
3 - Sistemas em Corrente Alternada

Carlos Marcelo Pedroso

10 de abril de 2008

1 Considerações sobre Potência e Energia

A potência fornecida a uma carga à qual está aplicada uma tensão instantânea u e por onde circula uma corrente i pode ser dada por pela fórmula fundamental de potência,

$$P = ui \quad (1)$$

A unidade de potência é o Watt (W).

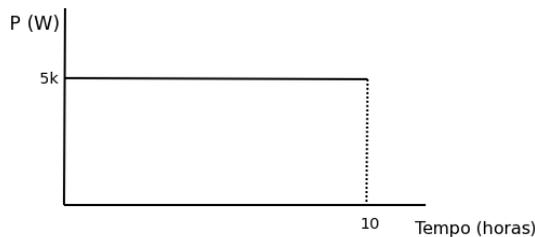


Figura 1: Energia

A energia é a potência dissipada ao longo do tempo, dada pela área abaixo da curva de potência em função do tempo. Para o caso de um sistema onde o consumo de potência é contínuo ao longo do tempo, conforme ilustra a Figura 1, é dada por

$$W = P.t \quad (2)$$

se o tempo considerado for de uma hora, a energia é expressa em Watts x hora. Na prática, utiliza-se normalmente a potência em quilowatts ($kW.h$). Obs, muito cuidado para não confundir a unidade (W-Watt) com o nome da variável utilizada para representar a energia consumida (normalmente W).

Exemplo 1: Em um circuito alimentado por uma tensão de 110 volts, onde a corrente medida é de 10 ampères, considerando o circuito apenas resistivo, qual será a energia consumida em 8 horas? Solução: $W = 110.10.8 = 8,8kW.h$ □

Exemplo 2: Qual a potência consumida por motor elétrico cuja tensão é de 220V e a corrente necessária 20 ampères? Solução: $P = U.I = 220.20 = 4,4kW$ □

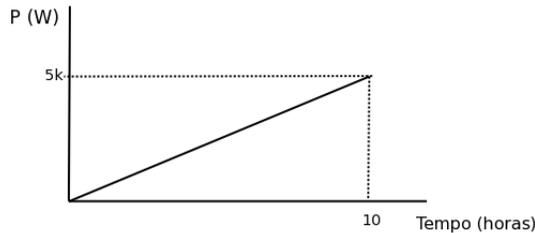


Figura 2: Energia

Exemplo 3: Considere um sistema onde a Potência consumida não é mais constante e sim variável com o tempo, de acordo com a Figura 2. Solução: Neste caso, energia consumida pode ser calculada através da área abaixo da curva simplesmente observando-se a figura geométrica, ou $W = 25kW.h$. No entanto, uma solução alternativa é realizar o cálculo da área através de

$$W = \int_0^{10} \frac{5}{10} t dt = \frac{1}{2} \left[\frac{t^2}{2} \right]_0^{10} = 25kW.h$$

□

2 Corrente Contínua e Alternada

Uma tensão contínua é aquela que não varia ao longo do tempo. Já a tensão alternada é oscilatória e varia sua amplitude em relação ao tempo, segundo uma lei definida (normalmente senoidal).

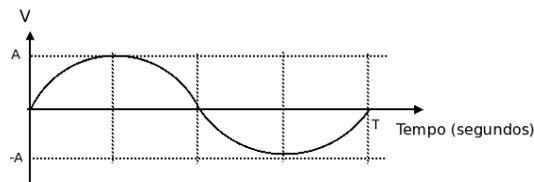


Figura 3: Forma de uma tensão alternada

A Figura 3 mostra o formato de uma tensão alternada. O período T é o tempo necessário à realização de um ciclo, onde ω representa a velocidade angular em radianos por segundos.

$$T = \frac{2\pi}{\omega} \quad (3)$$

A freqüência é dada por

$$f = \frac{1}{T}$$

de onde pode-se concluir que $\omega = 2\pi f$.

A tensão alternada pode ser representada por uma senóide

$$u = U_m \text{sen}(wt) \quad (4)$$

onde

u valor instantâneo de tensão

U_m valor máximo da tensão

w velocidade angular em radianos por segundo

No Brasil o fornecimento de energia elétrica é realizado através de uma tensão alternada em uma freqüência de 60 Hz. Uma curiosidade: as lâmpadas apagam e acendem 120 vezes por segundo? Sim, porém nesta velocidade não é possível perceber porque o filamento não chega a se apagar por completo.

