

Eletricidade Aplicada - notas de aula

Carlos Kleber da Costa Arruda¹ - Universidade Candido Mendes

13 de setembro de 2007

¹carloskleber@gmail.com

Sumário

1	Introdução	3
1.1	Eletricidade na prática	3
1.2	Os caminhos da eletricidade	6
1.3	Revisão da teoria de circuitos elétricos de corrente contínua (CC)	7
1.4	Elementos armazenadores de energia	11
2	Princípios de Corrente Alternada	12
2.1	Porque corrente alternada?	12
2.2	Ondas Senoidais	17
2.3	Entendendo as Grandezas Elétricas	20
2.4	Fasores	21
2.5	Representação de elementos elétricos em forma complexa	24
2.6	Análise de Circuitos de Corrente Alternada	26
2.7	Exemplos	32
3	Potência e energia	34
3.1	Introdução	34
3.2	Tipos de Potência	38
3.3	Fator de Potência	39
3.4	Medindo a potência	40
3.5	Compensação de reativos em uma instalação	41
4	Sistemas Trifásicos	42
4.1	Introdução	42
4.2	Transmissão e distribuição	44
4.3	Potência	47
5	Tarifação de energia elétrica	48
5.1	Introdução	48
5.2	Estudo de caso	51
6	Instalações Elétricas Industriais	53
6.1	Introdução	53
6.2	Elementos de uma subestação	53
6.3	Proteção de circuitos	55

7 Máquinas elétricas - motores	56
7.1 Introdução	56
7.2 Características de um motor elétrico	57
7.3 Projeto de instalações elétricas com motores em partida	58
7.4 Partida de motores elétricos	58
8 Resumo	60
8.1 Questionário	60
8.2 Exercícios	61
8.3 Palavras-chave	69
A Uso de calculadores com funções de números complexos	71
A.1 Texas TI-83	71
B Erros comuns	72
B.1 Omitir unidade	72
B.2 Esquecer do múltiplo/ submúltiplo da unidade	72
B.3 Múltiplo da unidade ao quadrado ou ao cubo	72
B.4 Confusão entre série e paralelo	72

Capítulo 1

Introdução

1.1 Eletricidade na prática

A eletricidade é uma das formas de aproveitar os recursos naturais para o desenvolvimento humano. Possui características únicas: seu armazenamento é difícil e caro, comparado com outras fontes como o petróleo. Pode ser transmitido com facilidade, e a entrega desta energia é instantânea. Sua extração da natureza pode ser realizada de diversas formas, mas cada uma possui uma desvantagem: seja no impacto ambiental, ou nos custos elevados da tecnologia.

Desta forma, a civilização atual depende fortemente da energia elétrica, aonde não é possível imaginar um desenvolvimento sem eletricidade. A engenharia, de todos os campos, deve saber usar da eletricidade para a realização de seus projetos.

1.1.1 Uma ordem de grandeza

Abaixo são ilustrados alguns números de algumas grandezas, em potências de 10, e algumas aplicações no qual são observadas estas grandezas. Esta parte é interessante para ilustrar o tamanho das grandezas elétricas. Um leigo em eletricidade sabe, pelo menos, a diferença entre um metro, um quilômetro e um milímetro. Assim como o metro, todas as grandezas elétricas podem ser expressas com o auxílio dos múltiplos e submúltiplos do sistema internacional¹.

¹Os múltiplos não são os mesmos usados em informática, como em kilobyte, megabyte. Neste caso, quilo = $2^{10} = 1024$, mega = $2^{20} = 1024 \times 1024$.

p	pico	$10^{-12} = 0,000.000.000.001$
n	nano	$10^{-9} = 0,000.000.001$
μ	micro	$10^{-6} = 0,000.001$
m	mili	$10^{-3} = 0,001$
-	-	$10^0 = 1$
k	quilo	$10^3 = 1.000$
M	mega	$10^6 = 1.000.000$
G	giga	$10^9 = 1.000.000.000$
T	tera	$10^{12} = 1.000.000.000.000$
P	penta	$10^{15} = 1.000.000.000.000.000$

Tabela 1.1: alguns múltiplos e submúltiplos do Sistema Internacional (SI)

Os múltiplos e submúltiplos podem ser usados com qualquer unidade. Você também pode imaginar um exemplo mais palpável, como a diferença entre um Real, um “quiloreal” e um “megareal”.

A seguir são ilustrados múltiplos de unidades típicas em eletricidade, seguido por um exemplo comum.

1.1.1.1 Potência

Os exemplos incluem potência em geral, seja de dispositivos elétricos ou mecânicos, geradores ou consumidores.

1 W	Rádio
10 W	Aparelho de DVD, lâmpada fluorescente
100 W	Lâmpada incandescente, microcomputador
1 kW	Ar condicionado residencial
10 kW	Motor elétrico industrial
100 kW	Automóvel
1 MW	Locomotiva a diesel
10 MW	Demanda média de um pequeno país
100 MW	Usina termelétrica de grande porte
1 GW	Grandes usinas hidrelétricas (5 GW)
10 GW	Usina de Itaipu (12,6 GW)
100 GW	Demanda média de eletricidade do Brasil
1 TW	Demanda média mundial de eletricidade (1,7 TW em 2001)

Tabela 1.2: Ordem de grandeza de potência.

1.1.1.2 Energia

São ilustradas duas unidades de energia: joule (SI) e watt-hora (usada em engenharia elétrica).

SI	watt-hora	Descrição
1 kJ		1 Watt-hora (3,6 kJ)
10 kJ		Consumo de 1 g de gasolina
100 kJ		Energia cinética de um carro em alta velocidade
1 MJ	1 kWh	Média nutricional diária de uma pessoa (8,4 MJ = 2000 kcal)
10 MJ	10 kWh	
100 MJ	100 kWh	
1 GJ	1 MWh	Descarga atmosférica, explosão de 1 ton de TNT
10 GJ	10 MWh	Consumo de um automóvel durante 1 ano
	...	
	1 GWh	
	1 TWh	Bomba nuclear
	10 TWh	Impacto de meteoro
	100 TWh	Consumo anual do Brasil (374,9 TWh em 2005)
	1 PWh	Consumo anual dos Estados Unidos (3,656 PWh em 2003)

Tabela 1.3: Ordem de grandeza de energia.

1.1.1.3 Tensão

100 mV	Diodo (0,6 V)
1 V	Pilha (1,5 V)
10 V	Bateria de carro (12 V)
100 V	Tomada residencial (127 ou 220 V)
1 kV	Nível de isolamento de equipamentos elétricos residenciais (600 V)
10 kV	Linha de distribuição urbana (13,8 kV)
100 kV	Linha de transmissão típica (138 kV)
1 MV	Linhas de transmissão de Itaipu (800 kV)
10 MV	Geradores de impulso (6 MV)

Tabela 1.4: Ordem de grandeza de tensão elétrica.

1.1.1.4 Corrente

10 mA	Transistor
100 mA	Aparelho celular
1 A	Televisão
10 A	Chuveiro elétrico
100 A	Partida de motor elétrico
1 kA	Linhas de transmissão (2 kA)
10 kA	Curto-circuito
100 kA	Descarga atmosférica

Tabela 1.5: Ordem de grandeza de corrente elétrica.

1.2 Os caminhos da eletricidade

Podemos dividir a utilização da energia elétrica em diversos campos.

1.2.1 Geração

A captação dos recursos naturais e sua transformação em energia elétrica. A forma tradicional é o gerador, no qual seu eixo pode ser acoplado a uma força mecânica, como uma turbina hidráulica ou uma turbina térmica, movida a gás, gasolina ou energia nuclear.

O desenvolvimento de novas formas de geração destina-se a um futuro no qual as fontes hidráulicas e térmicas tornam-se escassas, e ao mesmo tempo procurando fontes limpas, com baixo impacto ambiental.

1.2.2 Transmissão

Os blocos de energia das usinas devem ser transmitidos para os núcleos consumidores. O Brasil, pelo seu tamanho continental, depende de longas linhas de transmissão, no qual são necessários longos caminhos desimpedidos para passagem, ou seja, com um grande impacto ambiental. O sistema de transmissão necessita também de um número suficiente de interligações para assegurar a continuidade do serviço.

1.2.3 Distribuição

Os blocos de energia chegam em subestações, no qual reduz a tensão e são transmitidos para os consumidores comerciais e residenciais nas malhas urbanas. Esta malha deve conter medidas de segurança de forma a suportar alterações no sistema, como mudança de carga, tempestades ou falta de energia.

1.2.4 Máquinas Elétricas

Uma grande utilização da energia elétrica, em termos de potência, é na sua conversão para energia mecânica. O uso de motores de diversos tipos é evidente em diversos segmentos da indústria. Ao mesmo tempo, procura-se realizar projetos de máquinas eficientes e com alta confiabilidade.

1.2.5 Eletrônica

Com a invenção da válvula e do transistor, desenvolveu-se um novo campo da eletricidade envolvendo pequenos circuitos. A TV e o rádio são os principais exemplos da eletrônica, no qual atualmente desmembrou-se pela computação e pelas telecomunicações.

1.2.6 Controle

Destinado ao estudo da dinâmica de sistemas, não necessariamente elétricos. A engenharia de controle busca a estabilidade frente a qualquer distúrbio.

1.2.7 Telecomunicações

Ramo da eletrônica relativo a transmissão de dados através de ondas eletromagnéticas. Suas aplicações são o rádio, TV, telefonia celular e redes de computadores.

1.2.8 Computação

Segmento especializado da eletrônica destinado ao projeto de computadores e programas. Atualmente não é restrito a computadores de mesa, mas engloba notebooks, PDAs e celulares.

1.2.9 Instrumentação

Campo específico da eletrônica no qual destina-se a medir as grandezas físicas. Alguns exemplos são o multímetro, radares, termopares e sensores em geral.

1.2.10 Automação

A crescente complexidade dos processos industriais permitiu o desenvolvimento de uma eletrônica especializada, que trata-se da aplicação da engenharia de controle na prática. Atualmente existe uma grande variedade de aplicações em automação, desde indústrias até prédios comerciais.

1.2.11 Comercialização

A energia elétrica é elemento determinante nos custos de produtos e serviços. Empresas geradoras, transmissoras e distribuidoras podem negociar a energia que é lançada no sistema. As indústrias podem adquirir energia a longo prazo e revender as suas sobras. Outras firmas podem atuar como comercializadoras, mesmo não possuindo geração, através de especulação no mercado atacadista de energia.

1.3 Revisão da teoria de circuitos elétricos de corrente contínua (CC)

Antes de iniciar o próximo capítulo, faz-se necessária uma revisão dos conceitos de circuitos elétricos de corrente contínua. Será visto que a análise de circuitos CA seguirá esta mesma base.

1.3.1 Noção fundamental de circuito

Um circuito elétrico é uma série de caminhos no qual a carga elétrica é transportada. Uma *fonte* provocará a separação de cargas, quanto maior esta separação, maior será a diferença de potencial. Para haver uma separação de cargas, é necessária uma energia, que pode ser obtida através de diversos fenômenos (reações químicas, transformações eletromagnéticas, efeitos fotovoltaicos, efeitos termoelétricos, etc).

Entre as cargas haverá um campo elétrico, que indicará a tendência de atração entre as cargas. A fonte estará forçando as cargas a se separarem, logo deverá haver um caminho para que as cargas realizem a atração.

Ao se formar o caminho, estará formado um circuito elétrico. Este circuito poderá ser do mais simples e curtos, até os mais elaborados e extensos. A carga elétrica começará a fluir pelo circuito, formando a corrente elétrica.

Ao longo do circuito, a carga elétrica perderá energia da forma de um “atrito” com os materiais. Este atrito fornecerá energia aos componentes, essencialmente na forma de calor. Este é o conceito de resistência elétrica. Outras formas de troca de energia são através dos campos elétricos e magnéticos, o que será visto mais adiante.

Após as cargas terminarem de circular, no outro lado do pólo da fonte, esta continuará a fornecer potencial elétrico, “bombeando” novamente as cargas de volta ao circuito. Isto se repete até ser interrompido o circuito, ou cessar a fonte de energia.

Em um mesmo circuito podem haver várias fontes de energia, interagindo entre si.

1.3.2 Tensão

Definido pela relação entre a energia potencial e a carga elétrica, resumido pela equação 1.1. Pode ser expresso por v (quando se tratar de uma função) ou V (quando se tratar de uma tensão contínua)². Sua unidade é o volt (V).

$$v(t) = \frac{dw}{dq} \quad (1.1)$$

É usual, mas errado, falar da tensão de um elemento elétrico (um gerador, pilha, resistor, etc). Na verdade teremos uma *diferença de potencial*, que é a diferença entre as tensões dos terminais. Você pode atribuir que um terminal encontra-se a tensão de 0 V, logo a diferença de potencial do elemento ficará igual à tensão do segundo terminal.

1.3.3 Corrente

Definida pela variação de carga que atravessa um condutor, ao longo do tempo. Pode ser expressa por i ou I . Sua unidade é o ampere (A).

$$i(t) = \frac{dq}{dt} \quad (1.2)$$

1.3.4 Resistência

A definição formal de resistência é a relação entre a corrente que atravessa um elemento e a queda de tensão entre entrada e saída.

$$R = \frac{V}{I} \quad (1.3)$$

Em geral tratamos esta relação como um número, cuja grandeza é medida em ohm (Ω), mas esta relação pode ser não-linear, expressa por uma função qualquer.

²em alguns livros pode ser referenciado como u ou U .

1.3.5 Queda de tensão (q.d.t.)

Fazendo o caminho inverso, temos

$$V = RI \quad (1.4)$$

Quando tratamos de um elemento “fechado”, a queda de tensão aparenta ser abrupta, mas na verdade não ocorre desta forma. Vendo o exemplo de um fio condutor. Sua resistência, que em geral é desprezada, varia linearmente. Logo, a queda de tensão ao longo do fio será uma rampa descendente.

