

CIRCUITOS ELÉTRICOS EM CA

OBJETIVOS

Objetivo Geral

Alcançar a aprendizagem fundamental sobre circuito elétrico em regime de corrente alternada.

Objetivos específicos

Definir circuito elétrico em regime de corrente alternada.

Realizar cálculos de circuitos em corrente alternada.

Aplicar soluções na resolução de problemas de circuitos elétricos em corrente alternada.

PROBLEMA DESAFIO (Aprendizagem Baseada em Projeto)

Um motor de 5 HP possui um fator de potência atrasado de 0,6 e um rendimento de 92%. Considerando que o motor será alimentado com 220V e 60Hz, calcule as potências: ativa, reativa e aparente.

$$FP = \frac{kW}{kVA} = \cos\varphi = \frac{kWh}{\sqrt{kWh^2 + \sqrt{kVArh^2}}} = \cos\left(\arctan\frac{kVAr}{kW}\right)$$

$$1\text{HP}=746\text{W}$$

$$P_o=5\text{HP}$$

$$P_o=5 \times 746=3730\text{W}$$

P_o =Potência ativa de saída

$$\theta = \arccos(FP) = \arccos(0,6) = 53,13^\circ$$

$$P_i=P_o/\eta=3730/0,92=4054,35\text{W}$$

θ = ângulo theta = ângulo de defasagem

$$P_i=P_o/\eta=3730/0,92=4054,35\text{W}$$

θ = ângulo theta = ângulo de defasagem

P_i =Potência ativa de entrada

$FP=\cos\theta$ Fator de Potência

η =rendimento

$$S_i=P_i/\cos\theta$$

Q_L =Potência reativa de entrada

X_c = Reatância capacitiva

C= capacitor

$$S_i = 4054,35 / 0,6 = 6757,25 \text{ VA}$$

$$Q_L = S_i \times \sin \theta = 6757,25 \times \sin (53,13^\circ) = 5405,8 \text{ Var}$$

$$Q_L = Q_c = 5405,8 \text{ Var}$$

$$X_c = \frac{V^2}{Q_c} = \frac{220^2}{5405,8} = 9 \Omega$$

$$C = \frac{1}{2\pi f X_c} = \frac{1}{2\pi \cdot 60 \cdot 9} = \mathbf{294,7 \mu F}$$

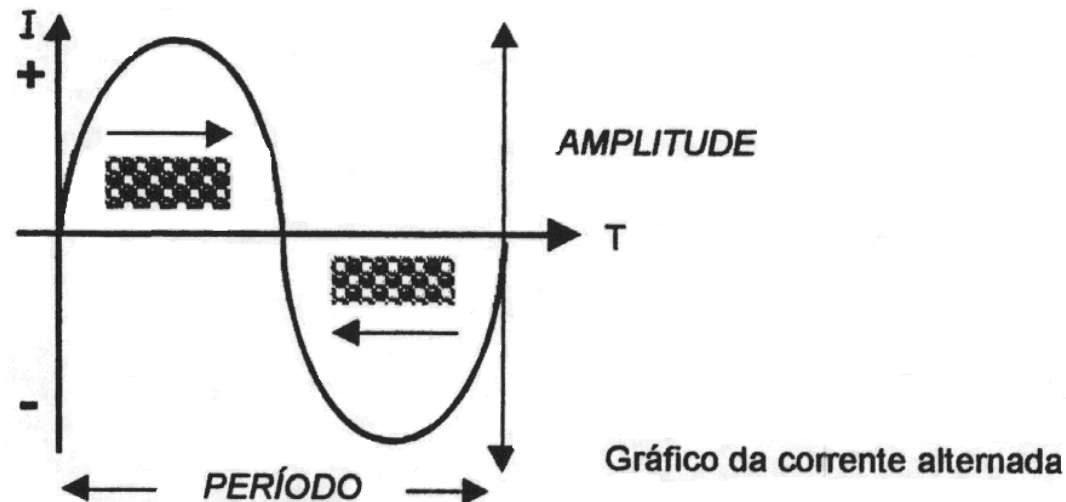
O valor do capacitor achado é o valor exato de capacitância necessário para corrigir o fator de potência, porém, já existem valores definidos de capacitância para capacitores comerciais. O ideal é que se escolha um capacitor com valor superior mais próximo ao valor de capacitância necessário!

Entre os capacitores comerciais de 220 μ F e 330 μ F, o ideal seria usar o capacitor de **330 μ F** para a aplicação no exemplo acima, pois ele possui o valor superior mais próximo do valor calculado.

CIRCUITOS ELÉTRICOS EM CA

CA ocorre quando a corrente elétrica apresenta uma variação de sentido no tempo (período).

Esta variação denominaremos de ciclo completo da corrente alternada, composto por dois semi-ciclos (semi-ciclo positivo e semi-ciclo negativo).