2.1 Circuito Resistivo

Uma fonte de alimentação fornecendo uma tensão senoidal para um circuito puramente resistivo, por exemplo: chuveiros, aquecedores, fornos, etc. Neste caso, a corrente circulando sobre a carga e a tensão estão em fase.

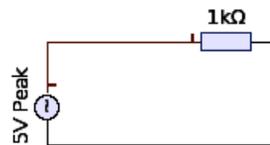


Figura 4: Exemplo

Exemplo 4: A corrente sobre o resistor da Figura 4 é dada por $i = \frac{u}{R} = \frac{U_m}{R} \text{sen}(wt)$, ou, $i = I_m \text{sen}(wt)$. □

Em corrente contínua, a potência é dada sempre pelo produto da tensão pela corrente. No entanto, em corrente alternada pode haver uma defasagem entre tensão e corrente, o que provoca uma variação no cálculo da potência. Em sistemas de corrente alternada puramente resistivos, tensão e corrente estarão sempre em fase e a potência consumida também será dada pelo produto da tensão pela corrente.

2.2 Circuito Capacitivo Puro

Suponha um circuito consistindo em um capacitor alimentado com uma tensão alternada. Neste caso, a capacidade do capacitor em acumular carga produzirá uma defasagem entre a tensão e a corrente observada no circuito. Para o caso do circuito puramente capacitivo, a defasagem entre corrente e tensão será de exatamente 90° (ou $\pi/2$), como pode ser observado na Figura 5. Nesta figura, IC representa a corrente circulando no circuito e V representa a tensão fornecida. Observa-se que a corrente está **avançada** em relação à tensão. A corrente para o circuito pode ser dado por $i = I_m \sin(\omega t)$ (pode ser obtido através da equação de malha no circuito considerando a queda de tensão no capacitor).

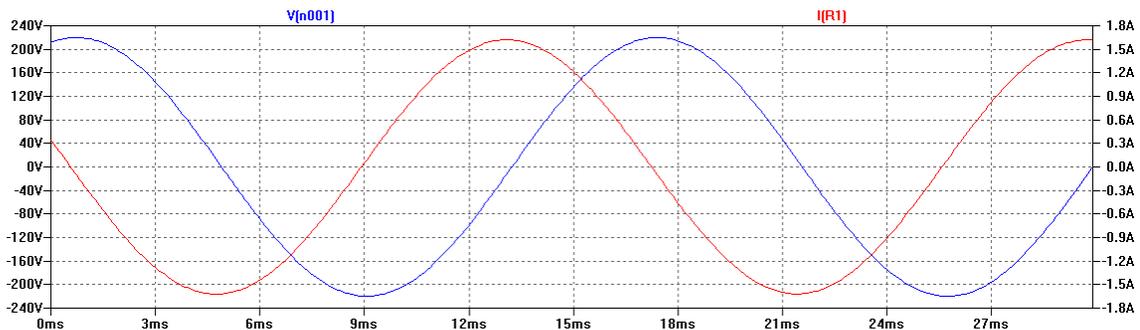


Figura 5: Resposta de um circuito capacitivo puro

Desta forma, um capacitor oferece certa resistência à passagem de corrente alternada e esta resistência é chamada de reatância capacitiva, que pode ser calculada por $X_c = \frac{1}{\omega C}$.

Quando existe uma resistência ôhmica no mesmo circuito onde existe um capacitor, a impedância capacitiva é dada por $Z = \sqrt{R^2 + X_c^2}$.

2.3 Circuito Indutivo Puro

Suponha um circuito consistindo em um indutor alimentado com uma tensão alternada. A corrente observada é função da tensão e da indutância L. A corrente instantânea pode ser dada por $i = I_m \cos(\omega t)$, sendo que a corrente está **atrasada** em relação à tensão, conforme mostrado na Figura 6. A reatância indutiva será dada por $X_L = \omega L$.

A soma vetorial das reatâncias é a impedância Z.

2.4 Circuito RLC em Série

Suponha o circuito RLC em série da Figura 7 operando com corrente alternada de 60Hz, com os seguintes componentes: $R = 8\Omega$, $L = 500mH$, $C = 50\mu F$ e $V = 220V$.

