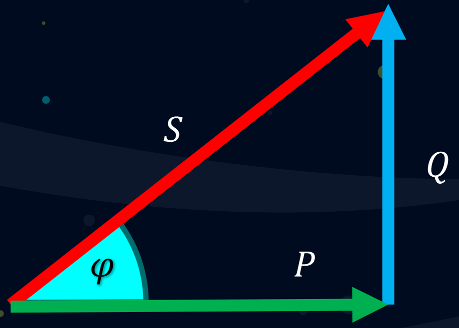
$$S = \sqrt{(P)^2 + (Q)^2}$$

$$\text{sen}\,\varphi = \frac{Cat.\,Oposto}{Hipotenusa}$$

$$\cos\varphi = \frac{Cat.\,Adjacente}{Hipotenusa}$$

$$Hip = \sqrt{(Cat.\,Adj.)^2 + (Cat.\,Op.)^2}$$

Triângulo de Potências



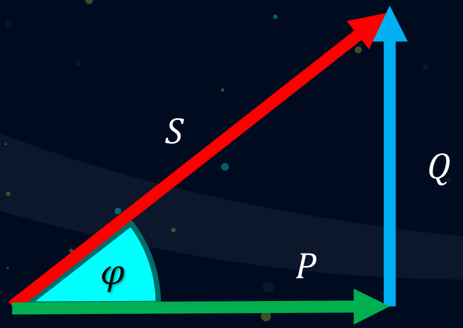
$$S = V_{RMS} \cdot I_{RMS}$$

$$P = V_{RMS} \cdot I_{RMS} \cdot \cos\varphi \rightarrow P = S \cdot \cos\varphi$$

$$Q = V_{RMS} \cdot I_{RMS} \cdot \operatorname{sen}\varphi \rightarrow Q = S \cdot \operatorname{sen}\varphi$$

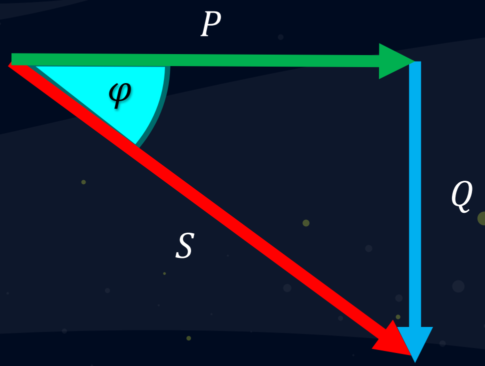
$$P = S \cdot \cos\varphi \rightarrow \cos\varphi = \frac{P}{S}$$

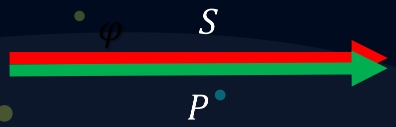
Triângulo de Potência:



Se a potência Q for positiva, a carga será indutiva, o FP estará em atraso e o vetor S estará no primeiro quadrante.

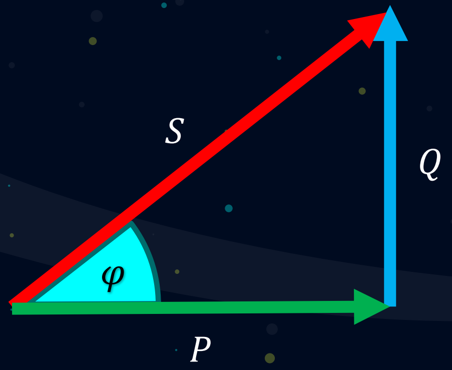
Se a potência Q for negativa, a carga é capacitiva, o FP estará em avanço e o vetor S estará no quarto quadrante

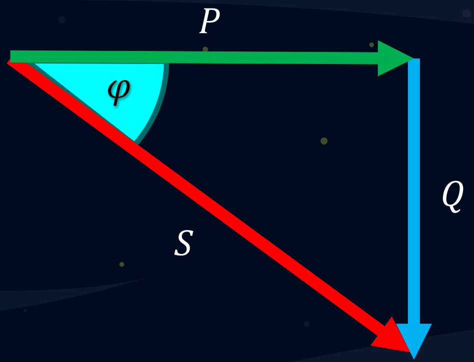


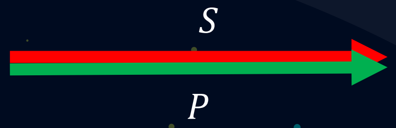


Se a potência Q for nula, a carga será resistiva, o FP será igual a 1 e o vetor S estará sobre o eixo real positivo.