1.3.6 Associação série

Dois elementos ligados em série compartilham a mesma corrente.

$$R_{eq} = R_1 + R_2 + \dots + R_n \quad (1.5)$$

A resistência equivalente deverá ser maior que o maior elemento.

Uma associação em série divide a tensão entre seus componentes. O componente com a *menor resistência* ficará com a *menor tensão*, e vice-versa.

1.3.7 Associação paralela

Dois elementos ligados em paralelo compartilham a mesma tensão. A resistência equivalente é expressa por³

$$\frac{1}{R_{eq}} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \dots + \frac{1}{R_n} \quad (1.6)$$

Para somente dois elementos em paralelo, a seguinte fórmula também pode ser usada. Nada mais é que uma manipulação da equação 1.6.

$$R_{eq} = \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2} \quad (1.7)$$

A resistência equivalente, para qualquer número de elementos, deverá ser menor que o menor elemento.

Uma associação em paralelo divide a corrente entre seus componentes. O componente com a *menor resistência* ficará com a *maior corrente*, e vice-versa.

1.3.8 Resistência de fios

A resistência de um fio pode ser calculada por

$$R = \rho \frac{l}{A} \quad (1.8)$$

No qual l é o comprimento, A a área da seção transversal e ρ a resistividade do material (por exemplo, para o cobre, $\rho = 1,69 \cdot 10^{-8} \Omega \text{ m}$). Algumas seções típicas de fios são de $1,5 \text{ mm}^2$ a 120 mm^2 .

³Ao longo desta apostila será usada a notação "||", que corresponderá à equação 1.6.

1.3.9 Resolução de circuitos

A análise de um circuito elétrico é metódica, e em geral trata dos seguintes aspectos:

- Encontrar a corrente fornecida por uma fonte de tensão,
- Encontrar a corrente que atravessa um elemento,
- Encontrar a queda de tensão em um elemento,
- Calcular um elemento que atenda uma condição de corrente, queda de tensão, potência, etc.

O procedimento mais simples é o cálculo de resistências equivalentes, agregando elementos até encontrar um único elemento que represente todo o circuito, no ponto de vista da fonte. Este procedimento é eficaz quando existe somente uma fonte no circuito.

Outro método de análise são as leis de Kirchoff, essenciais para a resolução de circuitos complexos:

- Lei dos nós: a soma das correntes que entram é igual a soma das correntes que saem do nó.
- Lei das malhas: a soma das diferenças de potencial (ddp) em torno de um laço é igual a zero. Supõe-se neste caso que fontes, voltadas para um mesmo sentido, tenham uma ddp positiva e as cargas uma queda de tensão (ddp negativa).

1.3.10 Potência e energia

Potência é definida como a variação de energia ao longo do tempo. Pode ser expresso por p ou P , e sua unidade é watt (W). Lembrando que potência é um conceito mais amplo, podendo ser de origem elétrica, mecânica, etc.

Se multiplicarmos tensão e corrente, teremos a potência consumida ou produzida pelo elemento:

$$v(t) i(t) = \frac{dw}{dq} \frac{dq}{dt} = \frac{dw}{dt} = p(t) \quad (1.9)$$

Logo, quando tensão e corrente são grandezas contínuas, a potência também será:

$$P = V I \quad (1.10)$$

A energia elétrica será a integral da potência ao longo do tempo.

$$w(t) = \int p(t) dt \quad (1.11)$$

Para um circuito de corrente contínua, se não houver nenhuma perturbação, a integral torna-se

$$W = P t \quad (1.12)$$

Será visto mais adiante que, a partir de algumas considerações, será possível calcular circuitos de corrente alternada de forma muito similar aos circuitos de corrente contínua.

1.4 Elementos armazenadores de energia

O resistor é um elemento de saída da energia elétrica, transformando-a em calor, movimento, luz, etc. Podemos ter elementos que armazenam provisoriamente a energia. Assim como o resistor relaciona tensão e corrente pela sua resistência, estes elementos possuem suas relações, que são essenciais para a resolução de circuitos.

1.4.1 Indutor

Armazena a energia em seu campo magnético. Sua relação tensão-corrente é

$$v_L = L \frac{di_L}{dt} \quad (1.13)$$

O efeito do indutor é agir como um “amortecedor” de corrente, captando a energia e “carregando” o campo magnético. Na falta de corrente, o indutor “descarregará” esta energia de volta ao circuito.

A equação 1.13 pode ser interpretada da seguinte forma:

- Variação muito pequena de corrente (contínua): tensão nula.
- Variação muito grande de corrente (degrau): tensão “infinita”.

1.4.2 Capacitor

Armazena a energia em seu campo elétrico. Sua relação tensão-corrente é

$$i_C = C \frac{dv_C}{dt} \quad (1.14)$$

O efeito do capacitor é agir como um “amortecedor” de tensão, o que pode ser visto, a grosso modo, a uma bateria de carro. O capacitor irá “carregar” a partir da tensão do circuito, armazenando a energia no campo elétrico. Na falta de tensão, o capacitor “descarregará” esta energia de volta ao circuito.

A equação 1.14 pode ser interpretada da seguinte forma:

- Variação muito pequena de tensão (contínua): corrente nula.
- Variação muito grande de tensão (degrau): corrente “infinita”.

Capítulo 2

Princípios de Corrente Alternada

2.1 Porque corrente alternada?

No final do séc. XIX com o crescimento econômico e as novas invenções em máquinas elétricas, foram propostas duas formas de distribuição de eletricidade: corrente contínua e corrente alternada.

O uso de corrente contínua foi proposto por Thomas Edison, contra a distribuição de corrente alternada de Nikola Tesla. Ganhou a corrente alternada, por se mostrar mais eficiente, basicamente pela possibilidade do uso de transformadores.

Após as discussões iniciais, estabeleceu-se um paradigma baseado em corrente alternada, no qual o sistema é baseado nas principais máquinas elétricas. Este é o sistema que persiste até hoje, em todos os países.

2.1.1 O Transformador

O transformador permite a transferência de energia entre dois circuitos através de um acoplamento magnético. São duas bobinas enroladas sobre um núcleo ferromagnético em comum, aonde a primeira bobina produz o fluxo magnético, que atravessará a segunda bobina. Pela Lei de Faraday (equação 2.3), haverá uma tensão induzida na segunda bobina proporcional à variação do fluxo magnético e o número de espiras (voltas) da bobina.

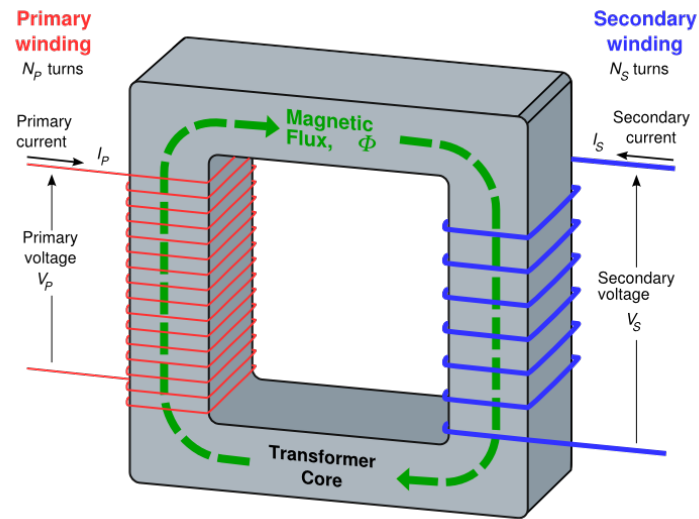


Figura 2.1: Esquema de um transformador (fonte: Wikipedia)

Esta transferência de energia pode ser manipulada, de forma que se altere tensões e correntes, sem alterar a potência total.

Procura-se usar os transformadores para elevar a tensão, possibilitando a transmissão de energia por longas distâncias, enquanto a baixa corrente permite diminuir as perdas nos condutores. A relação é dada por

$$\frac{N_1}{N_2} = \frac{V_1}{V_2} = \frac{I_2}{I_1} \quad (2.1)$$

Sendo N_1 e N_2 o número de espiras no primário e no secundário, respectivamente.

A principal vantagem neste sistema é evitar as perdas nos condutores, que variam com o quadrado da corrente:

$$P = R I^2 \quad (2.2)$$

O transformador pode ser visto como uma engrenagem, que também transmite energia através de uma relação entre as rodas.

2.1.2 O Gerador

O gerador de corrente alternada também funciona pelo princípio descrito pela Lei de Faraday: uma força eletromotriz (tensão) é induzida pela variação do fluxo magnético:

$$e = -N \frac{d\Phi_B}{dt} \quad (2.3)$$

No qual o fluxo magnético Φ_B torna-se variável pela rotação do eixo. As bobinas captam uma tensão senoidal, no qual é fornecida ao sistema. A rotação do eixo é o que determina a frequência da onda.

$$\Phi_B = B A \quad (2.4)$$

Seja a e b as dimensões do pólo do gerador, que determina a área do fluxo magnético. O rotor em um dado instante estará a um ângulo θ em relação ao campo magnético produzido pelo estator¹. Este ângulo será determinado pela frequência angular de rotação da máquina ω :

$$A = a b \cos \theta \quad (2.5)$$

$$\theta = \omega t \quad (2.6)$$

$$A = a b \cos \omega t \quad (2.7)$$

$$B A = B a b \cos \omega t \quad (2.8)$$

¹Pode também haver a montagem inversa: o rotor produz o campo magnético e o estator capta a energia.

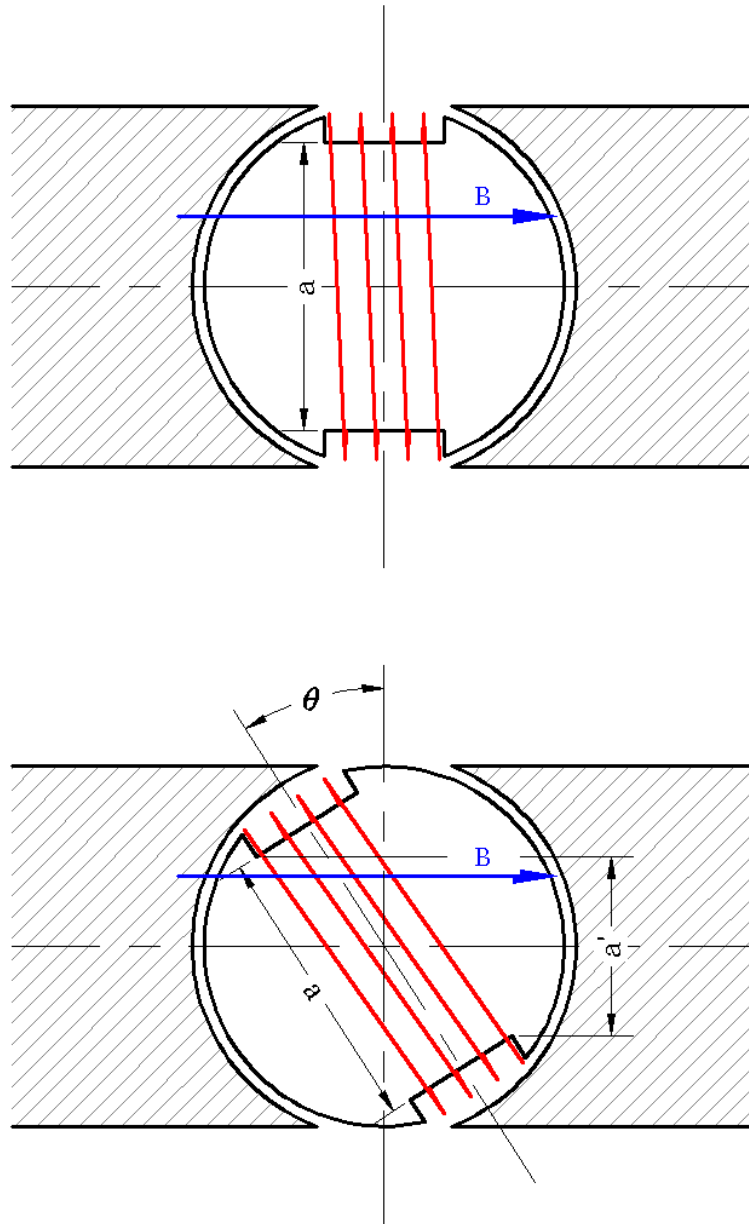


Figura 2.2: O rotor recebe um fluxo magnético de acordo com seu ângulo em relação ao eixo dos polos. Na figura acima, o fluxo é máximo quando o ângulo é zero, visto pela largura a . Na figura abaixo, o fluxo é menor pois a bobina do rotor está recebendo uma parcela a' . Quando o rotor girar 180° , a tensão induzida será no sentido contrário.

A variação do fluxo será a variação desta área.

$$\frac{d\Phi_B}{dt} = -\omega B a b \sin \omega t \quad (2.9)$$

$$e(t) = N \omega B A \sin \omega t \quad (2.10)$$

Logo a tensão induzida dependerá diretamente de

1. Rotação da máquina
2. Fluxo magnético produzido
3. Número de espiras

A frequência do sistema também é determinada pelos geradores, que no nosso caso é igual a 60 Hz, ou aproximadamente 377 radianos por segundo.

Os geradores CA são em geral mais econômicos que seus equivalentes em corrente contínua. Mais a frente será visto que os geradores CA podem ser trifásicos (capítulo 4), o que aumenta o rendimento deste tipo de máquina.

2.1.3 O Motor

Os motores em corrente alternada possuem uma construção mais simples, o que também os torna mais econômicos que os motores de corrente contínua. Sua desvantagem é, em geral, não ter um controle de velocidade. Mesmo assim, a maioria das aplicações justifica o uso de corrente alternada.

2.1.4 Outras aplicações

Eventualmente, outras aplicações demandam o uso de corrente contínua, o que pode ser realizado a partir de conversores CA-CC (também chamados de retificadores). A área de eletrônica de potência é responsável para a conversão entre sistemas e controle de potência.