Pode-se calcular

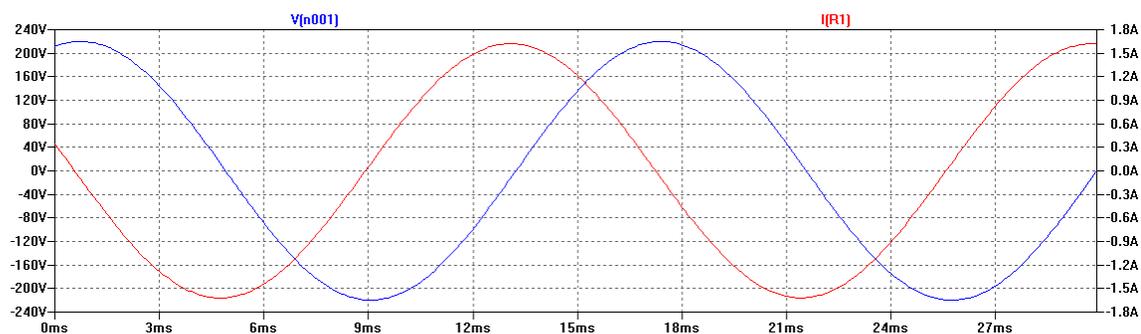


Figura 6: Resposta de um circuito indutivo puro

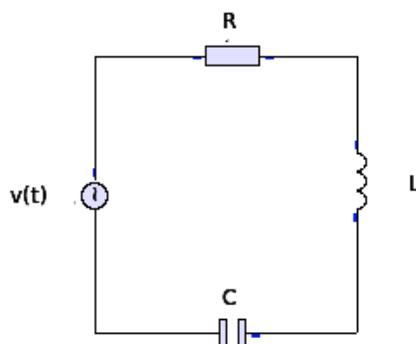


Figura 7: Resposta RC

$$\omega = 2\pi \cdot f = 2\pi \cdot 60 = 377 \text{ rad/s}$$

$$X_L = \omega \cdot L = 377 \cdot 0,5 = 188,5 \Omega$$

$$X_C = \frac{1}{\omega \cdot C} = \frac{1}{377 \cdot 50 \mu} = 53,05 \Omega$$

A impedância do circuito pode ser calculada considerando o diagrama da Figura 8,

$$Z = \sqrt{R^2 + (X_L - X_C)^2} = \sqrt{8^2 + (188,5 - 53,5)^2} = 135,68 \Omega$$

A corrente pode ser dada por

$$I = \frac{U}{Z} = \frac{220}{135,8} = 1,62 \text{ A}$$

A diferença de fase entre a corrente e a tensão será de

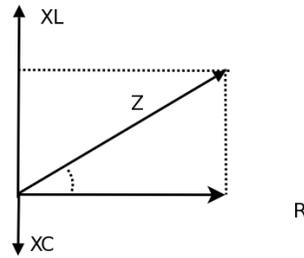


Figura 8: Diagrama de Impedância RLC série

$$\cos\theta = \frac{R}{Z} = \frac{8}{135,8} = 0,589$$

$$\theta = 86,62^\circ$$

Como $X_L > X_C$, o efeito predominante é o indutivo, com a corrente estando atrasada em relação à tensão, como pode-se observar no comparativo entre a forma de onda da tensão e da corrente observada no resistor apresentado na Figura 9.

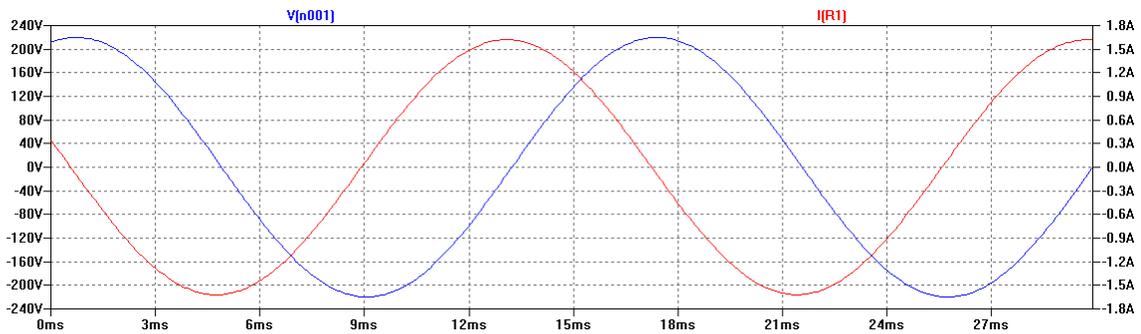


Figura 9: Resposta para o exemplo de circuito RLC em série

2.5 Circuito RLC em Paralelo

Suponha um circuito com uma ligação paralela entre uma fonte de alimentação alternada de 220V e 60Hz, um resistor $R = 8\Omega$, um capacitor $C = 132\mu F$ e um indutor $L = 26mH$.