Triângulo de Potência:







Para um indutor, $\varphi = 90$, portanto o $\cos(90) = 0$ e o $\operatorname{sen}(90) = 1$.

Isto quer dizer que o Indutor não absorve potência real ($P = 0$), porém absorve potência reativa ($Q > 0$).

Para um capacitor, $\varphi = -90$, portanto o $\cos(-90) = 0$ e o $\operatorname{sen}(-90) = -1$.

Isto quer dizer que o Capacitor não absorve potência real ($P = 0$), porém agora a potência reativa é negativa, ($Q < 0$). Se a potência absorvida pelo capacitor é negativa, quer dizer que o capacitor está fornecendo potência reativa.

Para um resistor, $\varphi = 0$, portanto o $\cos(0) = 1$ e o $\operatorname{sen}(0) = 0$.

Isto quer dizer que o Resistor absorve potência real ($P > 0$), porém não absorve potência reativa ($Q = 0$).

Relações de Potência

Para uma carga conectada em estrela ou delta, a potência real e a potência reativa por fase será:

$$P_f = V_f I_f \cos\theta$$
$$Q_f = V_f I_f \sin\theta$$

Onde $\boldsymbol{\theta}$ é o ângulo da tensão de fase e da corrente de linha:
Para um sistema conectado em estrela: $I_f = I_L$ e $V_f = \frac{V_L}{\sqrt{3}}$ e para um sistema conectado em delta: $I_f = \frac{I_L}{\sqrt{3}}$ e $V_f = V_L$.

$$P_f = \frac{V_L I_L}{\sqrt{3}} \cos\theta$$

$$Q_f = \frac{V_L I_L}{\sqrt{3}} \sin\theta$$

Relações de Potência

As potências reais e reativas totais para todas as fases serão:

$$P_T = 3P_f = \sqrt{3} \cdot V_L I_L \cos\theta$$
$$Q_T = 3Q_f = \sqrt{3} \cdot V_L I_L \sin\theta$$

E portanto, a intensidade da potência complexa (aparente) será:

$$S_T = \sqrt{(P_T)^2 + (Q_T)^2} = \sqrt{3} \cdot V_L I_L$$

Fator de Potência

INSTITUTO FEDERAL
Sul-rio-grandense
Campus Passo Fundo

Causas do Baixo FP:

- Motores de indução trabalhando à vazio;
- Motores superdimensionados para o fim a que se destinam;
- Transformadores trabalhando a vazio ou com pouca carga;
- Reatores de baixo fator de potência no sistema de iluminação;
- Fornos de indução ou a arco;
- Máquinas de tratamento térmico;
- Máquinas de solda;

Consequências do baixo FP:

Perdas de energia elétrica ocorrem em forma de calor: $\boldsymbol{P = R.I^2}$

Como $\boldsymbol{I}$ cresce com o aumento de reativo → Aquecimento dos condutores elétricos → riscos para a instalação;

Consequências do baixo FP:

O incremento da corrente leva a quedas de tensão acentuadas, que podem ocasionar:

- Interrupção do fornecimento de energia;
- Sobrecarga em elementos da rede nos horários de pico;
- Diminuição no rendimento de sistema de iluminação;
- Aumento da corrente em motores:

$$P = VI \ \rightarrow P = cte = \downarrow V \ \rightarrow \uparrow I$$

Consequências do baixo FP:

Excesso de reativo implica em:

- Sobrecarga da instalação ($\boldsymbol{I}$ elevada);
- Inviabiliza a plena utilização (Ideal $\mathbf{S} = \mathbf{P}$);
- Aumento da capacidade dos componentes da instalação (transformadores, condutores, equipamentos de proteção e manobra), visto que os mesmos devem suportar a carga total instalada ($\mathbf{S}$).