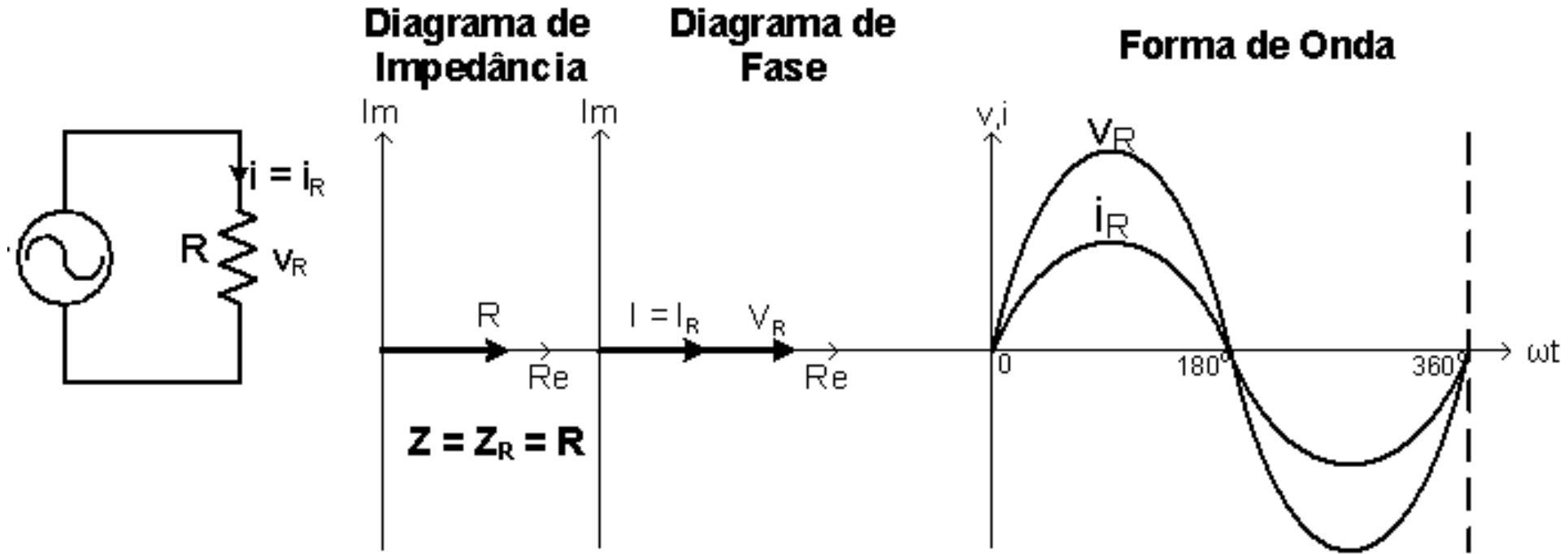
Desvio de Fase

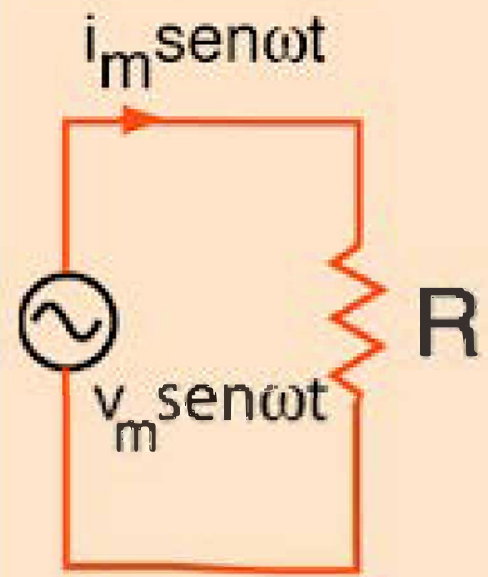
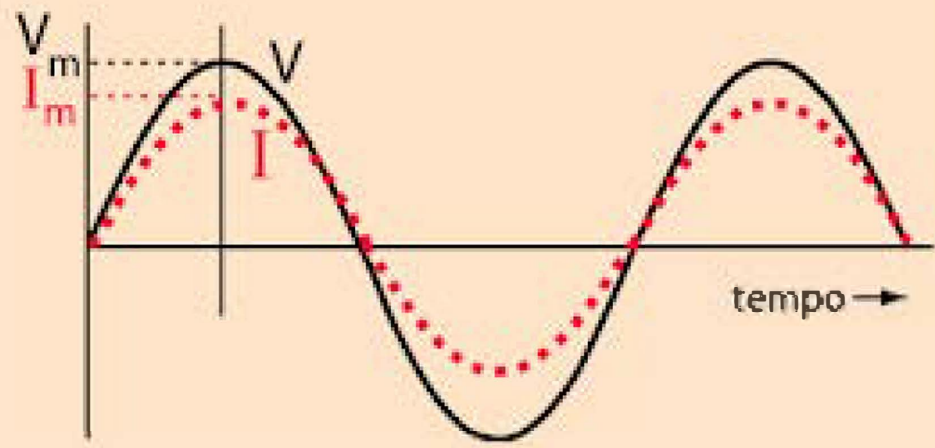
É a diferença temporal existente nos componentes Reativos, Tensão e Corrente quando não atingem, ao mesmo tempo, os mesmos níveis de amplitude.

Um circuito que somente contenha Resistências é designado por Circuito Resistivo.

Não há Desvio de Fase entre a Tensão e a Corrente num Circuito Resistivo, $\Phi = 0^\circ$. A Corrente está “Em Fase” com a Tensão.

Não há Desvio de Fase entre a Tensão e a Corrente num Circuito Resistivo, $\Phi = 0^\circ$. A Corrente está “Em Fase” com a Tensão.

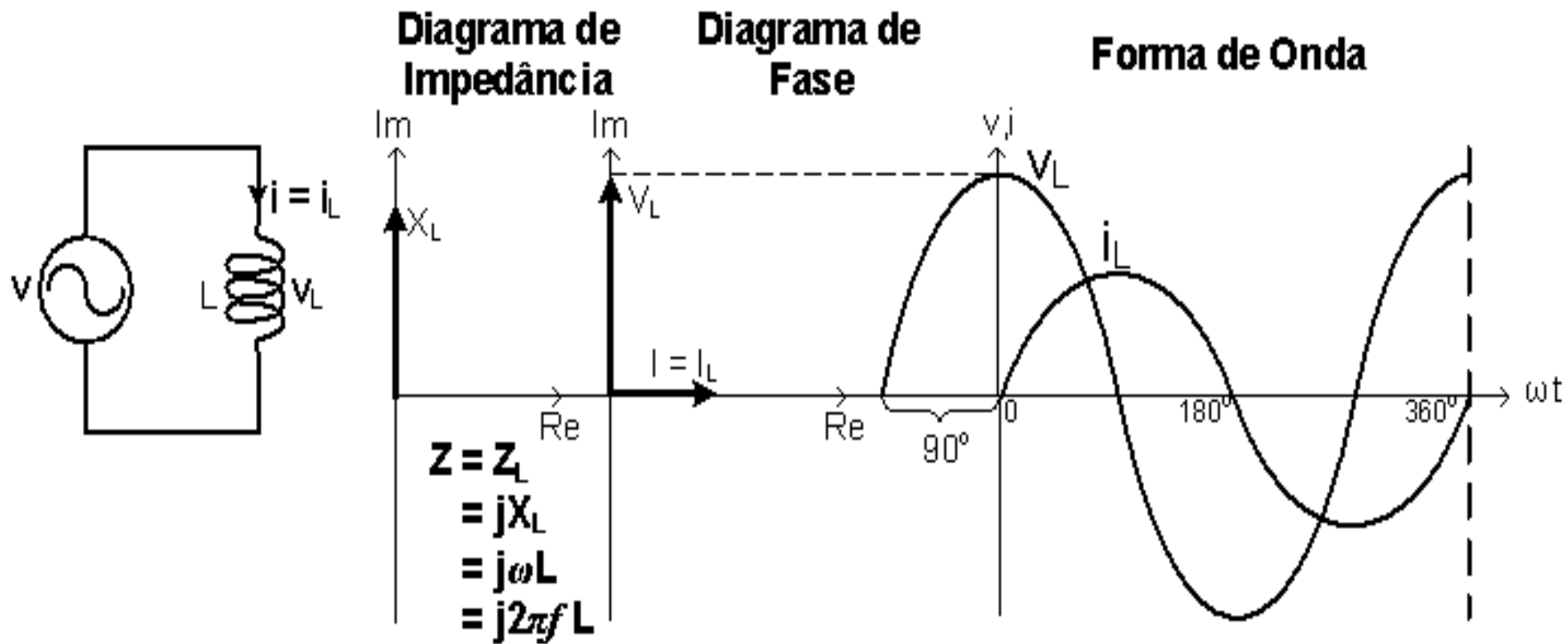




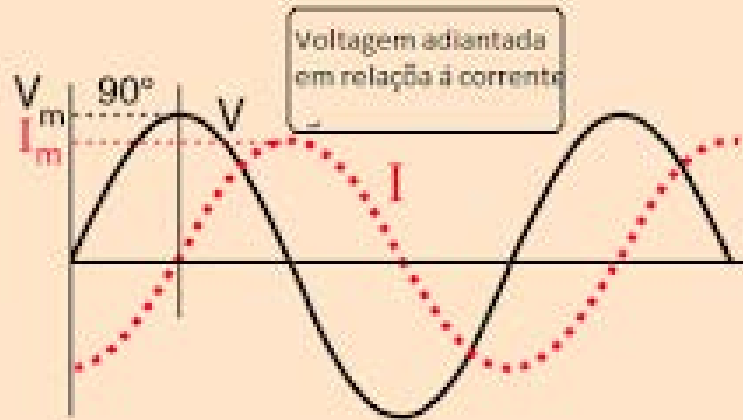
Impedancia	Diagrama de Fase
$I = \frac{V}{R}$ $Z = R$	