Pode-se determinar a corrente nos diversos elementos,

$$I_R = \frac{220}{8} = 27,5A$$
$$\omega = 2.\pi.f = 377rad/s$$
$$X_C = \frac{1}{\omega.C} = \frac{1}{377.132\mu} = 20,1\Omega$$
$$I_C = \frac{220}{20} = 10,9A$$
$$X_L = \omega.L = 377.26m = 9,8\Omega$$
$$I_L = \frac{220}{9,8} = 22,4\Omega$$

A corrente no capacitor C está avançada em relação à V em 90° e a corrente no indutor L está adiantada em relação à V também em 90° .

3 Fator de Potência

Já foi estudado que a potência pode ser dada por $P = U.I$. Isto é válido para circuitos em corrente contínua ou para circuitos monofásicos com carga resistiva (por exemplo, lâmpadas incandescentes, ferro elétrico, chuveiro elétrico).

Em circuitos contendo capacitores e/ou indutores, tensão e corrente não estarão necessariamente em fase. A diferença de fase entre tensão e corrente provoca efeitos indesejados, em função desta defasagem parte da energia armazenada nos indutores/capacitores retorna para a fonte e não produz trabalho útil.

Quando for utilizada uma carga indutiva ou capacitiva (por exemplo, com motores), devem ser definidos três tipos de potência:

Potência Ativa É a potência dissipada em calor, dada por P. É a capacidade do circuito em produzir trabalho. Sua unidade é o Watt (W).

Potência Reativa É a potência trocada entre gerador e carga sem ser consumida, dada por Q e medida em var.

Potência Aparente É o produto da tensão pela corrente do circuito, que será igual ou maior do que a potência ativa. É a soma vetorial das potências Ativa e Reativa, dada por N. É medida em volt-ampères (VA)

Suponha um circuito alimentado com uma tensão alternada onde a corrente apresenta uma diferença de fase em relação à tensão, sendo esta diferença dada em um ângulo θ . Chama-se fator de potência ao co-seno do ângulo de defasagem entre a corrente e a tensão. O fator de potência também pode ser dado por:

$$FP = \frac{P}{N} \quad (5)$$

No caso de formas de onda perfeitamente senoidais, P, Q e N podem ser representados por vetores que formam um triângulo retângulo, também conhecido como triângulo de potências, conforme mostrado na Figura 10.

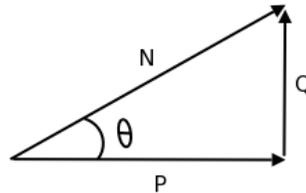


Figura 10: Triângulo de Potência

A expressão geral da potência em circuitos monofásicos de corrente alternada é dada pela Equação 6.

$$P = U.I.|\cos \theta| \quad (6)$$

Para circuitos trifásicos, obtem-se a expressão $P = \sqrt{3}U.I.\cos\theta$.

O fator de potência varia de 0 a 1. O valor 0 representa uma indutância pura - neste caso o fluxo de energia é puramente reativo e a energia armazenada é inteiramente devolvida à fonte a cada ciclo. O valor 1 representa um circuito puramente resistivo, onde toda a energia fornecida pela fonte é consumida pela carga. Um circuito com baixo fator de potência terá correntes elétricas maiores para realizar o mesmo trabalho do que um circuito com alto fator de potência.

Cargas indutivas (como motores e transformadores, que são equipamentos com bobinas) produzem potência reativa com a onda de corrente atrasada em relação à tensão. Cargas capacitivas (bancos de capacitores ou cabos elétricos enterrados) produzem potência reativa com corrente adiantada em relação à tensão. Ambos os tipos de carga absorverão energia durante parte do ciclo de corrente alternada, apenas para devolver essa energia novamente para a fonte durante o resto do ciclo.

As concessionárias de energia estabelecem que os consumidores, especialmente os que possuem cargas maiores, mantenham os fatores de potência de suas instalações elétricas dentro de um limite, caso contrário serão penalizados com cobranças adicionais. Engenheiros freqüentemente analisam o fator de potência de uma carga como um dos indicadores que afetam a eficiência da transmissão e geração de energia elétrica.

Exemplo 5: Um motor trifásico de 220V exige da rede 25 ampères por fase, com fator de potência de 0,8. Qual a potência oferecida pela rede? Solução: $P = \sqrt{3}.220.25.0,8 = 7621W$ □

Quando o fator de potência atinge valores abaixo de 0,85 podem ser observados problemas em uma instalação (como, por exemplo, o aquecimento dos condutores). Isso deve ser corrigido com a instalação de capacitores de modo a compensar o efeito indutivo.