2.1.5 O sistema elétrico

Com os equipamentos descritos anteriormente, pode-se vislumbrar um sistema elétrico de grande porte. Seguindo o sentido do fluxo de energia, temos:

1. A geração, captando energia de diversas fontes, realizada com tensões relativamente baixas, devido à limitações das máquinas.
2. O transformador elevador, instalados próximos dos geradores, aonde consegue-se tensões que podem chegar a 750 kV, como é o caso do Brasil, e proporcionalmente reduzindo as correntes, possibilitando a transmissão da eletricidade.
3. A rede de transmissão, que interliga os diversos núcleos geradores e consumidores.
4. O transformador abaixador, instalados próximos as centros consumidores, permite reduzir as tensões para níveis de utilização urbanos.

5. A rede de distribuição, que adentra os centros urbanos, em geral da ordem de 13,8 kV.
6. Os transformadores abaixadores dos consumidores, reduzindo as tensões para 127 ou 220 V.
7. As cargas dos consumidores.

O sistema elétrico pressupõe o uso de dispositivos de proteção, controle e tarifação, entre outros, que permitem assegurar a qualidade do serviço.

2.2 Ondas Senoidais

A corrente alternada, devido à construção dos geradores, origina aproximadamente uma senóide. A onda senoidal² é expressa pela função

$$f(t) = F \sin(\omega t + \phi) \quad (2.11)$$

Aonde F é o valor máximo da senóide, ou amplitude, ω a frequência angular e ϕ o ângulo de fase.

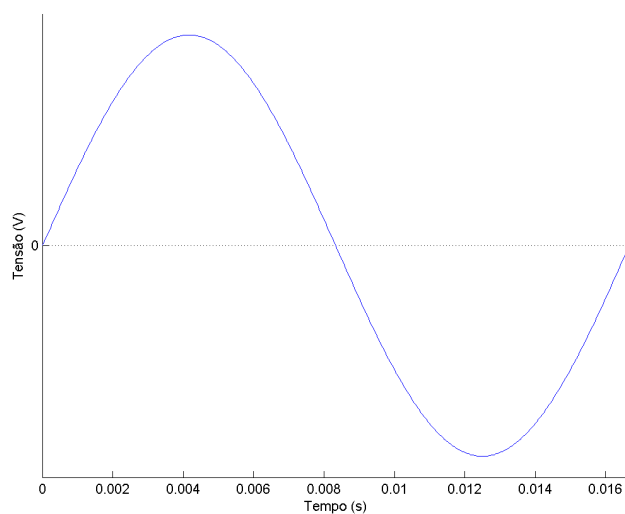


Figura 2.3: Função senoidal

²A abreviatura de seno pode ser “sen” de senoidal ou “sin” de sinusoidal. A forma “sin” é também usada na língua inglesa.

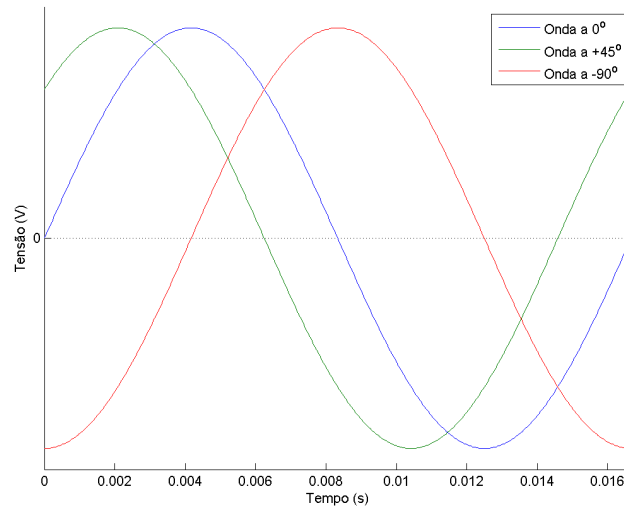


Figura 2.4: Ondas com diferentes ângulos de fase

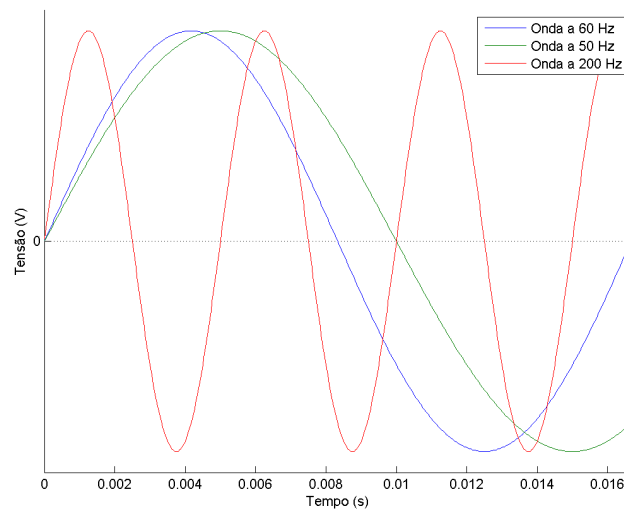


Figura 2.5: Ondas com diferentes frequências

O ângulo de fase é importante quando começamos a realizar operações entre senóides. Ao somarmos duas ondas com o mesmo ângulo de fase (ou simplesmente, “em fase”) teremos o valor máximo. Se somarmos duas ondas com ângulos de fase opostos (diferença de 180°) teremos o valor mínimo.

A operação entre senóides é realizada ponto-a-ponto: para cada valor das funções, em um mesmo instante de tempo, é feita a operação.

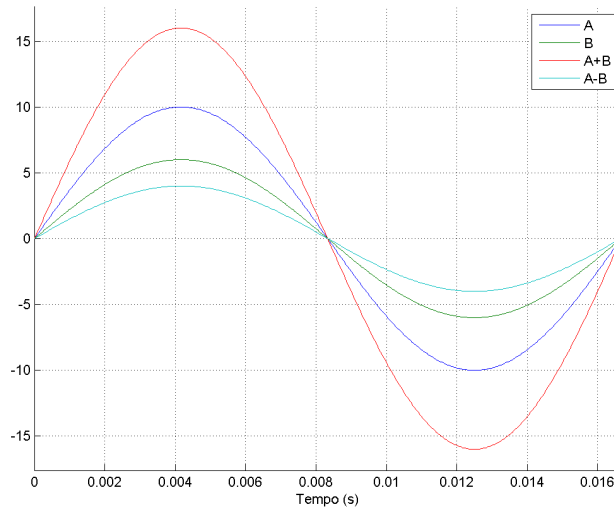


Figura 2.6: Operações com duas ondas em fase

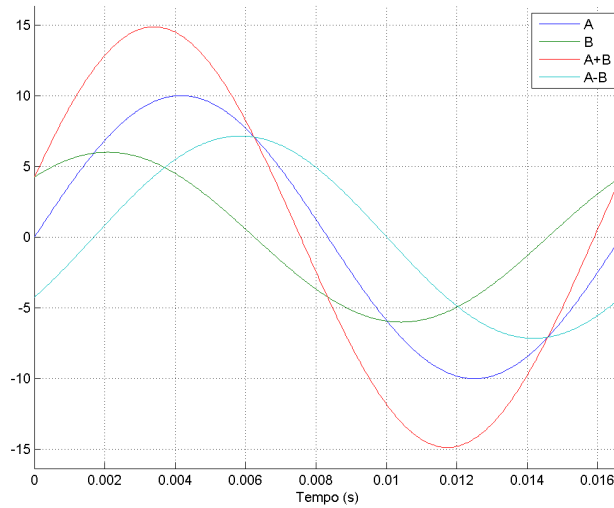


Figura 2.7: Operações com duas ondas defasadas

2.3 Entendendo as Grandezas Elétricas

2.3.1 O sentido do fluxo de energia

Teremos as grandezas em forma senoidal, não só a corrente mas tensão. Como a energia é transmitida, se tanto a corrente como a tensão “vai e volta”?

Para responder esta dúvida comum, basta lembrar que o que importa é a potência, que é expressa por $P = VI$. Se multiplicarmos as ondas de tensão e corrente, se estiverem em fase, teremos sempre valores positivos. Logo, percebemos que a potência transmitida é pulsante.

Conforme vamos deixando a onda de tensão defasada da onda de corrente, o que é comum de ocorrer, pode-se perceber que a potência deixa de ser totalmente transmitida. Experimente calcular a onda de potência para uma onda de tensão defasada em 180° da onda de corrente.

2.3.2 Valor efetivo

Esta forma de onda pulsante indica que a potência não é transmitida de forma constante, como é feita em corrente contínua.

De fato. Com a definição de energia é a integral da potência ao longo do tempo, vemos que podemos chegar a um valor médio (considerando que as ondas de tensão e corrente são senoidais).

Logo, falamos de valores efetivos em grandezas de tensão e corrente os valores no qual teremos a mesma energia em um circuito de corrente contínua, como por exemplo, para aquecer um resistor de um chuveiro.

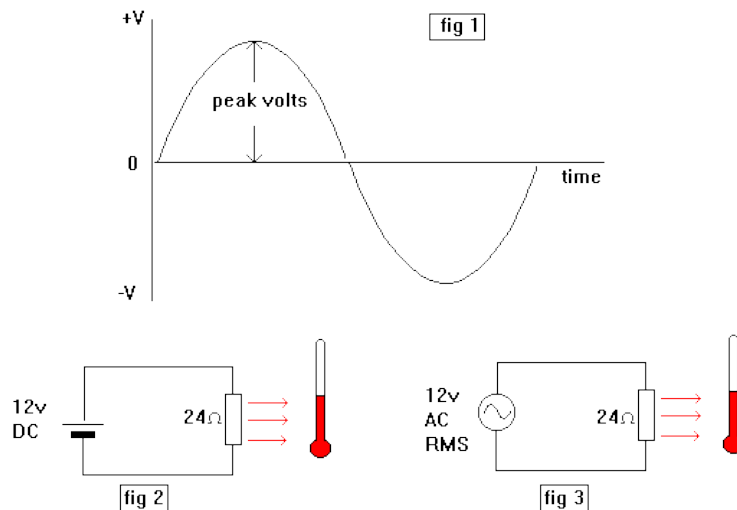


Figura 2.8: Valor efetivo e comparação com corrente contínua. [1]

Este valor, para ondas senoidais, é expresso por

$$V_{\text{ef}} = \frac{V_{\text{max}}}{\sqrt{2}} \quad (2.12)$$

ou

$$V_{\text{ef}} = 0,707V_{\text{max}} \quad (2.13)$$

O valor efetivo é também chamado de valor RMS pela sua abreviatura em inglês (*root mean square* - valor médio quadrático). A rigor, o valor efetivo de uma função é a média da integral do quadrado da função.

Quando falamos que a tomada de nossas casas é de 127 V, estamos falando no seu valor RMS. Na verdade o valor de pico é igual a

$$V_{\text{max}} = V_{\text{ef}} \cdot \sqrt{2} = 127 \cdot 1,414 = 179,6 \text{ V} \quad (2.14)$$

E se a frequência na rede elétrica do Brasil é de 60 Hz:

$$\omega = 2\pi f = 2 \cdot 3,14159 \cdot 60 \approx 377 \text{ rad/s} \quad (2.15)$$

Logo, a função da onda de tensão residencial é igual a

$$v(t) = 179,6 \sin(377t - \phi) \quad (2.16)$$

Lembrando que a razão $\sqrt{2}$ é válida somente para ondas senoidais³.

2.4 Fasores

Realizar operações entre senóides pode se tornar um processo muito cansativo. Uma forma alternativa e que demanda muito menos tempo é o chamado método fasorial. O fasor é um número complexo que representa uma onda senoidal.

2.4.1 Base teórica

Uma onda senoidal também pode ser expressa pela seguinte forma:

$$f(t) = A \sin \omega t + B \cos \omega t \quad (2.17)$$

No qual dependendo dos valores de A e B a onda possuirá um ângulo de fase. Sendo a frequência igual para ambas as parcelas, a onda pode ser expressa somente por A e B .

Estes dois números podem ser interpretados como coordenadas de um vetor. De fato, se visualizarmos este vetor em rotação, ele descreverá um círculo. Deste círculo podemos extrair o seno e cosseno, que correspondem exatamente à função $f(t)$.

Este vetor em rotação é chamado de fasor. Sua notação matemática é

$$\dot{Z} = a + jb \quad (2.18)$$

No qual trata-se de um número complexo. Sendo que

$$j = \sqrt{-1} \quad (2.19)$$

³Esta dúvida não assola somente o estudante. Existam para vender multímetros que supostamente medem o valor RMS, mas que somente usavam a razão $\sqrt{2}$. Atualmente existem medidores chamados "true RMS", que realizam o cálculo exato do valor RMS através de integração.

A figura ?? ilustra que o complexo, assim como um vetor, também possui uma representação polar, indicada pela forma

$$\dot{Z} = r/\phi \quad (2.20)$$

Esta representação, não por acaso, corresponde à forma da função senoidal

$$f(t) = r \sin(\omega t + \phi) \quad (2.21)$$

A frequência angular ω não é explicitada na notação complexa pois se pressupõe-se que o sistema inteiro encontra-se na mesma frequência.

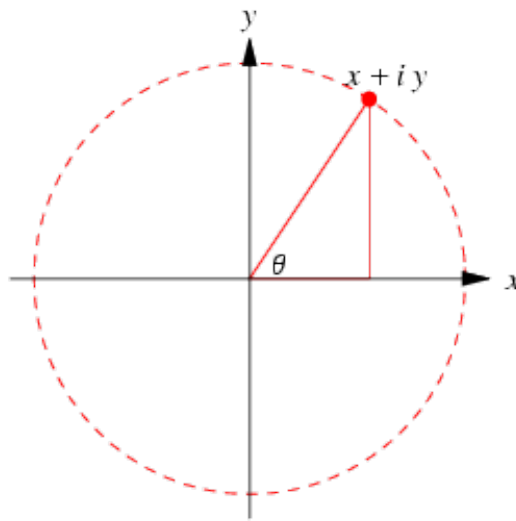


Figura 2.9: Rotação do fasor descrevendo uma circunferência.