$$I = \frac{I_m}{\sqrt{2}}, \quad V = \frac{V_m}{\sqrt{2}}$$

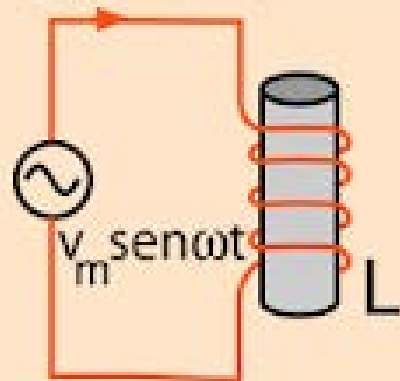
Num indutor, a Tensão está adiantada de 90° em relação à Corrente, $\Phi = 90^\circ$.



Impedância
$I = \frac{V}{X_L}$
$X_L = \omega L$



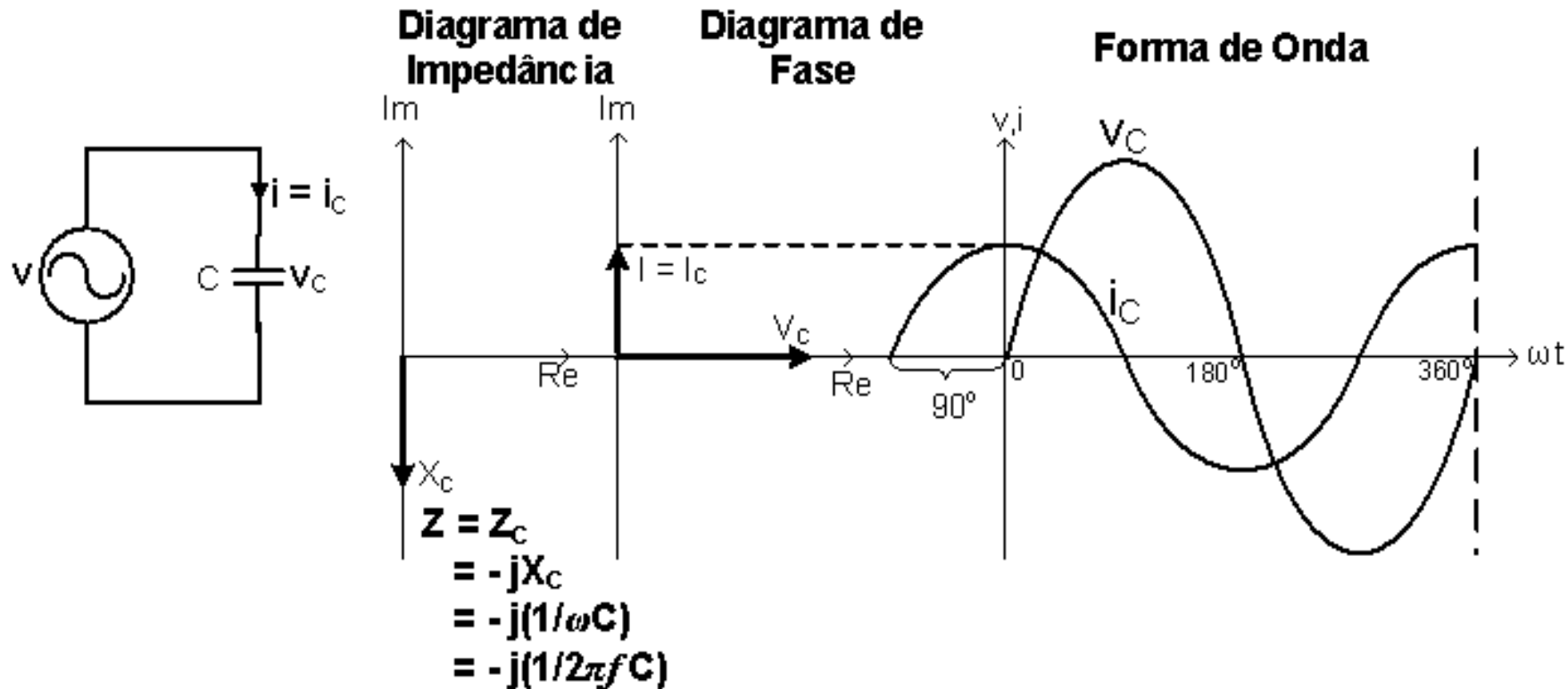
$$i_m \text{sen}(\omega t - 90^\circ)$$



$$I = \frac{I_m}{\sqrt{2}}, \quad V = \frac{V_m}{\sqrt{2}}$$

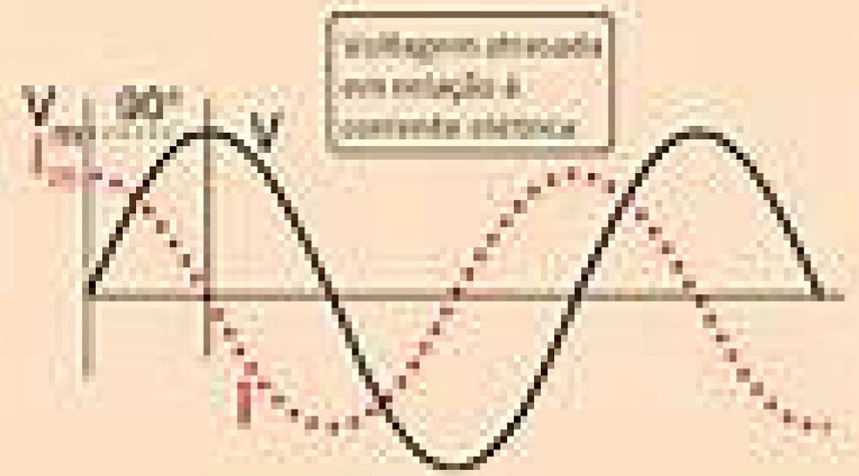
Impedância	Diagrama de Fase
$j\omega L$	

Num capacitor, a Tensão está atrasada de 90° em relação à Corrente, $\Phi = -90^\circ$.