Correção do Fator de Potência

INSTITUTO FEDERAL
Sul-rio-grandense
Campus
Passo Fundo

Vantagens da correção do FP:

- Redução significativa do custo de energia elétrica;
- Aumento da eficiência energética da empresa;
- Melhoria da tensão (inclusão de capacitores);
- Aumento da capacidade dos equipamentos de manobra;
- Aumento da vida útil das instalações e equipamentos;
- Redução do efeito Joule;
- Redução da corrente reativa na rede elétrica.

Correção do FP:

1. Lado de Alta Tensão (Visto pela Concessionária):
   - Inviabilidade econômica de instalar banco de capacitores automáticos;
   - Maior probabilidade da instalação se tornar capacitiva (capacitores fixos);
   - Aumento de tensão do lado da concessionaria;
   - Aumento da capacidade de curto-circuito na rede da concessionaria;
   - Maior investimento em cabos e equipamentos de Baixa Tensão;
   - Manutenção mais difícil;

Correção do FP:

2. Lado de Baixa Tensão (Geral):

- Permite uma correção bastante significativa, normalmente com bancos automáticos de capacitores.
- Utiliza-se este tipo de correção em instalações elétricas com elevado número de cargas com potencias diferentes e regimes de utilização poucos uniformes.
- A principal desvantagem consiste em não haver alivio sensível dos alimentadores de cada equipamento.

Correção do FP:

3. Por Grupos de Cargas:

- O capacitor é instalado de forma a corrigir um setor ou um conjunto de pequenas máquinas ($< \mathbf{10}\ \boldsymbol{CV}$);
- Instalado junto ao quadro de distribuição que alimenta esses equipamentos;
- Tem como desvantagem não diminuir a corrente nos circuitos de alimentação de cada equipamento.

Correção do FP:

4. Por Carga (Individual):

- Instalação dos capacitores junto ao equipamento que se pretende corrigir o fator de potência;
- Do ponto de vista técnico, é a melhor solução, apresentando as seguintes vantagens:

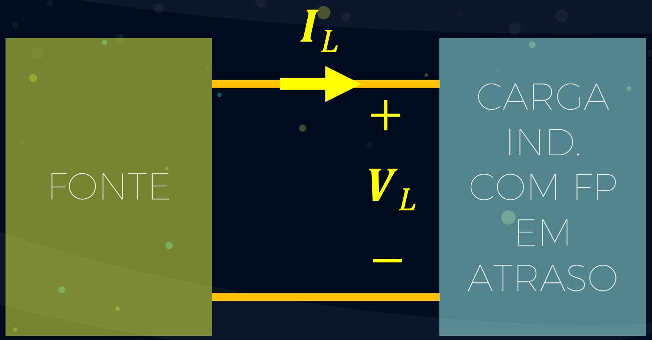
 Reduz as perdas energéticas em toda a instalação;

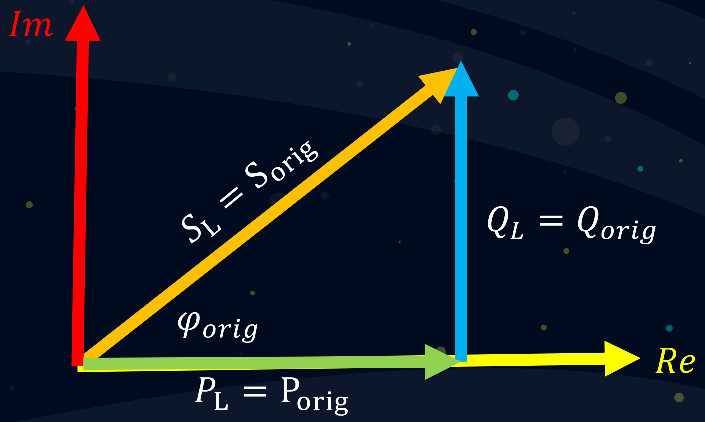
 Diminui a carga nos circuitos de alimentação dos equipamentos;

 Pode-se utilizar em sistema único de acionamento para a carga e o capacitor, economizando-se um equipamento de manobra;

 Gera potência reativa somente onde e necessário.