Ocasionalmente pode ser usada a notação $\dot{Z} = Z/\phi$, no qual Z corresponde ao módulo de \dot{Z} .

2.4.2 Alguns números complexos

Todos os números reais, em notação complexa, possuem ângulo zero, por exemplo:

$$1 = 1/\underline{0^\circ} \quad (2.22)$$

Os imaginários puros possuem ângulo de 90 graus, por exemplo:

$$j = 1/\underline{90^\circ} \quad (2.23)$$

Um número real negativo também pode ser expresso por um módulo positivo e um ângulo de 180 graus:

$$-1 = 1/\underline{180^\circ} \quad (2.24)$$

2.4.3 Conversão entre notação polar e retangular

$$r = \sqrt{a^2 + b^2} \quad (2.25)$$

$$\phi = \tan^{-1} \frac{b}{a} \quad (2.26)$$

$$a = r \sin \phi \quad (2.27)$$

$$b = r \cos \phi \quad (2.28)$$

2.4.4 Funções típicas

- Parte real:

$$\Re(\dot{Z}) = a \quad (2.29)$$

- Parte imaginária:

$$\Im(\dot{Z}) = b \quad (2.30)$$

- Módulo:

$$\text{mod}(\dot{Z}) = |\dot{Z}| = r \quad (2.31)$$

- Argumento (ou ângulo):

$$\arg(\dot{Z}) = \phi \quad (2.32)$$

- Conjugado:

$$\text{conj}(\dot{Z}) = a - j b \quad (2.33)$$

2.4.5 Operações entre números complexos

Soma e subtração: realizar na forma *retangular*.

Seja $\dot{Y} = a + j b$ e $\dot{Z} = c - j d$:

$$\dot{Y} + \dot{Z} = (a + c) + j(b + d) \quad (2.34)$$

$$\dot{Y} - \dot{Z} = (a - c) + j(b - d) \quad (2.35)$$

Multiplicação e divisão: realizar na forma *polar*.

Seja $\dot{Y} = r/\phi$ e $\dot{Z} = s/\theta$:

$$\dot{Y} \cdot \dot{Z} = (r \cdot s)/\phi + \theta \quad (2.36)$$

$$\frac{\dot{Y}}{\dot{Z}} = \frac{r}{s}/\phi - \theta \quad (2.37)$$

Curiosamente, o imaginário negativo é igual ao inverso do imaginário:

$$-j = 1/\underline{-90^\circ} = 1/\underline{270^\circ} = \frac{1}{j} \quad (2.38)$$

$$1/\underline{360^\circ} = 1/\underline{0^\circ} \quad (2.39)$$

$$j^2 = -1$$

2.5 Representação de elementos elétricos em forma complexa

2.5.1 Fontes de tensão

As fontes produzem tensão de forma complexa. Estas fontes podem estar ou não defasadas. Caso exista somente uma fonte no circuito, por convenção, seu ângulo de fase será zero.

2.5.2 Impedância

Em uma análise de circuitos CA, a grande facilidade no método fasorial é em unir resistências, capacitâncias e indutâncias em um único elemento “genérico”, no qual chamamos de *impedância*. A impedância é um valor em número complexo, no qual também relaciona as tensões e correntes de um circuito. Logo, a impedância também pode ser expressa em ohms.

O símbolo usual de impedância é \dot{Z} , incluindo o indicador de número complexo. A Lei de Ohm em forma complexa torna-se

$$\dot{V} = \dot{Z} \dot{I} \quad (2.40)$$

2.5.3 Resistência

A resistência não altera a fase de tensões e correntes. Logo, possuirá somente a parte real, o que indica que o resistor consome energia.

$$\dot{V} = \dot{Z}_R \dot{I} = R \dot{I} \quad (2.41)$$

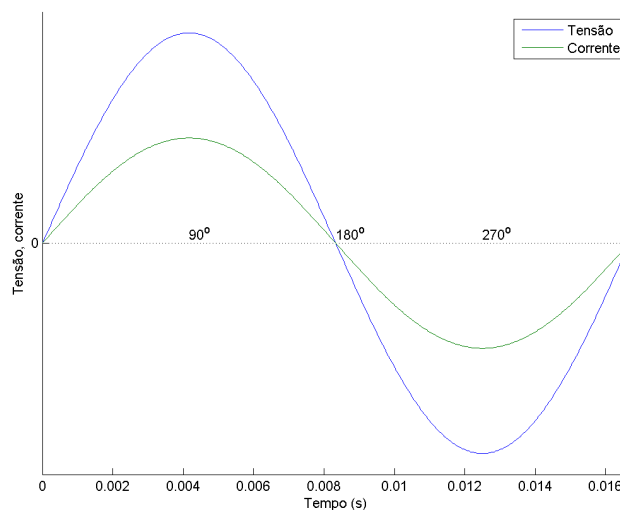


Figura 2.10: Relação entre tensão e corrente em um resistor.

2.5.4 Capacitância

O capacitor possui a característica de armazenar tensão, e corrente é proporcional à variação de tensão. Caso a alimentação seja igual a

$$v = V_{max} \sin(\omega t) \quad (2.42)$$

A corrente no capacitor será

$$i = C \frac{dv}{dt} = C\omega V_{max} \cos(\omega t) = C\omega V_{max} \sin(\omega t + 90^\circ) \quad (2.43)$$

Logo o capacitor *atrasa a tensão em relação à corrente*, conforme ilustra a figura 2.11.

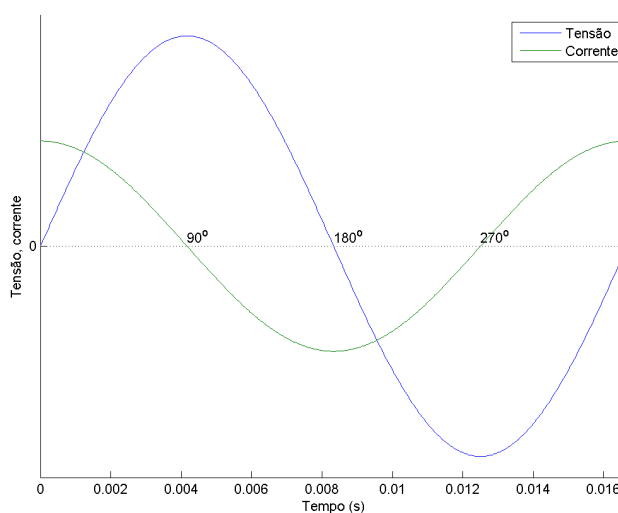


Figura 2.11: Relação entre tensão e corrente em um capacitor.

Em notação fasorial, teremos

$$\dot{V} = \frac{\dot{I}}{\omega C / 90^\circ} = \frac{\dot{I}}{\omega C} / -90^\circ = -j \frac{\dot{I}}{\omega C} = \frac{\dot{I}}{j\omega C} \quad (2.44)$$

Logo a impedância de um capacitor possuirá somente uma parte imaginária, o que indica que armazena energia.

Esta parcela de “capacitância pura” também pode ser chamada de reatância capacitiva:

$$X_C = -\frac{1}{\omega C} \quad (2.45)$$

$$\dot{V} = jX_C \dot{I} \quad (2.46)$$

2.5.5 Indutância

De forma similar, o indutor armazena corrente, e a tensão será proporcional à variação de corrente:

$$i = I_{max} \sin(\omega t) \quad (2.47)$$

$$v = L \frac{di}{dt} = L\omega I_{max} \cos(\omega t) = L\omega I_{max} \sin(\omega t + 90^\circ) \quad (2.48)$$

Logo o indutor *atrasa a corrente em relação à tensão*, conforme ilustra a figura 2.12.

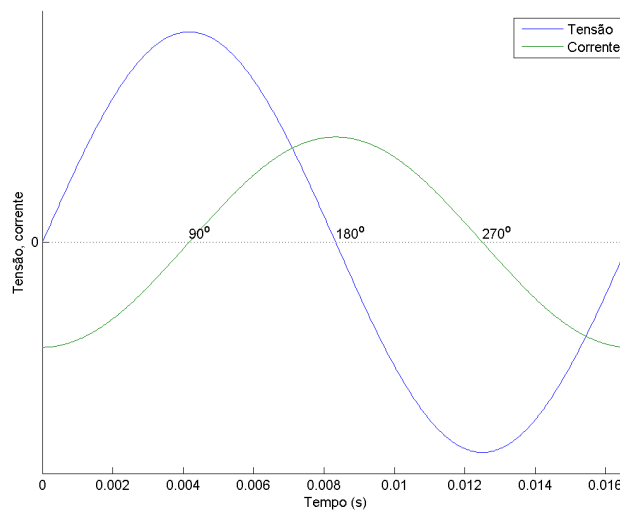


Figura 2.12: Relação entre tensão e corrente em um indutor.

Em notação fasorial:

$$\dot{V} = \omega L \dot{I} / 90^\circ = j \omega L \dot{I} \quad (2.49)$$

Esta parcela de "indutância pura" também pode ser chamada de reatância indutiva:

$$X_L = \omega L \quad (2.50)$$

$$\dot{V} = jX_C \dot{I} \quad (2.51)$$

2.6 Análise de Circuitos de Corrente Alternada

A partir da aplicação da análise fasorial, o cálculo de circuitos CA torna-se mais prático. Lembrando-se que este método é válido somente para circuitos lineares, com grandezas senoidais na mesma frequência.

2.6.1 Uma consideração

Da forma como foi explicado anteriormente, pressupõe-se que o módulo do fasor seja o seu valor de pico. Porém, é comum usar os valores eficazes (RMS) de tensão e corrente, pois desta forma podemos calcular diretamente a potência no circuito (conforme será visto adiante).

2.6.2 Circuitos resistivos

Uma resistência não altera a fase de uma grandeza, logo seu cálculo é direto, seguindo a lei de Ohm.

2.6.3 Circuitos indutivos

2.6.3.1 Indutância pura⁴

Ao aplicar uma tensão no indutor, a corrente será defasada em -90° , ou seja, em atraso. Logo, o indutor estará “segurando” a corrente.

2.6.3.2 Circuito RL série

Neste caso a corrente no resistor e no indutor será a mesma.

$$\dot{Z} = R - jX_L = R - j\omega L \quad (2.52)$$

$$\dot{I} = \frac{\dot{V}}{\dot{Z}} = \frac{V/0^\circ}{Z/\theta} = \frac{V}{Z} / -\theta = I / -\theta \quad (2.53)$$

O ângulo θ dependerá da relação entre o resistor e o indutor.

$$\theta = \tan^{-1} \frac{X_L}{R} = \tan^{-1} \frac{\omega L}{R} \quad (2.54)$$

Agora, calculada a corrente, determinamos as tensões em cada componente:

$$\dot{V}_R = R\dot{I} = RI / -\theta \quad (2.55)$$

$$\dot{V}_L = jX_L\dot{I} = X_L/90^\circ (I / -\theta) = IX_L / -\theta + 90^\circ \quad (2.56)$$

Perceba que as tensões do resistor e do indutor *não estão em fase*. O diagrama fasorial ilustra o resultado, concluindo que $\dot{V} = \dot{V}_R + \dot{V}_L$ e esta é uma soma *fasorial*.

⁴Trata-se de um circuito hipotético, pois toda indutância possui, pelo menos, a resistência do próprio fio.

2.6.3.3 Circuito RL paralelo

Neste caso a tensão é igual nos dois componentes. Calcula-se a corrente em cada um:

$$\dot{I}_R = \frac{\dot{V}}{R} = \frac{V}{R} / 0^\circ \quad (2.57)$$

$$\dot{I}_L = \frac{\dot{V}}{\dot{Z}_L} = \frac{\dot{V}}{j X_L} = \frac{V/0^\circ}{X_L/90^\circ} = \frac{V}{X_L} / -90^\circ \quad (2.58)$$

A corrente total será a soma fasorial das correntes:

$$\dot{I} = \dot{I}_R - \dot{I}_L = \frac{V}{R} / 0^\circ - \frac{V}{X_L} / -90^\circ = \frac{V}{R} - j \frac{V}{X_L} \quad (2.59)$$

$$\dot{I} = V \left(\frac{1}{R} - j \frac{1}{X_L} \right) \quad (2.60)$$

A corrente terá um ângulo igual a

$$\theta = \tan^{-1} - \frac{1/X_L}{1/R} = \tan^{-1} - \frac{R}{X_L} \quad (2.61)$$

2.6.4 Circuitos capacitivos

2.6.4.1 Capacitância pura

Um circuito hipotético, pois toda capacitância possui, pelo menos, uma resistência do próprio fio.

Ao aplicar uma tensão no capacitor, a corrente será defasada em 90° , ou seja, em avanço. Ou seja, a corrente aparece antes de haver tensão no capacitor, pois ele ainda estará carregando.

2.6.4.2 Circuito RC série

Seguindo a mesma analogia do circuito RL:

$$\dot{Z} = R + j X_C = R - j \frac{1}{\omega C} \quad (2.62)$$

$$\dot{I} = \frac{\dot{V}}{\dot{Z}} = \frac{V/0^\circ}{Z/\theta} = \frac{V}{Z} / -\theta = I / -\theta \quad (2.63)$$

$$\theta = \tan^{-1} \frac{X_C}{R} = \tan^{-1} \frac{-1/\omega C}{R} = \tan^{-1} - \frac{1}{\omega R C} \quad (2.64)$$

O ângulo θ será negativo, logo o ângulo da corrente será positiva, ou seja, em avanço.