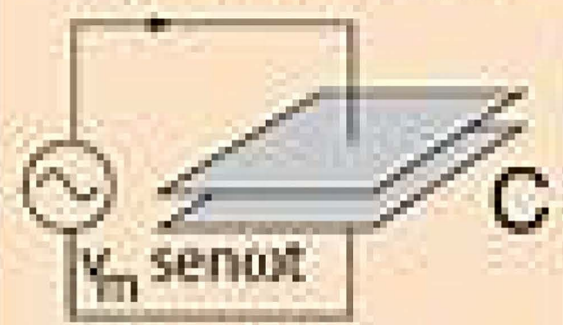


Impedância

$$Z = \frac{V}{I}$$

$$Z_C = \frac{V}{I}$$


$$i_m \text{sen}(\omega t + 90^\circ)$$



Impedância Complexa	Diagrama de Fase
$\frac{j}{\omega C}$	

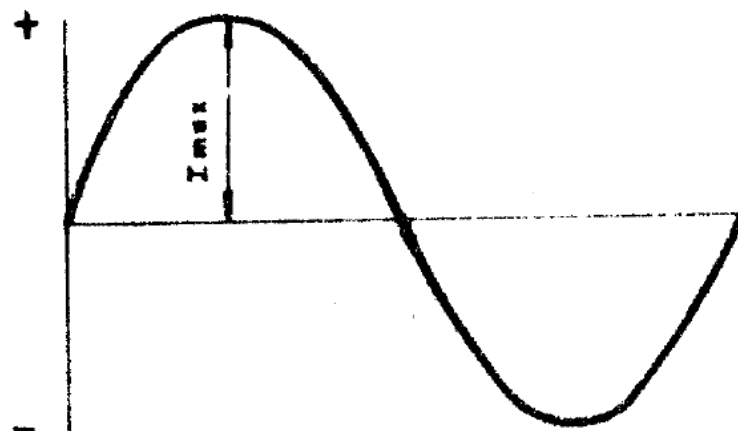
$$I = \frac{I_m}{\sqrt{2}} \quad V = \frac{V_m}{\sqrt{2}}$$

Valor Instantâneo de uma CA

É o valor da corrente possível de ser determinado matematicamente, num dado instante de tempo

Valor Máximo ou valor de pico

É o valor instantâneo que corresponde à máxima amplitude da corrente.



Valor de pico a pico

É o valor da corrente que corresponde a duas vezes o valor de pico.

$$V_{pp} = 2 \times V_{m\acute{a}x}$$

Valor Eficaz

É o valor de uma corrente alternada que produz um efeito calorífico equivalente ao de uma corrente contínua.

$$I_{ef} = \frac{I_{m\ a\ x}}{\sqrt{2}} = 0,707 I_{m\ a\ x}$$

Valor Médio

É o cociente entre a área e o tempo, considerando a área contida entre a forma de onda correspondente e o eixo do tempo, num intervalo de tempo igual a um período.

Seu valor médio num semi-ciclo positivo pode ser calculado pela expressão:

$$\frac{2}{\pi} V_{pico} = 0.637 \times V_{pico}$$

Circuitos RLC

Resistência em Corrente Alternada

Resistores

Os resistores atuam sobre a corrente alternada praticamente do mesmo modo que sobre a contínua. A resistência é dada por:

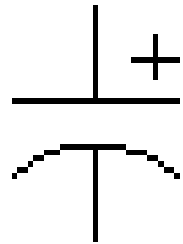
$$R = \rho \frac{L}{S}$$

Capacitância

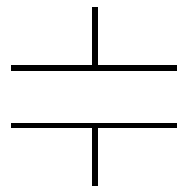
É a grandeza elétrica de um capacitor, determinada pela quantidade de energia elétrica que pode armazenar através de uma tensão e a quantidade de corrente alternada que o atravessa numa determinada frequência.

Capacitância

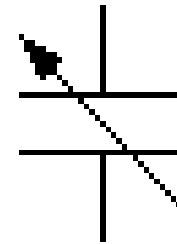
A capacitância é representada pelo símbolo C , e sua unidade é o Farad (F).



Eletrolítico



Fixo



Variável

Reatância Capacitiva

Um capacitor, quando percorrido por uma corrente elétrica alternada oferece uma oposição à passagem da mesma, imposta por um campo elétrico, denominada reatância capacitiva. Essa reatância capacitiva é inversamente proporcional a frequência da corrente.

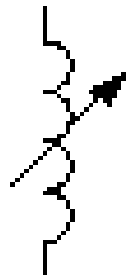
$$X_C = \frac{1}{2\pi f C}$$

Indutância

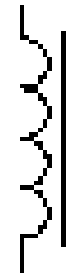
É a capacidade de uma bobina em criar o fluxo com determinada corrente que a percorre causando uma oposição à variação de corrente



Núcleo de Ar



Variável



Núcleo de Ferro

É representada pelo símbolo L , e sua unidade é o Henry (H).

Reatância Indutiva

É uma medida da oposição que um indutor apresenta para uma corrente senoidal.
Matematicamente,

$$X_L = 2\pi fL$$

IMPEDÂNCIA

$$\mathbf{V} = R\mathbf{I}, \mathbf{V} = j\omega L\mathbf{I}, \mathbf{V} = \frac{\mathbf{I}}{j\omega C}$$

Lei de Ohm na forma fasorial

$$\frac{\mathbf{V}}{\mathbf{I}} = R, \frac{\mathbf{V}}{\mathbf{I}} = j\omega L, \frac{\mathbf{V}}{\mathbf{I}} = \frac{1}{j\omega C}$$

$$\begin{cases} \mathbf{Z} = \frac{\mathbf{V}}{\mathbf{I}} \\ \mathbf{V} = \mathbf{Z}\mathbf{I} \end{cases}$$

Z é um valor que depende da frequência sendo chamado de **impedância**, cuja unidade é Ohms (Ω).

IMPEDÂNCIAS DE RESISTORES, INDUTORES E CAPACITORES

<u>Elemento</u>	<u>Impedância</u>
R	$Z_R=R$
L	$Z_L=j\omega L$
C	$Z_C=1/j\omega C$

Relação entre elementos e sua impedância.

Podemos observar na tabela que a impedância do indutor e do capacitor são, respectivamente,

$$Z_L=j\omega L \text{ e } Z_C=1/j\omega C$$

Ao considerar dois casos extremos de frequência angular, teremos:

$$\omega = 0 \Rightarrow \begin{cases} Z_L = 0 \\ Z_C \rightarrow \infty \end{cases}$$

$\omega=0$ significa um circuito com fontes CC. O indutor atua como um curto-circuito, já o capacitor opera como um circuito aberto.

$$\omega = \infty \Rightarrow \begin{cases} \mathbf{Z}_L \rightarrow \infty \\ \mathbf{Z}_c = 0 \end{cases}$$

Onde, $\omega = \infty$ significa um circuito com alta frequência. Nesse caso temos que, em alta frequência, o indutor é um circuito aberto e o capacitor é um curto-circuito.