Correção do Fator de Potência:





Uma carga industrial com FP em atraso é alimentada por uma fonte elétrica. Para melhorar o FP precisa-se reduzir o ângulo do triângulo de potências. Sabe-se que a tangente do ângulo é a razão entre $\boldsymbol{Q}$ e $\boldsymbol{P}$.

Uma forma de reduzir o ângulo seria aumentando $\boldsymbol{P}$, porém esta não seria uma solução viável, tendo em vista que se aumenta a potência ativa (real), também aumentariam os custos mensais com consumo.

A outra opção para reduzir o ângulo é diminuir a potência reativa $\boldsymbol{Q}$. Isto pode ser possível, pois o capacitor opera como uma fonte de potência reativa e não absorve potência real.

Exemplo:

Um motor monofásico de 220V/60Hz consome 2,4kW com um FP = 0,6 (indutivo). Determine:

a) Potência Aparente do motor;
b) corrente I;
c) Defasagem angular na linha de alimentação;
d) Determine o Capacitor C que corrige o FP da instalação para 0,9;
e) Qual é a nova Potência Aparente da instalação?
f) Qual é a nova corrente na linha após a correção do FP?

Exemplo:

A

$$\cos\varphi = \frac{P}{S}$$

$$S = \frac{P}{\cos\varphi} = \frac{2{,}4kW}{0{,}6} = 4kVA$$

B

$$S = V_{RMS} \cdot I_{RMS}$$

$$I_{RMS} = \frac{S}{V_{RMS}} = \frac{4kVA}{220V} = 18{,}1\ A$$

C

$$\cos\varphi = FP = 0{,}6$$

$$\varphi = \cos^{-1}(0{,}6)$$

$$\varphi = 53{,}13°$$

Exemplo:

$$\omega = 2\pi f = 2\pi 60 = 377\,\frac{rad}{s}$$

$$\varphi_1 = 53{,}12°$$

$$\cos\varphi_2 = 0{,}9$$

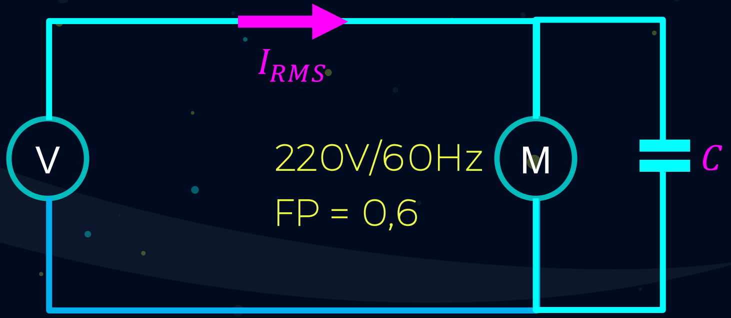
$$\varphi_2 = \cos^{-1}(0{,}9) = 25{,}84°$$

D $$C = \frac{P}{\omega(V)^2}\cdot[\tan(\varphi_1) - \tan(\varphi_2)] \rightarrow C = \frac{2{,}4kW}{377\frac{rad}{s}(220)^2}\cdot[\tan(53{,}13) - \tan(25{,}84)]$$

$$C = \frac{2{,}4kW}{18.246.800}\cdot[1{,}33 - 0{,}48] \rightarrow C = \frac{2{,}4kW}{18.246.800}\cdot[0{,}85] \rightarrow C = 1{,}3153{\times}10^{-4}\cdot[0{,}85]$$

$$\boldsymbol{C = 1{,}118{\times}10^{-4}\,F \rightarrow 111{,}8{\times}10^{-6} \rightarrow 111{,}8\,\mu F}$$

Exemplo:



E

$$\cos\varphi = \frac{P}{S}$$

$$S = \frac{P}{\cos\varphi} = \frac{2{,}4kW}{0{,}9} = 2{,}67kVA$$

F

$$S = V_{RMS} \cdot I_{RMS}$$

$$I_{RMS} = \frac{S}{V_{RMS}} = \frac{2{,}67kVA}{220V} = 12{,}1\ A$$

Dúvidas?

raulsales@.ifsul.edu.br