Calcula-se as tensões:

$$\dot{V}_R = R \dot{I} = R I / -\theta \quad (2.65)$$

$$\dot{V}_C = j X_C \dot{I} = (X_C / 90^\circ) I / -\theta \quad (2.66)$$

$$\dot{V}_C = \left(-\frac{1}{\omega C} / 90^\circ \right) I / -\theta = \frac{I}{\omega C} / 90^\circ - \theta \quad (2.67)$$

2.6.4.3 Circuito RC paralelo

Para o paralelo, segue-se a mesma filosofia. Agora a tensão é conhecida, e procura-se as correntes em cada elemento.

$$\dot{I}_R = \frac{\dot{V}}{R} = \frac{V}{R} / 0 \quad (2.68)$$

$$\dot{I}_C = \frac{\dot{V}}{\dot{Z}_C} = \frac{\dot{V}}{jX_C} = \frac{V/0}{X_C / -90^\circ} = \frac{V}{X_C} / 90^\circ \quad (2.69)$$

A corrente total será a soma fasorial das correntes:

$$\dot{I} = \dot{I}_R + \dot{I}_C = \frac{V}{R} / 0 + \frac{V}{X_C} / 90^\circ = \frac{V}{R} + j \frac{V}{X_C} \quad (2.70)$$

$$\dot{I} = V \left(\frac{1}{R} + j \frac{1}{X_C} \right) \quad (2.71)$$

A corrente terá um ângulo igual a

$$\theta = \tan^{-1} \frac{1/X_C}{1/R} = \tan^{-1} \frac{R}{X_C} \quad (2.72)$$

2.6.5 Associação de impedâncias

A associação de impedâncias segue a mesma regra da associação de resistores em um circuito CC, mas utilizando-se de álgebra de números complexos:

2.6.5.1 Série:

$$\dot{Z}_{eq} = \dot{Z}_1 + \dot{Z}_2 + \dots + \dot{Z}_n \quad (2.73)$$

2.6.5.2 Paralelo:

$$\frac{1}{\dot{Z}_{eq}} = \frac{1}{\dot{Z}_1} + \frac{1}{\dot{Z}_2} + \dots + \frac{1}{\dot{Z}_n} \quad (2.74)$$

O inverso da impedância é chamado de admitância. O inverso da reatância é chamado de susceptância. Ambos tem como medida o siemens (símbolo S).

2.6.6 Circuitos RLC

A combinação dos três elementos básicos permite o estudo de oscilações.

2.6.6.1 Circuito LC série (hipotético)

Suponha um indutor e um capacitor em uma associação série. As reatâncias do indutor e do capacitor são variáveis pela frequência:

$$X_C = -\frac{1}{\omega C} \quad (2.75)$$

$$X_L = \omega L \quad (2.76)$$

Haverá uma determinada frequência no qual as reatâncias irão se igualar, logo:

$$\dot{Z}_L = j X_L \quad (2.77)$$

$$\dot{Z}_C = j X_C \quad (2.78)$$

$$\dot{Z}_{eq} = \dot{Z}_C + \dot{Z}_L \quad (2.79)$$

$$\dot{Z}_C = -\dot{Z}_L \quad (2.80)$$

$$\dot{Z}_{eq} = 0 \quad (2.81)$$

Neste ponto dizemos que o circuito está em ressonância. O que significa que o indutor está em uma troca de energia direto com o capacitor, no qual um anula o outro no circuito. Este estado pode ou não ser desejável. Um exemplo de uso de ressonância é na transmissão de ondas eletromagnéticas (rádio, TV, celular).

A frequência de ressonância de um circuito pode ser calculada:

$$X_L = X_C \quad (2.82)$$

$$\omega L = \frac{1}{\omega C} \quad (2.83)$$

$$\omega^2 = \frac{1}{LC} \quad (2.84)$$

$$\omega = \frac{1}{\sqrt{LC}} \quad (2.85)$$

ou

$$f = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \quad (2.86)$$

2.6.6.2 Circuito LC paralelo (hipotético)

Neste caso ocorre o contrário:

$$\frac{1}{\dot{Z}_{eq}} = \frac{1}{\dot{Z}_C} + \frac{1}{\dot{Z}_L} = \frac{\dot{Z}_C + \dot{Z}_L}{\dot{Z}_C \dot{Z}_L} \quad (2.87)$$

$$\dot{Z}_{eq} = \frac{\dot{Z}_C \dot{Z}_L}{\dot{Z}_C + \dot{Z}_L} \quad (2.88)$$

$$\dot{Z}_C = -\dot{Z}_L \quad (2.89)$$

Logo ocorre uma divisão por zero:

$$\dot{Z}_{eq} \rightarrow \infty \quad (2.90)$$

Neste caso as energias são trocadas entre o indutor e o capacitor, mas agora impedindo que haja corrente circulando!

2.6.6.3 Circuito RLC série

A inserção de um elemento resistivo indica o ponto de saída da energia.

$$\dot{Z}_{eq} = \dot{Z}_R + \dot{Z}_L + \dot{Z}_C \quad (2.91)$$

Aqui o circuito pode estar em três situações:

- Predominantemente capacitivo: $|X_C| > |X_L|$
- Predominantemente indutivo: $|X_L| > |X_C|$
- Resistivo ou em ressonância: $|X_C| = |X_L|$, e em consequência:

$$\dot{Z}_{eq} = \dot{Z}_R \quad (2.92)$$

Este estado varia conforme a frequência varia:

- quanto maior a frequência, maior a reatância indutiva e menor a reatância capacitiva,
- quanto menor a frequência, menor a reatância indutiva e maior a reatância capacitiva.

Pode-se perceber que a corrente será máxima quando o circuito encontra-se em ressonância.

2.6.6.4 Circuito RLC paralelo

De forma análoga:

$$\frac{1}{\dot{Z}_{eq}} = \frac{1}{\dot{Z}_R} + \frac{1}{\dot{Z}_L} + \frac{1}{\dot{Z}_C} \quad (2.93)$$

2.6.6.5 Circuitos mistos

A partir destas configurações vistas nas seções anteriores, é possível compreender o comportamento de circuitos mistos. Com o uso do método fasorial, basta realizar o cálculo da impedância equivalente da mesma forma que na corrente contínua. Os efeitos de cada configuração são totalmente diversificados!

De fato, espera-se que o aluno não se preocupe em decorar cada tipo de circuito, basta entender o método fasorial e a álgebra complexa, que serão válidos para qualquer circuito em CA.

2.7 Exemplos

2.7.1 Primeiro exemplo

Calcule a corrente fornecida pela fonte no circuito da figura 2.13, considerando uma frequência de 60 Hz.

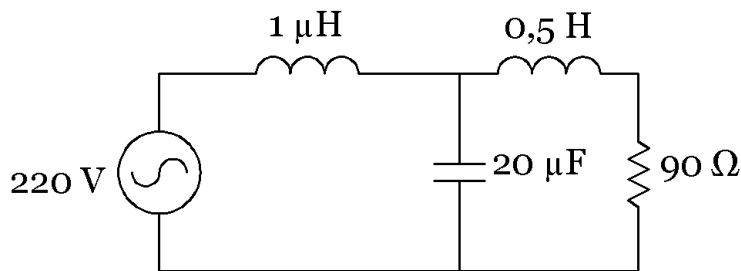


Figura 2.13: Primeiro exemplo

Considerações: o indutor de $1 \mu\text{H}$ será de valor desprezível a 60 Hz, perto dos outros elementos do circuito (calcule e confira).

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

$$\dot{Z}_R = R = 90 \Omega$$

$$\dot{Z}_L = j\omega L = j \cdot 377 \cdot 0,5 = j188,5 \Omega$$

$$\dot{Z}_C = -j \frac{1}{\omega C} = -j \frac{1}{377 \cdot 20 \cdot 10^{-6}} = -j132,62 \Omega$$

$$\dot{Z}_{eq1} = \dot{Z}_R + \dot{Z}_L = 90 + j188,5 \Omega = 208,88 / 64,48^\circ \Omega$$

Lembrando que para somar e subtrair, usar os complexos em forma retangular, e para multiplicar e dividir, usar os complexos em forma polar.

$$\dot{Z}_{eq} = \dot{Z}_{eq1} \parallel \dot{Z}_C = \frac{\dot{Z}_{eq1} \dot{Z}_C}{\dot{Z}_{eq1} + \dot{Z}_C} = \frac{208,88/64,48^\circ \cdot 132,62/-90^\circ}{90 + j188,5 - j132,62}$$

$$\dot{Z}_{eq} = \frac{27702/25,52^\circ}{90 + j55,88} = \frac{27702/25,52^\circ}{105,94/31,84^\circ} = 261,49/-57,36^\circ \Omega$$

$$\dot{i} = \frac{\dot{V}}{\dot{Z}} = \frac{220/0^\circ}{261,49/-57,36^\circ} = 0,8413/57,36^\circ \text{ A}$$

Como desprezamos o indutor de $1 \mu\text{H}$, a tensão sobre o capacitor será igual a 220 V. Caso contrário, deveríamos calcular a queda de tensão no indutor e verifica o que sobra para o resto do circuito.

$$\dot{V}_C = 220/0^\circ \text{ V}$$

Podemos calcular a corrente no capacitor:

$$\dot{I}_C = \frac{\dot{V}_C}{\dot{Z}_C} = \frac{220/0^\circ}{132,62/-90^\circ} = 1,6589/90^\circ \text{ A}$$

A tensão sobre o braço RL também será de 220 V, pois está em paralelo com o capacitor. Podemos calcular a corrente, apelidando-a de \dot{I}_1 .

$$\dot{I}_1 = \frac{\dot{V}}{\dot{Z}_{eq1}} = \frac{220/0^\circ}{208,88/64,48^\circ} = 1,0532/-64,48^\circ \text{ A}$$

Como forma de verificação, assim como temos na corrente contínua, a relação $\dot{I} = \dot{I}_C + \dot{I}_1$ deve ser verdadeira! Verifique, lembrando de passar para a forma retangular.

Para completar a análise, temos as quedas de tensão no resistor e no indutor. Eles compartilham a mesma corrente \dot{I}_1 .

$$\dot{V}_R = \dot{I}_1 \cdot \dot{Z}_R = 1,0532/-64,48^\circ \cdot 90 = 94,7898/-64,48^\circ \text{ V}$$

$$\dot{V}_L = \dot{I}_1 \cdot \dot{Z}_L = 1,0532/-64,48^\circ \cdot 188,5/90^\circ = 198,5319/25,52^\circ \text{ V}$$

Novamente, como verificação, a relação $\dot{V} = \dot{V}_R + \dot{V}_L$ deve ser verdadeira.

Capítulo 3

Potência e energia

3.1 Introdução

A potência é a questão da maioria dos circuitos elétricos. Percebe-se que somente a resistência consome energia, os outros elementos, capacitores e indutores, armazenam energia em um momento, lançando de volta para o circuito no instante seguinte.

3.1.1 Potência em circuitos resistivos

Já sabemos que, em uma resistência, tensão e corrente estão em fase:

$$v(t) = V \sin \omega t \quad (3.1)$$

$$i(t) = I \sin \omega t \quad (3.2)$$

$$p(t) = v(t) \cdot i(t) = V I \sin^2 \omega t \quad (3.3)$$

Analisando, percebe-se que a potência sempre será positiva.

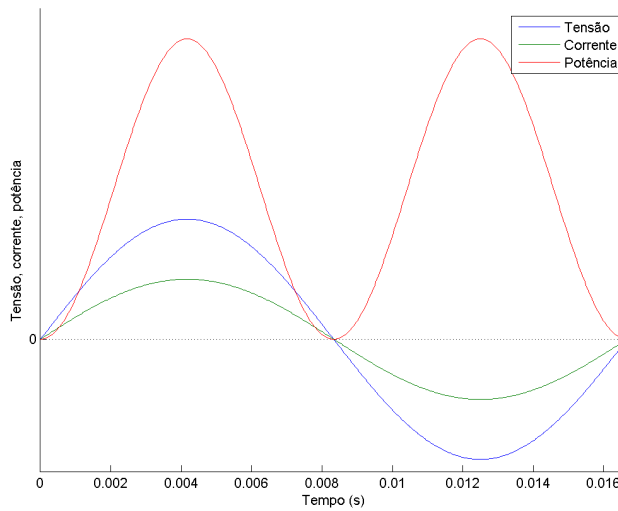


Figura 3.1: Potência em um circuito resistivo

3.1.2 Potência em circuitos reativos

Neste caso, tensão e potência possuem uma diferença de fase:

$$v(t) = V \sin \omega t \quad (3.4)$$

$$i(t) = I \sin(\omega t + \phi) \quad (3.5)$$

$$p(t) = V I \sin(\omega t) \sin(\omega t + \phi) \quad (3.6)$$

Esta diferença de fase fará com que parte da potência seja negativa, ou seja, parte da energia retorna ao circuito. Quanto maior for o ângulo de fase, maior será o retorno. No caso extremo, uma diferença de fase de 90° , *toda a potência retorna e nada é consumido*.

A potência reativa é indesejável, mas ela é parte integrante de qualquer circuito magnético, aonde está incluso a grande maioria dos motores elétricos, largamente utilizados na indústria. É um fenômeno que devemos conviver.