Por ser um valor complexo, a impedância pode ser expressa na forma retangular:

$$\mathbf{Z} = R + jX$$

Em que R é a **resistância** e a parte real de Z , enquanto que X é a **reatância** e a parte imaginária de Z . A reatância pode ser positiva ou negativa, se for positiva chamamos a impedância de **indutiva**, se for negativa chamamos de **capacitiva**.

O FATOR DETERMINANTE PARA SER DO TIPO INDUTIVA OU CAPACITIVA

É a frequência aplicada. Isso acontece, pois em **frequências baixas**, os elementos capacitivos (de maneira geral) fornecem a maior contribuição para a impedância total, já em **frequências altas**, os elementos indutivos são os responsáveis pela maior contribuição para a impedância total.

A impedância também pode ser escrita na forma polar:

$$\mathbf{Z} = |\mathbf{Z}| \angle \theta$$

A impedância:

- É uma quantidade que representa a oposição do circuito ao fluxo de corrente senoidal;
- Por mais que seja a razão entre dois fasores, a impedância não é um fasor. Isso porque não corresponde a um valor que se comporta como uma senóide (que varia com o tempo), mas com uma grandeza fixa.

Admitância

Em algumas situações é mais conveniente trabalhar com a admitância.

A admitância é o inverso da impedância e é medida em Siemens (S).

A admitância **Y** de um circuito é a razão entre a corrente fasorial e a tensão fasorial do circuito.

$$\mathbf{Y} = \frac{1}{\mathbf{Z}} = \frac{\mathbf{I}}{\mathbf{V}}$$

As admitâncias de resistores, indutores e capacitores

<u>Elemento</u>	<u>Admitância</u>
R	$Y=1/R$
L	$Y=1/j\omega L$
C	$Y=j\omega C$

Relação entre elementos e sua admitância.

Por ser um valor complexo, a admitância pode ser expressa na forma retangular:

$$\mathbf{Y} = G + jB$$

G é a **condutância** e a parte real de **Y** e B é a **susceptância** e parte imaginária de **Y**. Tanto admitância, condutância e susceptância são expressas na unidade Siemens (ou mhos).

Para determinar o valor da condutância e susceptância, consideramos:

$$\mathbf{Y} = G + jB = \frac{1}{R + jX}$$

Racionalizando a parte imaginária:

$$G + jB = \frac{1}{R + jX} \cdot \frac{R - jX}{R - jX} = \frac{R - jX}{R^2 + X^2}$$

Separando a parte real da imaginária, temos:

$$G = \frac{R}{R^2 + X^2} \text{ e } B = -\frac{X}{R^2 + X^2}$$

Dessa forma, observamos que $G=1/R$ somente se $X=0$.

Em resumo a **impedância** e **admitância** dos elementos passivos de circuitos são os mostrados

<u>Elemento</u>	<u>Impedância</u>	<u>Admitância</u>
R	$Z=R$	$Y=1/R$
L	$Z=j\omega L$	$Y=1/j\omega L$
C	$Z=1/j\omega C$	$Y=j\omega C$

Lei de Ohm para Circuitos CA

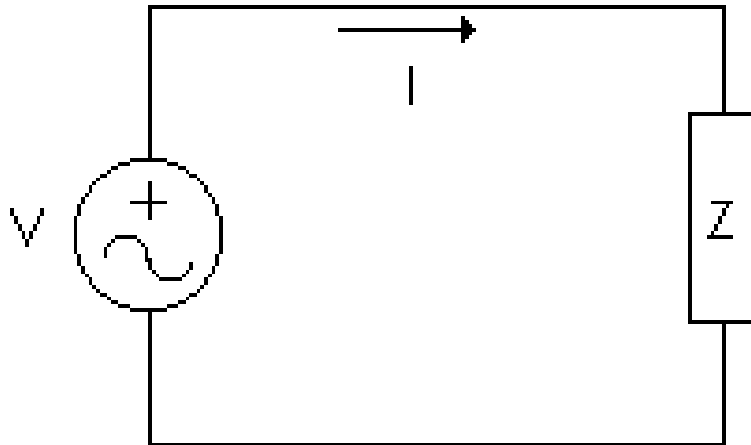
Impedância do circuito

É encontrada, onde o circuito de oposição à passagem de corrente é uma combinação de resistências (R), indutâncias (L) e capacitâncias (C)

É representada pelo símbolo Z , é medida em ohms e tem amplitude e direção.

Impedância do circuito

Aplicando a Lei de Ohm para um circuito com uma impedância



$$\Rightarrow I = \frac{E}{Z}$$

$$\Rightarrow E = Z \cdot I$$

$$\Rightarrow Z = \frac{E}{I}$$

Impedância do circuito

Algumas das maneiras de representar uma Impedância

➤ Forma Retangular

$$Z = R + jX$$

➤ Forma Polar

$$Z = |Z| \angle \theta$$

Impedância do circuito

Onde:

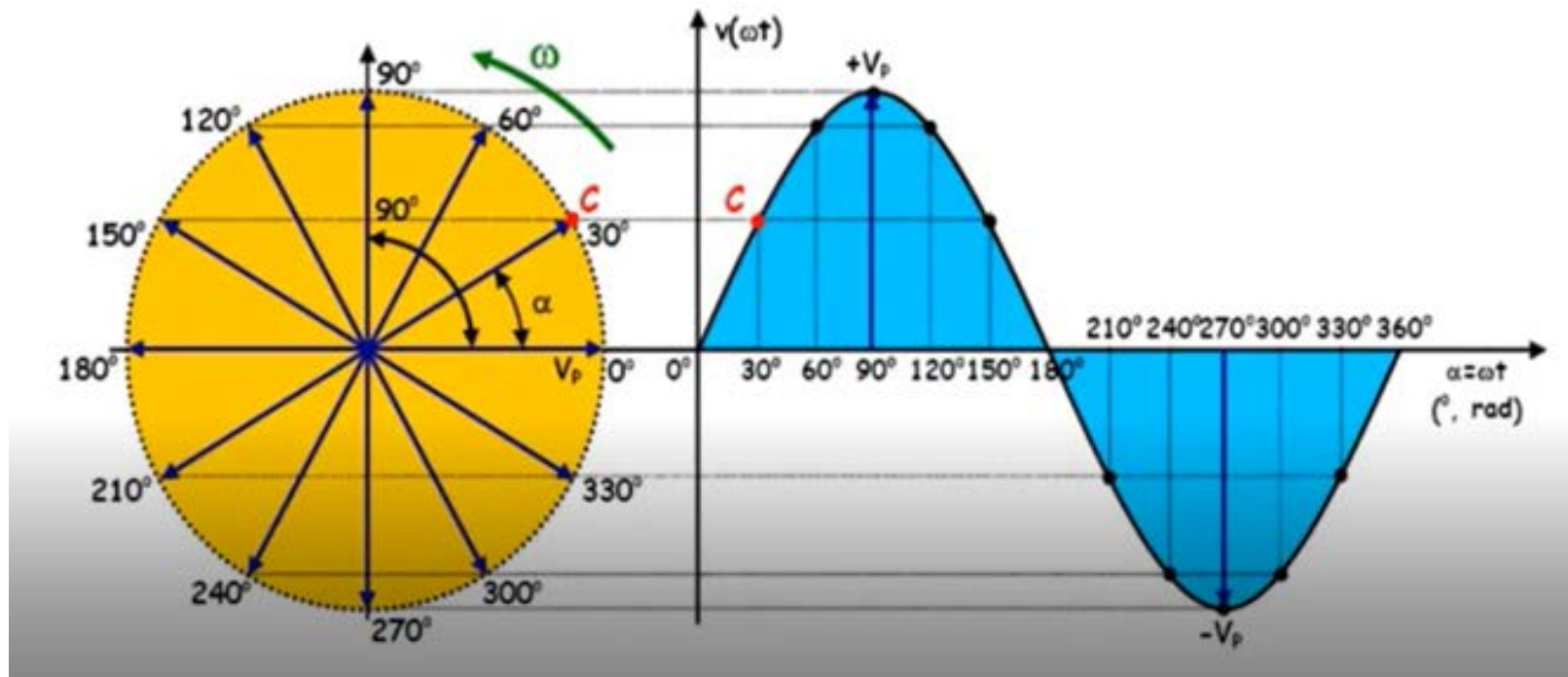
$|Z|$: é o módulo da impedância, dado por $|Z| = \sqrt{R^2 + X^2}$