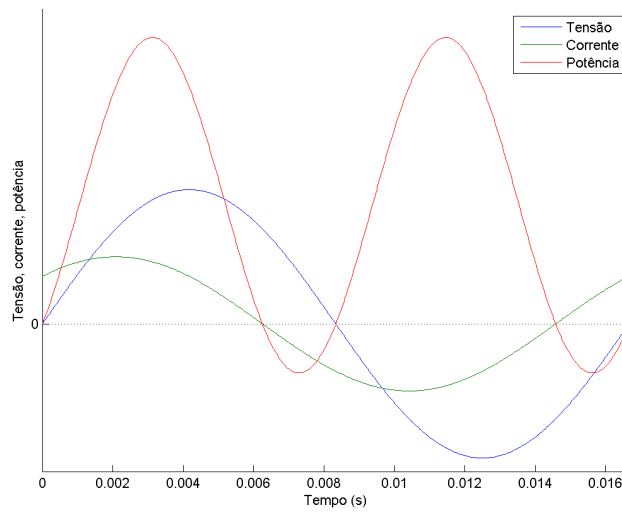


Figura 3.2: Potência com defasagem de 45° entre tensão e corrente

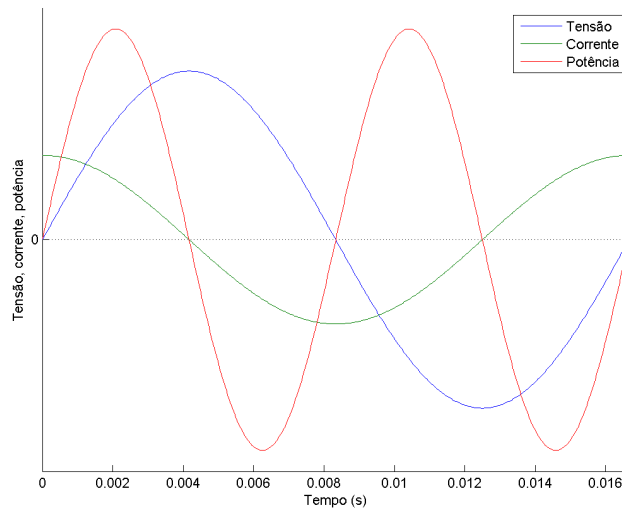


Figura 3.3: Potência com defasagem de 90° entre tensão e corrente

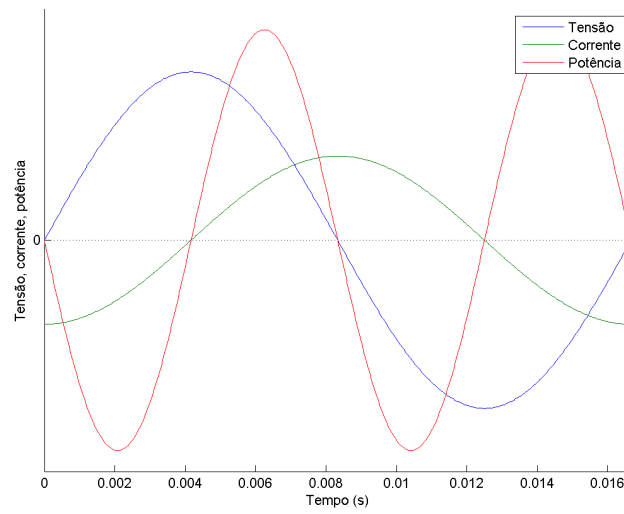


Figura 3.4: Potência com defasagem de -90° entre tensão e corrente

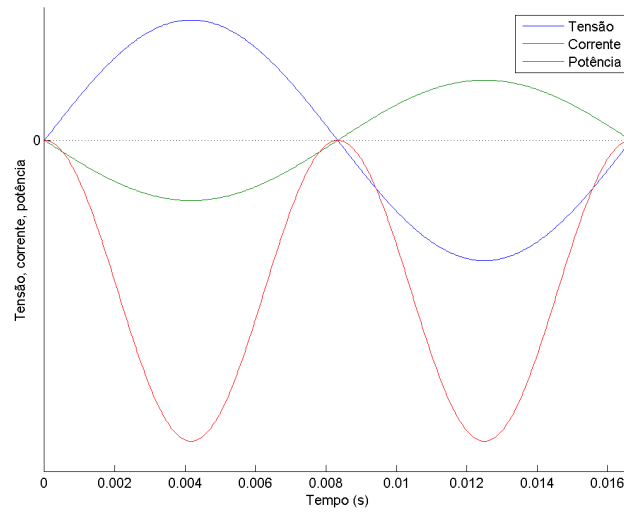


Figura 3.5: Potência com defasagem de 180° entre tensão e corrente

3.2 Tipos de Potência

Para simplificar os estudos e compatibilizar com o método fasorial, a potência em um circuito pode ser dividida em três partes:

- Potência ativa: a potência consumida por resistores, expressa em watt (W).

$$P = R I^2 \quad (3.7)$$

- Potência reativa: a potência que retorna dos indutores e capacitores, expressa em volt ampere reativo (Var). A equação é similar, trocando somente a resistência pela reatância (capacitiva ou indutiva).

$$Q = X I^2 \quad (3.8)$$

Neste caso teremos uma potência reativa positiva, proveniente dos circuitos indutivos ($X > 0$) e uma potência reativa negativa, proveniente dos circuitos capacitivos ($X < 0$). Logo, a combinação de indutores e capacitores permite que *um absorva a potência reativa do outro*.

- Potência aparente: a potência ativa e reativa combinada, expressa em volt ampere (VA).

$$\dot{S} = \dot{Z} I^2 \quad (3.9)$$

A potência aparente é o produto da tensão e corrente¹, em forma complexa:

$$\dot{S} = \dot{V} \dot{I} \quad (3.10)$$

O módulo da potência aparente é a multiplicação dos módulos da tensão e corrente:

$$S = V I \quad (3.11)$$

Desenvolvendo:

$$S = Z I^2 = (R + j X) I^2 = R I^2 + j X I^2 = P + j Q \quad (3.12)$$

A potência aparente será, então, um número complexo, no qual a parte real será a potência ativa e a parte imaginária a potência reativa.

3.2.1 Triângulo de potências

As três potências se relacionam pelo triângulo:

$$S^2 = P^2 + Q^2 \quad (3.13)$$

¹A rigor, multipla-se a tensão pelo conjugado da corrente: $\dot{S} = \dot{V} \dot{I}^*$

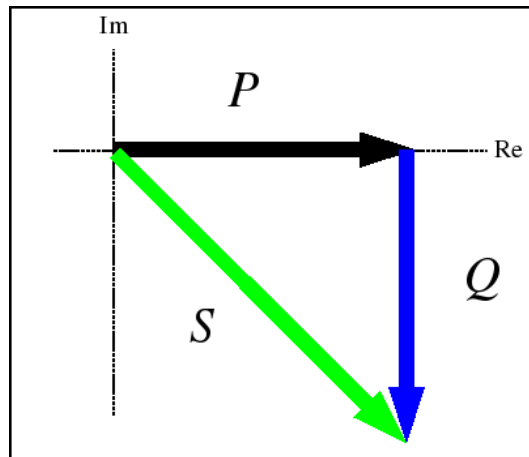


Figura 3.6: Relação entre potências

O ângulo da potência aparente será o mesmo ângulo da impedância. As potências ativa e reativa podem ser calculadas a partir deste ângulo:

$$P = S \cos \phi \quad (3.14)$$

$$Q = S \sin \phi \quad (3.15)$$

Esta relação é mesma vista para números complexos.

3.3 Fator de Potência

O fator de potência é usado para determinar se um circuito está com muita potência reativa. A potência reativa “puxa” muita corrente, mas esta potência não realiza nenhum trabalho! A corrente acaba aquecendo cabos e sobrecarregando circuitos, havendo portanto um desperdício de energia.

O fator de potência é a relação entre a potência ativa e a potência aparente. Graficamente, verifica-se que o fator de potência é o cosseno do ângulo da impedância.

$$\cos \phi = \frac{P}{S} \quad (3.16)$$

Percebe-se que um fator de potência baixo é sinal de um alto reativo, ou seja, a energia não está sendo devidamente aproveitada. Um fator de potência unitário significa que o circuito é resistivo, ou seja, toda a potência está sendo consumida.

Na indústria, o fator de potência é uma medida importante pois ele é *tarifado*. Um consumidor que deixa o fator de potência baixo sofre multas, pois está solicitando corrente da concessionária somente para reativos. Cada empresa distribuidora de energia possui seus critérios de uso de potência reativa.

3.4 Medindo a potência

Os aparelhos básicos de medição elétrica são:

- Voltímetro, medindo a tensão V ,
- Amperímetro, medindo a corrente I ,
- Watímetro, medindo a potência ativa P .

Observando que os aparelhos não fornecem as leituras em números complexos. A leitura será o módulo de cada grandeza, não sabemos a princípio os ângulos. Mas, a partir destes três aparelhos, pode-se levantar as outras grandezas do circuito.

A potência aparente:

$$S = V I \quad (3.17)$$

O fator de potência:

$$\cos \phi = \frac{P}{S} \quad (3.18)$$

A potência reativa:

$$Q = \sqrt{S^2 - P^2} \quad (3.19)$$

A resistência:

$$R = \frac{V^2}{P} \quad (3.20)$$

ou

$$R = \frac{P}{I^2} \quad (3.21)$$

A reatância:

$$X = \frac{V^2}{Q} \quad (3.22)$$

ou

$$X = \frac{Q}{I^2} \quad (3.23)$$

A impedância do circuito:

$$Z = R \pm j X \quad (3.24)$$

Agora, não é possível, com estas três medições, determinar se a carga é indutiva ou capacitiva. Para o exemplo acima, tanto para X positivo ou negativo, os resultados serão os mesmos.

Em instalação mais completas, são utilizados medidores de potência reativa, fator de potência, frequência, etc. Atualmente existem centrais microprocessadas para a medição de diversas grandezas elétricas.

3.5 Compensação de reativos em uma instalação

As indústrias em geral possuem instalações essencialmente indutivas, representadas pelos motores elétricos e iluminação fluorescente. Logo, o fator de potência das indústrias é baixo. Por determinação dos órgãos reguladores, o fator de potência de uma instalação industrial deve estar acima de 0,85 indutivo (ou 0,92 dependendo da concessionária).

Para compensação dos reativos dos indutores, é necessário instalar capacitores para absorver a potência reativa. A relação, de forma aproximada, é simples: para absorver, por exemplo, 100 kVar de reativo, é necessário um banco de capacitores que produza -100 kVar.

Capítulo 4

Sistemas Trifásicos

4.1 Introdução

Os sistemas trifásicos é uma maneira de otimizar a geração e transmissão de energia elétrica. Um gerador trifásico possui três saídas, cada uma com a mesma tensão mas com ângulos de fase diferentes:

$$\dot{V}_a = V/\underline{0^\circ} \quad (4.1)$$

$$\dot{V}_b = V/\underline{120^\circ} \quad (4.2)$$

$$\dot{V}_c = V/\underline{-120^\circ} \quad (4.3)$$

Estas tensões são chamadas de tensões de fase.

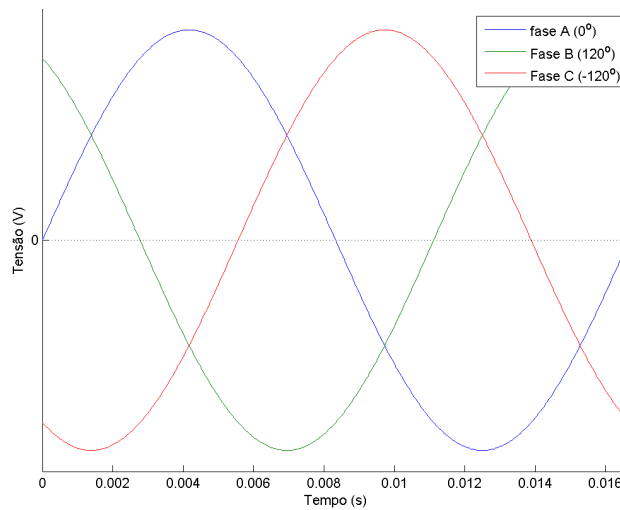


Figura 4.1: Gráfico das tensões de um sistema trifásico

Estas três tensões referem-se a um ponto “neutro”, no qual definimos como referência ($0V$). Este ponto, em geral, é aterrado.

Se ligarmos uma carga entre duas fases, teremos uma diferença de potencial, por exemplo:

$$\dot{V}_{ab} = \dot{V}_a - \dot{V}_b = V/\underline{0^\circ} - V/\underline{120^\circ} = V - V \left(-\frac{1}{2} + j\frac{\sqrt{3}}{2} \right) \quad (4.4)$$

$$\dot{V}_{ab} = V \left(\frac{3}{2} - j\frac{\sqrt{3}}{2} \right) = \sqrt{3} V/\underline{-30^\circ} \quad (4.5)$$

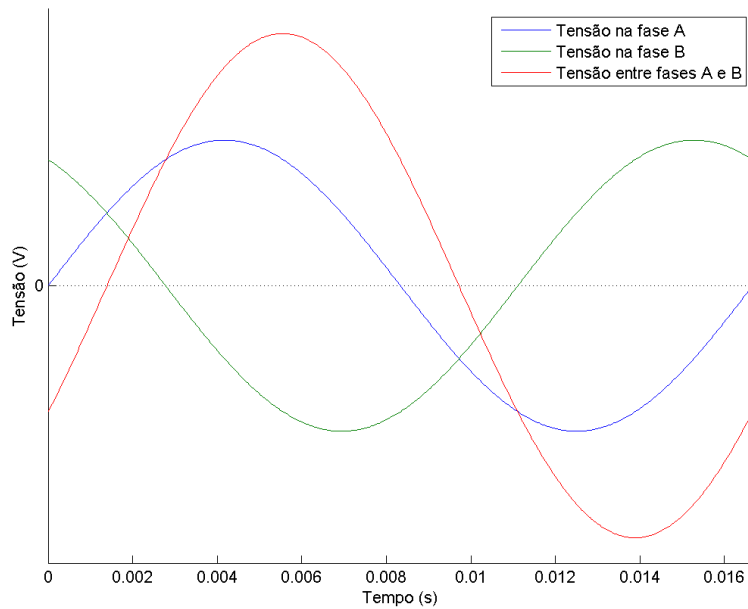


Figura 4.2: Relação entre tensões fase-neutro e fase-fase

Estas são as chamadas *tensões de linha*, ou *tensões entre fases*. A relação entre os módulos das tensões de linha e de fase é

$$V_L = \sqrt{3}V_F \quad (4.6)$$

Usualmente as fases são indicadas por uma seqüência de letras, como “ABC” ou “RST”.

Uma instalação trifásica típica é ilustrada na figura abaixo.

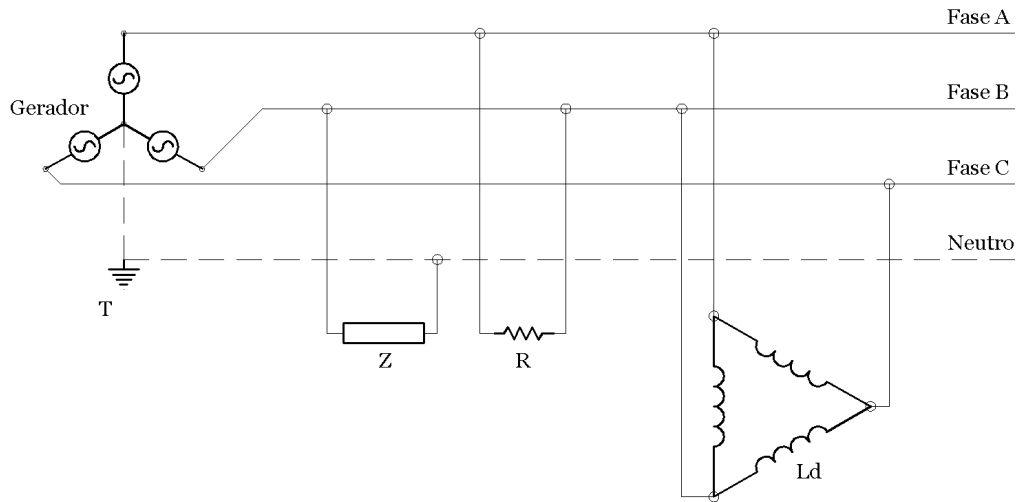


Figura 4.3: Exemplo de sistema trifásico

A figura mostra vários aspectos:

- Uma geração em estrela, com neutro aterrado. Este procedimento é típico como forma de referência elétrica e possibilitar o uso de proteções contra correntes de fuga (como ocorre em choques elétricos). Pode-se também não aterrar o neutro, ou aterrá-lo através de uma impedância. Estes métodos não serão objeto de estudo.
- Uma carga genérica Z, ligada entre a fase B e o neutro.
- Uma resistência R, ligada entre a fase A e B.
- Uma carga trifásica Ld, composta por indutores, ligada em delta. Nada impede, a princípio, o uso conjunto de equipamentos em delta ou em estrela, desde que as tensões dos equipamentos sejam compatíveis.

4.2 Transmissão e distribuição

Do gerador pode-se transmitir a energia somente com três condutores, mas usualmente a distribuição é feita com quatro condutores (3 fases e o neutro). Porque?

Uma das vantagens do sistema trifásico é que podemos usar cargas trifásicas (como motores) e cargas monofásicas (como em residências).

O sistema secundário de distribuição é realizado em 127/ 220 V, ou seja, a tensão de fase é 127 V (ou tensão fase-neutro) e a tensão de linha (fase-fase ou entre fases) é de 220 V. Desta forma, em uma mesma instalação, podemos ter cargas monofásicas de 127 V e 220 V e cargas trifásicas 127/ 220 V.

4.2.1 Configurações delta e estrela

Em um sistema trifásico, podemos montar cargas e geradores basicamente de duas formas:

- Estrela: cada componente é ligado entre uma fase e o neutro, formando um “Y”. Os componentes estarão na tensão de fase-neutro. Se a carga for equilibrada, não é necessário usar o neutro, pois sua corrente será zero. Entretanto, na prática sempre haverá pequenos desequilíbrios, fazendo a necessidade de haver o neutro.

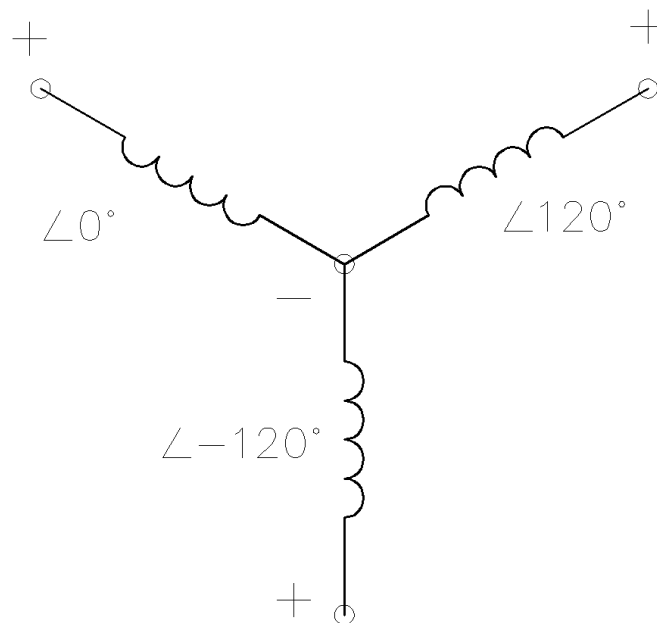


Figura 4.4: Ligação em estrela (ou Y)

Delta: cada componente é ligado entre duas fases, formando um triângulo. Os componentes estarão na tensão de linha (entre fases). O neutro não é usado na configuração delta.

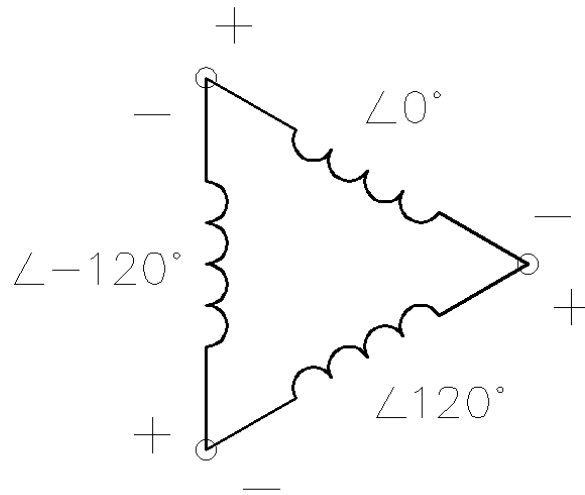


Figura 4.5: Ligação em delta (ou triângulo)

Cada montagem possui suas vantagens, como por exemplo, um gerador montado em delta pode funcionar somente com duas “unidades”.

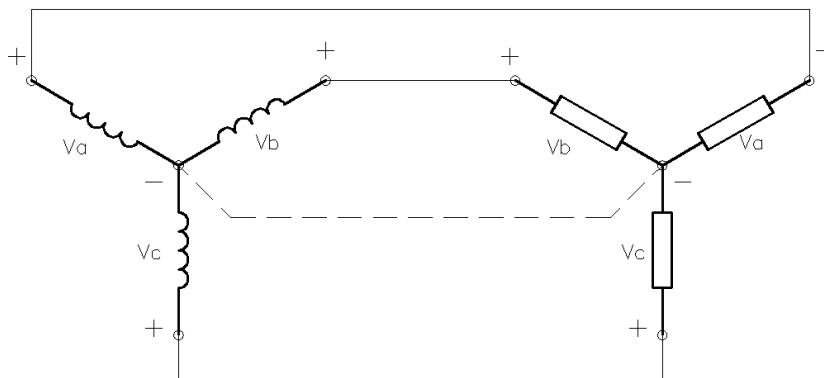


Figura 4.6: Exemplo de ligação estrela-estrela

4.2.2 Sistemas equilibrados

Um sistema trifásico pode ser equilibrado ou desequilibrado. Uma carga, em delta ou estrela, composta por impedâncias iguais, é um sistema equilibrado. Neste caso, considerando um gerador da mesma forma equilibrado, irá fornecer um conjunto de três correntes, no qual serão defasadas entre si em 120° .

$$\dot{I}_a = I/\underline{\theta} \quad (4.7)$$

$$\dot{I}_b = I/\underline{\theta + 120^\circ} \quad (4.8)$$

$$\dot{I}_c = I/\underline{\theta - 120^\circ} \quad (4.9)$$

Na figura 4.6 o neutro é marcado como “opcional”, pois em um sistema trifásico equilibrado (as cargas iguais), no ponto do neutro, teremos uma soma das três correntes.

$$\dot{I}_n = \dot{I}_a + \dot{I}_b + \dot{I}_c = 0 \quad (4.10)$$

Esta soma, para um sistema equilibrado, será igual a zero.

A grande vantagem em se estudar um sistema equilibrado é que podemos decompô-lo em três sistemas monofásicos, no qual seus valores serão defasados em 120° .

Em um sistema desequilibrado, a tensão e correntes entre as cargas deve ser calculada considerando-se todo o sistema. Em geral, a corrente do neutro (se houver) será diferente de zero, mas a soma de todas as correntes permanece equilibrada:

$$\dot{I}_a + \dot{I}_b + \dot{I}_c + \dot{I}_n = 0 \quad (4.11)$$

4.3 Potência

A potência fornecida a um circuito trifásico pode ser resumida pela potência fornecida a cada fase. A potência aparente, para uma carga em estrela, é dada por

$$S = 3V_F I_F \quad (4.12)$$

E a potência ativa é igual a

$$P = S \cos \theta = 3V_F I_F \cos \theta \quad (4.13)$$

Usando as tensões de linha (entre fases), a fórmula torna-se

$$P = \sqrt{3}V_L I_F \cos \theta \quad (4.14)$$

Capítulo 5

Tarifação de energia elétrica

5.1 Introdução

Um fator muito importante no dia-a-dia de uma indústria, é o planejamento dos gastos com energia elétrica. Para grandes consumidores, as empresas de energia elétrica abrem algumas categorias.

A tabela abaixo ilustra o consumo estimado de alguns equipamentos comuns. Sabendo-se a potência média, multiplica-se pela duração de uso e número de dias do mês (no exemplo abaixo foi considerado 30 dias).

5.1.1 Curvas de demanda e de energia

Demanda: quantidade de potência sendo solicitada pelo consumidor em um instante. Medido em kW (ou múltiplos¹) a cada 15 minutos.

Energia: quantidade consumida ao longo do dia, ou seja, demanda x tempo. É a integral da curva. Medido em kWh (ou múltiplos).

Atenção! a demanda medida é o valor *máximo* verificado ao longo do mês. Basta deixar os aparelhos ligados por 15 minutos que você pagará a demanda com se estivessem permanecidos ligados o mês todo.

5.1.2 Horário de ponta

O sistema elétrico tem como horário crítico, em dias úteis, em torno de 18 às 22 horas, o que é chamado de horário de ponta. Para isso cada empresa possui uma tarifa diferenciada para o horário de ponta.

O horário de ponta varia para cada empresa de energia, mas consiste em três horas seguidas. Por exemplo, a Light determinou como horário de ponta de 17:30 às 20:30. O horário restante é o “fora de ponta”, com tarifa mais barata.

¹Atenção com valores de tarifas em quilowatt ou megawatt - a diferença é nada menos que 1000 vezes...

Equipamento	Potência (kW)	Estimativa de uso diário (h)	Total (kWh)
Aparelho de som	0,10	1,0	3
Ar condicionado	1,20	7,5	270
Aspirador de pó	0,50	0,6	9
Boiler	1,00	3,0	90
Bomba d'água	0,50	3,0	45
Chuveiro	4,00	1,0	120
Ferro de passar	0,80	0,5	12
Forno elétrico	4,50	0,3	45
Forno microondas	1,20	0,4	13
Freezer	0,50	8,0	120
Lâmpada 60 W	0,06	5,0	9
Lâmpada 100 W	0,10	5,0	15
Lavadora de louça	1,20	1,0	36
Lavadora de roupa	0,80	0,4	9
Microcomputador	0,20	5,0	30
Refrigerador 1 porta	0,35	6,0	63
Refrigerador 2 portas	0,50	6,0	90
Secadora de roupa	2,50	0,6	42
Televisão 14"	0,10	3,0	9
Televisão 20"	0,15	3,0	13
Torneira elétrica	2,80	1,5	126
Ventilador	0,30	2,5	22

Tabela 5.1: Consumos médios mensais de alguns equipamentos domésticos (fonte: “Dicas para Evitar o Desperdício de Energia”, Eletrosul)

5.1.3 Período úmido e período seco

Podem haver diferenças entre tarifas no período seco (maio a novembro) e o período úmido (dezembro a abril).

5.1.4 Contrato de demanda

Cada empresa de grande porte necessita realizar um contrato de demanda, que significa a quantidade de carga instalada neste consumidor.

Este contrato é importante pois a empresa de energia irá dimensionar seu sistema de acordo com o que foi contratado. Caso o consumidor ultrapasse em algum momento esta demanda, ele será multado com uma tarifa de ultrapassagem.

5.1.5 Modalidades de tarifa

- Tarifa convencional: Trata-se da tarifação mais simples:
 - Um preço para demanda
 - Um preço para o consumo

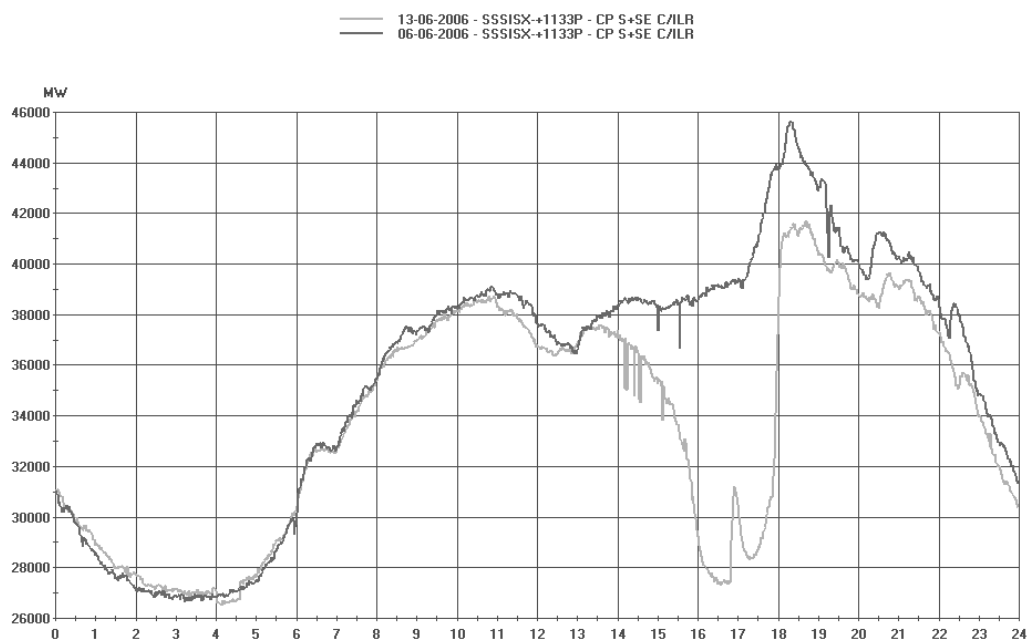


Figura 5.1: Exemplo de curva de demanda em um dia de semana normal e um dia de semana com jogo da Copa do Mundo

- Tarifa azul
 - Preço para demanda no horário de ponta
 - Preço para demanda fora de ponta
 - Preço para o consumo no horário de ponta
 - Preço para o consumo fora de ponta
- Tarifa verde
 - Preço para a demanda
 - Preço para o consumo no horário de ponta
 - Preço para o consumo fora de ponta

5.1.6 Tarifa de ultrapassagem

Tarifa a ser aplicada na parcela de demanda que superar ao contrato. A tarifa é por período, no caso de tarifa azul, ou única para tarifa verde.