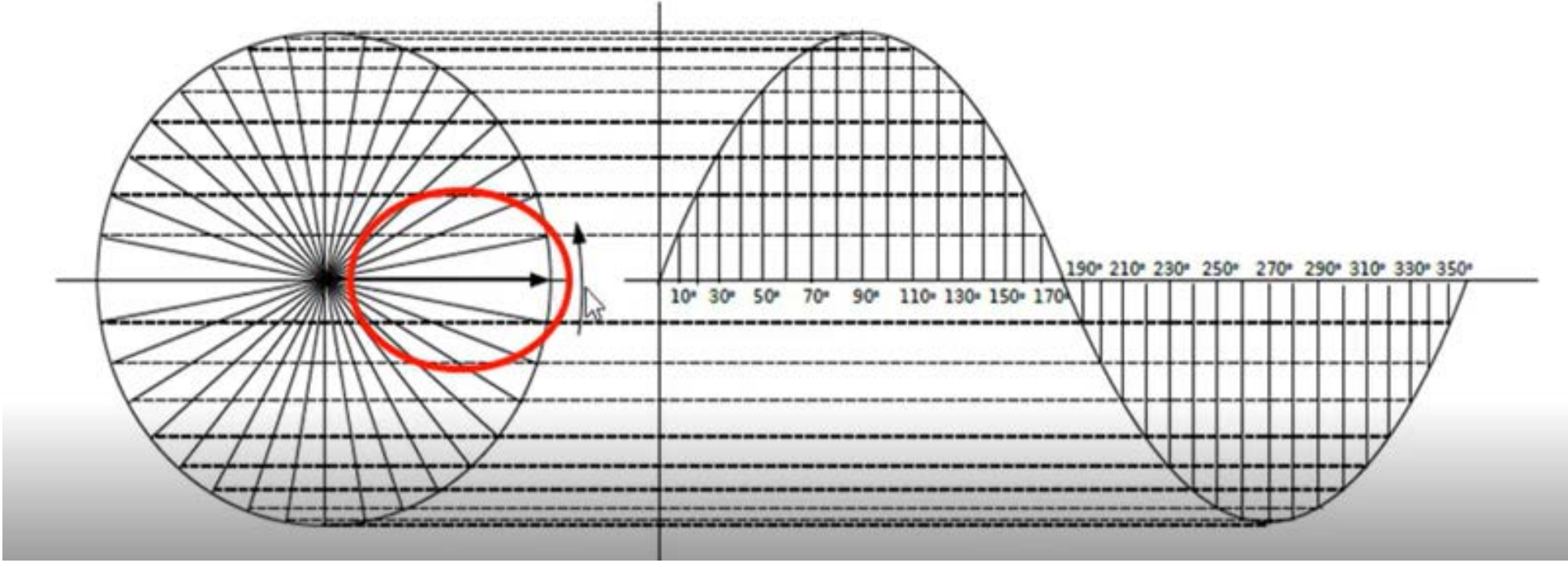
θ : é a fase da impedância, dado por $\theta = \tan^{-1} \frac{X}{R}$

Defasagem entre Corrente e Tensão

Os valores instantâneos da corrente, ou da tensão, durante um ciclo, podem ser representados pelas projeções do raio de um círculo, em suas diversas posições.

Um movimento harmônico giratório pode ser descrito por uma senóide e vice-versa.





IMPEDÂNCIA

$$\mathbf{V} = R\mathbf{I}, \mathbf{V} = j\omega L\mathbf{I}, \mathbf{V} = \frac{\mathbf{I}}{j\omega C}$$

Lei de Ohm na forma fasorial

$$\frac{\mathbf{V}}{\mathbf{I}} = R, \frac{\mathbf{V}}{\mathbf{I}} = j\omega L, \frac{\mathbf{V}}{\mathbf{I}} = \frac{1}{j\omega C}$$

$$\begin{cases} \mathbf{Z} = \frac{\mathbf{V}}{\mathbf{I}} \\ \mathbf{V} = \mathbf{Z}\mathbf{I} \end{cases}$$

Z é um valor que depende da frequência sendo chamado de **impedância**, cuja unidade é Ohms (Ω).

IMPEDÂNCIAS DE RESISTORES, INDUTORES E CAPACITORES

<u>Elemento</u>	<u>Impedância</u>
R	$Z_R=R$
L	$Z_L=j\omega L$
C	$Z_C=1/j\omega C$

Relação entre elementos e sua impedância.

Podemos observar na tabela que a impedância do indutor e do capacitor são, respectivamente,

$$Z_L=j\omega L \text{ e } Z_C=1/j\omega C$$

Ao considerar dois casos extremos de frequência angular, teremos:

$$\omega = 0 \Rightarrow \begin{cases} Z_L = 0 \\ Z_C \rightarrow \infty \end{cases}$$

$\omega=0$ significa um circuito com fontes CC. O indutor atua como um curto-circuito, já o capacitor opera como um circuito aberto.

$$\omega = \infty \Rightarrow \begin{cases} \mathbf{Z}_L \rightarrow \infty \\ \mathbf{Z}_c = 0 \end{cases}$$

Onde, $\omega = \infty$ significa um circuito com alta frequência. Nesse caso temos que, em alta frequência, o indutor é um circuito aberto e o capacitor é um curto-circuito.

Por ser um valor complexo, a impedância pode ser expressa na forma retangular:

$$\mathbf{Z} = R + jX$$

Em que R é a **resistância** e a parte real de Z , enquanto que X é a **reatância** e a parte imaginária de Z . A reatância pode ser positiva ou negativa, se for positiva chamamos a impedância de **indutiva**, se for negativa chamamos de **capacitiva**.

O FATOR DETERMINANTE PARA SER DO TIPO INDUTIVA OU CAPACITIVA

É a frequência aplicada. Isso acontece, pois em **frequências baixas**, os elementos capacitivos (de maneira geral) fornecem a maior contribuição para a impedância total, já em **frequências altas**, os elementos indutivos são os responsáveis pela maior contribuição para a impedância total.

A impedância também pode ser escrita na forma polar:

$$\mathbf{Z} = |\mathbf{Z}| \angle \theta$$

A impedância:

- É uma quantidade que representa a oposição do circuito ao fluxo de corrente senoidal;
- Por mais que seja a razão entre dois fasores, a impedância não é um fasor. Isso porque não corresponde a um valor que se comporta como uma senóide (que varia com o tempo), mas com uma grandeza fixa.

Admitância

Em algumas situações é mais conveniente trabalhar com a admitância.

A admitância é o inverso da impedância e é medida em Siemens (S).

A admitância **Y** de um circuito é a razão entre a corrente fasorial e a tensão fasorial do circuito.

$$\mathbf{Y} = \frac{1}{\mathbf{Z}} = \frac{\mathbf{I}}{\mathbf{V}}$$

As admitâncias de resistores, indutores e capacitores

<u>Elemento</u>	<u>Admitância</u>
R	$Y=1/R$
L	$Y=1/j\omega L$
C	$Y=j\omega C$

Relação entre elementos e sua admitância.

Por ser um valor complexo, a admitância pode ser expressa na forma retangular:

$$\mathbf{Y} = G + jB$$

G é a **condutância** e a parte real de **Y** e B é a **susceptância** e parte imaginária de **Y**. Tanto admitância, condutância e susceptância são expressas na unidade Siemens (ou mhos).

Para determinar o valor da condutância e susceptância, consideramos:

$$\mathbf{Y} = G + jB = \frac{1}{R + jX}$$

Racionalizando a parte imaginária:

$$G + jB = \frac{1}{R + jX} \cdot \frac{R - jX}{R - jX} = \frac{R - jX}{R^2 + X^2}$$

Separando a parte real da imaginária, temos:

$$G = \frac{R}{R^2 + X^2} \text{ e } B = -\frac{X}{R^2 + X^2}$$

Dessa forma, observamos que $G=1/R$ somente se $X=0$.

Em resumo a **impedância** e **admitância** dos elementos passivos de circuitos são os mostrados

<u>Elemento</u>	<u>Impedância</u>	<u>Admitância</u>
R	$Z=R$	$Y=1/R$
L	$Z=j\omega L$	$Y=1/j\omega L$
C	$Z=1/j\omega C$	$Y=j\omega C$

Os valores máximos da corrente e da tensão durante um ciclo podem ou não coincidir.

- Quando coincidem diz-se que ambas estão em fase.
- Se não coincidem, estão defasadas

A diferença em graus, entre os instantes em que ocorrem os valores máximos da corrente e da tensão chama-se ângulo de fase (φ).

POTÊNCIA REATIVA

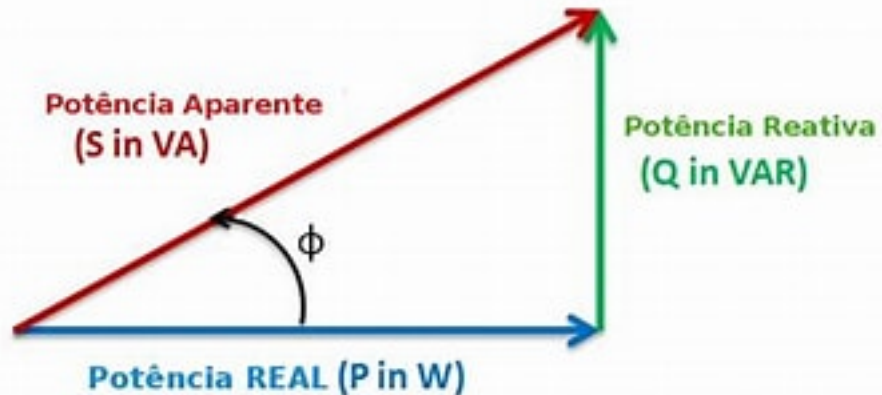
Definição

As potências ativas e reativas possuem uma relação natural entre elas.

A potência reativa depende linearmente da potência ativa através do fator de potência (cosseno do ângulo entre elas).

A potência aparente é representada pela soma fatorial dessas.

O conjunto forma o que se denomina de Triângulo de Potência.



A **potência aparente**, simbolizada por S, do sistema (kVA)

A componente de força horizontal é a que realiza trabalho útil, representando a **potência ativa** (P) do sistema em kW.

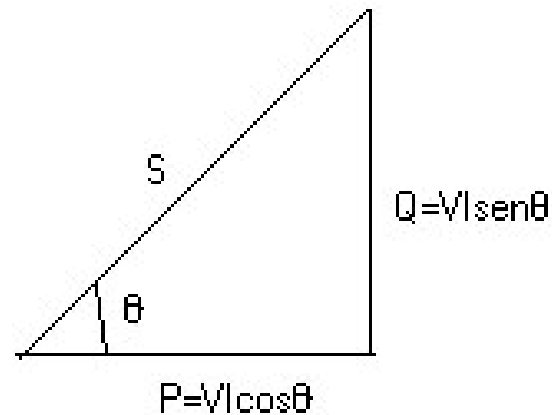
A componente ortogonal não realiza trabalho, representa a **potência reativa** (Q) em kVAR.

A relação entre a potência ativa e a potência aparente é denominada **fator de potência**.

Quanto menor for este ângulo, menor será a componente reativa do sistema, e tanto mais o fator de potência irá se aproximar do valor unitário.

ENERGIA REATIVA EM CIRCUITOS ELÉTRICOS

A ocorrência de energia reativa em circuitos elétricos sobrecarrega as instalações e tanto para a concessionária que entrega energia elétrica ao consumidor como para o próprio consumidor em seus circuitos de distribuição, se faz necessário, melhorar o fator de potencia para utilizar mais potencia ativa.



$$P = VI \cos \theta$$

Onde:

V= tensão (Volt);

I= corrente (Ampére)

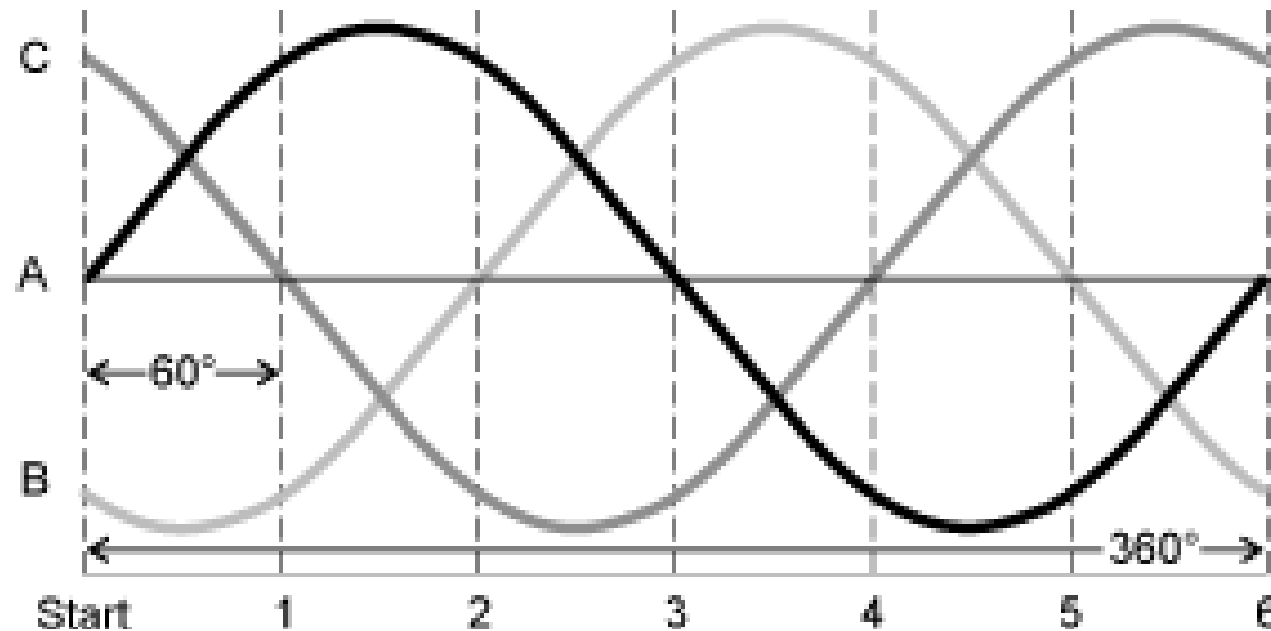
P= potência ativa (Watt)

Q= potência reativa (Volt Ampére reativo)

VI=S=potência aparente ou complexa (Volt Ampére)

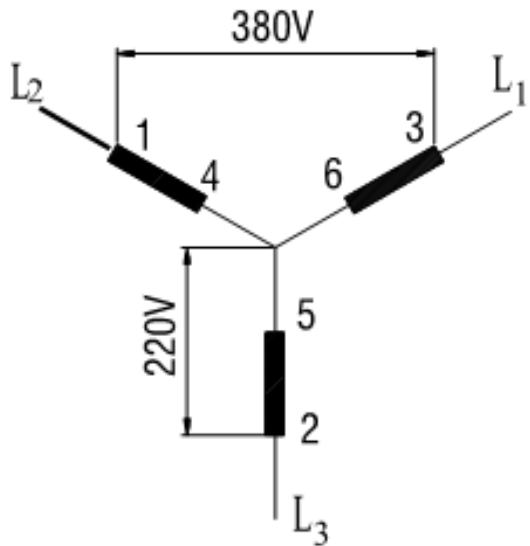
Corrente Alternada e Tensão Trifásica

Uma linha formada por três condutores com as tensões entre um e outro igual, porém defasadas de 120° é definida como Trifásica.



Circuito Estrela ou Y

A corrente que passa pela linha, é a mesma que passa pelos elementos, isto é, à corrente de linhas é igual à corrente de fase ($I_L = I_F$)

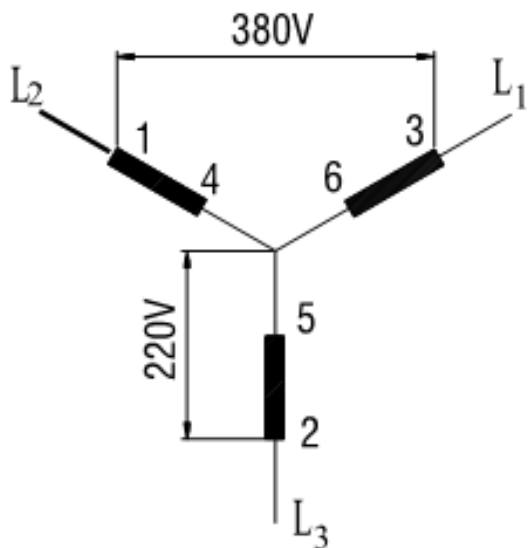


$$I_L = I_F$$

O ponto comum aos três elementos chama-se neutro.

Circuito Estrela ou Y

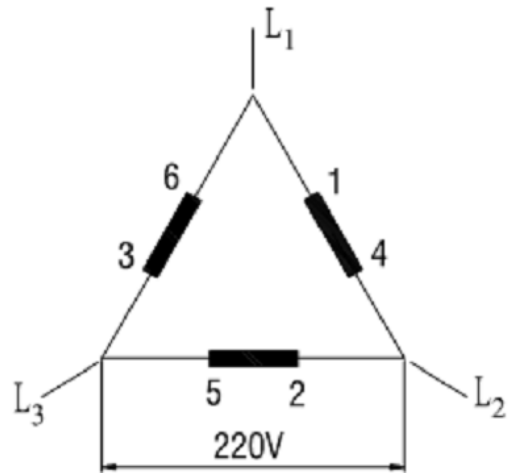
A tensão aplicada a cada elemento (entre condutores de fase e neutro) é chamada tensão de fase e a entre dois condutores de fase tensão de linha.



$$E = E_{\text{Linha}} = E_{\text{Fase}} \sqrt{3}$$

Circuito Triângulo ou Delta

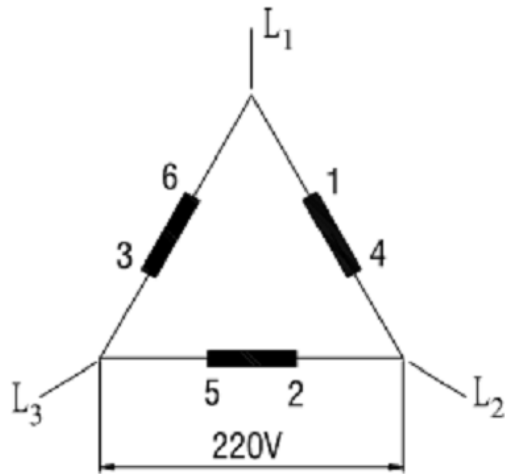
A tensão aplicada a cada bobina é definida como tensão de fase (E_F) e a tensão na entrada medida entre fases tensão de linha (E_L).



$$E_L = E_F$$

Circuito Triângulo ou Delta

A corrente que percorre cada bobina é definida com corrente de fase (I_F) e na entrada corrente de linha (I_L).



$$I = I_F \times \sqrt{3}$$