5.1.7 Faturamento de energia reativa excedente

A energia reativa, medida em kVARh, também é medida e faturada para grandes consumidores. Em geral incentiva-se que o fator de potência de uma instalação esteja acima de 0,92, no qual:

- No período de 6 às 24 h, será cobrado o excedente reativo indutivo,
- No período de 0 às 6 h, será cobrado o excedente reativo capacitivo.

A demanda e energia reativa excedente será cobrada pela mesma tarifa da energia ativa, de acordo com o período.

FER	Faturamento de energia reativa
FDR	Faturamento de demanda reativa
UFER	Unidade de faturamento de energia reativa
UFDR	Unidade de faturamento de demanda reativa
EREX	Energia reativa excedente
DREX	Demanda reativa excedente

Tabela 5.2: Sopa de letras para tarifação de energia elétrica

5.1.8 Opção para consumidores

Os tipos de tarifas são disponíveis para certos tipos de consumidores:

- Tensão de fornecimento igual ou maior a 69 kV, qualquer demanda: tarifa azul.
- Tensão de fornecimento inferior a 69 kV, demanda igual ou maior a 500 kW: tarifas azul ou verde.
- Tensão de fornecimento inferior a 69 kV, demanda igual ou superior a 50 kW e inferior a 500 kW: tarifas azul, verde ou convencional.

5.2 Estudo de caso

Abaixo temos um exemplo de uma conta de consumidor de classe industrial.



Conta de Energia Elétrica		Nota Fiscal - Série 02		27DB.65F4.F018.339F.94DF.9EF9.DCA6.8D6C								
		Regime Especial/Processo E-34/059 213/04-DEF-03 SEPO - autorização nº 08-2005/0006384-9 LIGHT SERVIÇOS DE ELETRICIDADE S.A. AV. MAL. FLORIANO 168 RIO DE JANEIRO RJ CEP 20080-002 CNPJ 60.444.437/0001-46 INSC. ESTADUAL 81380.023 INSC. MUNICIPAL 00794678		Reservado ao Fisco								
POSTO AAAA FELIZ AV. MMMMM SILVA 395 CNPJ.: 20.688.855/0001-77 EST.: 73.110.941		Nº da Nota Fiscal 2000128	Referência Bancária 20000000000	Código do Cliente 20000000	Código de Instalação 400136905	Ref: Mês/Ano DEZ/2006						
Número da Fatura 50000000000	Leitura Atual 07/12/2006	Leitura Anterior 07/11/2006	Emissão 08/12/2006	Apresentação 13/12/2006	Unidade de Leitura M04 613 01	Nº Eletrobrás 20000007						
Classe INDUSTRIAL	Subgrupo A2	CF 01	Tipo de Fornecimento A2 - AZUL		Fator Pot.Geral	R.T. 1,0%						
Seg. HPT HTF	Demanda - kW Leitura 430,0 575,0		Constante 4,8000 4,8000	Medida 2.084,6 2.787,6	85% Últimos 11 Meses Contratada 2.375,0 3.100,0	DMCR Leitura 1.707,0 2.277,0	Constante 1,2000 1,2000	Medida 2.068,9 2.759,7	Fator de Potência			
Seg. HPT HFP	Consumo - kWh Leitura Atual 736,087 81,016		Leitura Anterior 650,687 71,513	Constante 1,2000 120,0000	UFER Leitura Atual 684 580	Leitura Anterior 136 120,0000	Constante 1,2000 126	Medida 9,211	kVA / kV Leitura Atual 207,451 17,993	Leitura Anterior 180,910 15,543	Constante 1,2000 120,0000	Consumo medido (kVArh)
Registrador / Medidor Tipo MEP-2			Número 5558885	E.C. 530109	ICMS Base de Cálculo (R\$) 390.837,36	Alíquota 30%	Valor já incluído no Preço (R\$) 117.251,20	PIS (Alíquota) 1,130%	COFINS (Alíquota) 5,210%			
DATA PREVISTA PARA PRÓXIMA LEITURA - 05/01/2007												
* O consumidor tem o direito de receber uma compensação quando ocorrer violação dos padrões de continuidade individuais.*												
Nome do Conjunto a que Pertence a unidade Consumidora CENTRO		Indicadores de Continuidade de Fornecimento de Energia Outubro/2006			Débitos Referência / R\$							
Descrição		Apurada	Meta									
Duração de interrupção individual (DIC)		12,53	6,00									
Frequência de interrupção individual (FIC)		1,00	8,00									
Duração máxima de interrupção contínua (DMIC)		0,00	3,00									
Duração equivalente de interrupção (DEC)												
Frequência equivalente de interrupção (FEC)												
Descrição		CFOP	Quantidade	Valor Unitário (R\$)	Valor (R\$)							
DEMANDA		5.257	2.375,0	30,6006283	72.675,15							
DEMANDA FORA PONTA		5.257	3.100,0	5,01099592	15.534,09							
CONSUMO PONTA		5.257	103.505	0,35000000	36.226,75							
CONSUMO FORA PONTA		5.257	1.151.764	0,22269871	256.496,38							
ENERGIA REAT. EXC. PONTA		5.257	126	0,35000000	44,09							
ENERGIA REAT. EXC. FORA PONTA		5.257	9,211	0,22269871	2.051,27							
MULTA POR ATRASO DE PAGAMENTO		0000			7.809,65							
Esta fatura contém R\$ 10.842,46 referentes a PIS e COFINS em decorrência das Leis 10.637/02 e 10.833 e Res ANEEL 241/05.												
AUTENTICAÇÃO MECÂNICA		TOTAL DA NOTA FISCAL R\$	TRIBUTOS RETIDOS R\$	VENCIMENTO	TOTAL A PAGAR R\$							
FATAT		*****390.837,36	*****0,00	20/12/2006	*****390.837,36							
Após o vencimento, haverá multa de 2% a ser cobrada em conta posterior (Portaria DMAEE 436 de 04/12/96) estando o fornecimento passível de suspensão na forma da legislação vigente.												
		479-0	07990.00770 02160.020050 05910.054190 0	00000001344800								
Agência Recebedora PAGÁVEL EM QUALQUER AGÊNCIA BANCÁRIA				Vencimento CONTRA APRESENTAÇÃO								
Cedente LIGHT - SERVIÇOS DE ELETRICIDADE S.A. CNPJ 060.444.437/0001-46				Agência / Código Cedente 7721								

Figura 5.2: Exemplo de conta de energia elétrica (fonte: site da Light)

Capítulo 6

Instalações Elétricas Industriais

6.1 Introdução

Para grandes consumidores, o fornecimento de energia é através de alta tensão (a partir de 13,8 kV). O usuário deve dispor de uma subestação abaixadora para receber a energia elétrica e distribuí-la em seu processo.

6.2 Elementos de uma subestação

6.2.1 Transformador

Elemento central da subestação, converte a tensão de entrada para o nível do usuário.

Pode-se utilizar transformadores trifásicos ou banco de transformadores monofásicos, de acordo com a necessidade.

Em operação normal o transformador necessita de uma forma de resfriamento das suas bobinas e do núcleo, devido ao efeito Joule da passagem de corrente. Isto pode ser feito usando-se um óleo, que tem a função de isolar e resfriar as partes ativas. O equipamento fica imerso em um tanque, no qual dispõe de aletas em o que o óleo circula. Esta circulação pode ser natural, pelo efeito de convecção, ou forçada, através de bombas.

6.2.2 Disjuntor

Elemento de proteção da subestação e de seus ramais. Possui capacidade de interromper correntes elevadas. São associados a relés, no quais comandam a ação do disjuntor.

O disjuntores são classificados pela forma que interrompem a corrente:

- Óleo
- Vácuo
- Ar comprimido

- Hexafluoreto de enxofre (SF₆)

6.2.3 Chave seccionadora

Usado para isolar partes do circuito. Existem chaves para abertura em carga, mas somente o disjuntor deve ser usado para interromper curto-circuitos.

6.2.4 Chave-fusível

Elemento de proteção, como o disjuntor, no qual dispõe de um elemento descartável.

6.2.5 Pára-raio

Elemento que captura eventuais sobrecargas externas (incluindo descargas atmosféricas) escoando para o terra.

6.2.6 Relé

Elemento de detecção, havendo vários tipos. O mais conhecido é o relé de sobrecarga, no qual comanda a ação do disjuntor.

Eventualmente um relé pode estar incorporado no disjuntor. Estes relés incorporados podem ser do tipo térmico (para sobrecarga) ou magnético (para curto-circuito)

6.2.7 Barramento

Elemento de distribuição para os ramais. O barramento de baixa tensão possui uma alta corrente, logo ele consiste de barras de cobre, apoiadas em isoladores.

6.2.8 Transformador de corrente e transformador de potencial

Transformadores específicos para medição. Também são usados para alimentar os relés. Estes transformadores fornecem um fator de escala, diminuindo os valores de tensão e corrente para que os relés e medidores, mais sensíveis, consigam mensurar as grandezas elétricas. Estes transformadores devem ser construídos a fim de não inserir distorções no sinal medido.

6.2.9 Aterramento

Elemento de proteção e referência elétrica, consiste em uma malha situada abaixo da subestação. Um aterramento bem projetado é essencial para o funcionamento correto dos equipamentos.

6.2.10 Medição

São usados, entre outros, voltímetro, amperímetro e wattímetro. Atualmente os aparelhos de medição são microprocessados, com capacidade de armazenamento de todas as grandezas medidas.

6.2.11 Outros elementos

Bucha: usado na passagem de condutores através de paredes, garantindo o isolamento.

Posto de medição: cabine que abriga o aparelho de medição da concessionária. Esta cabine é lacrada, sendo a única parte da subestação que o usuário não tem controle direto. A cabine também pode incluir a proteção da concessionária, como uma chave-fusível, que atuará no caso da proteção do usuário falhar.

Contator: chaves automáticas, usadas para manobra de circuitos. O uso de contadoras permite estabelecer uma lógica de operação, como partida de motores, ligação de banco de capacitores, botoeiras, etc. Os réles também podem controlar as contadoras.

6.3 Proteção de circuitos

A principal meta no projeto de proteção de circuitos é isolar o defeito. Um sistema bem-projetado não deve afetar os circuitos sãos. Isto é chamado de seletividade. As principais falhas e defeitos em um sistema elétrico são listadas abaixo.

6.3.1 Sobrecarga

Uso excessivo de carga acima do projetado. É interrompido por relés térmicos. Deve ser bem projetado para não detectar falsas sobrecargas (por exemplo, partida de motores).

6.3.2 Curto-circuito

Corrente muito acima do normal. É interrompido por relés magnéticos.

6.3.3 Sobretenção

Alteração da tensão devido a diversos fatores, por exemplo descargas atmosféricas na linha da concessionária. Pode queimar equipamentos.

6.3.4 Corrente de fuga (ou residual)

Inclui-se a ocorrência de choque elétrico: Usa-se de dispositivos DR (diferencial-residual) para detectar e interromper o circuito.

6.3.5 Ruído de linha

Interferência na forma de onda da tensão do sistema, deixando de ser puramente senoidal. Pode afetar a operação de equipamentos. Usa-se de estabilizadores e no-breaks.

Capítulo 7

Máquinas elétricas - motores

7.1 Introdução

O motor converte energia elétrica em energia mecânica. Segue o princípio do campo magnético variável produzir força sobre um condutor com corrente.

7.1.1 Detalhes construtivos

- Estator: parte fixa do motor. É constituído de bobinas que produzem o campo magnético.
- Rotor: parte móvel do motor. Pode conter uma bobina ou um ímã permanente.

7.1.2 Motores de corrente contínua

Usados quando se necessita de um controle preciso de velocidade.

7.1.3 Motores de corrente alternada

Motores assíncronos: máquinas que não giram em uma frequência proporcional ao sistema. São de construção simples e largamente usadas na indústria. Também são chamados de motores de indução.

A construção típica de um motor de indução é do tipo “gaiola de esquilo”, no qual os condutores do rotor assemelham-se a uma gaiola.

A rotação dos motores de indução pode ser calculada pelo seu escorregamento. Caso o motor esteja em vazio, sua velocidade será próxima ao do sistema. Quando mais carga, menor a velocidade e maior o escorregamento.

Motores síncronos: máquinas em que giram em uma frequência proporcional ao sistema. Possuem um campo magnético no rotor controlado por uma fonte CC. Este campo pode ser controlado, no qual sua principal aplicação é na absorção de potência reativa

Também podemos dividir os motores CA em:

Motores trifásicos: O uso de três fases permite a configuração de um campo magnético girante no estator, no qual o rotor seguirá naturalmente.

Motores monofásicos: Em motores de indução, a presença de somente uma fase não é suficiente para haver um campo magnético girante, necessário pelo menos para a partida do motor. O principal recurso utilizado é de um enrolamento auxiliar em série com um capacitor, no qual causará uma defasagem suficiente para iniciar o giro.

7.1.4 Motor universal

Possui características construtivas de um motor CC mas ser usado também em CA. Muito usado em aplicações domésticas, como batedeiras, liquidificadores e aspiradores de pó.

7.2 Características de um motor elétrico

7.2.1 Potência

A potência mecânica é usualmente medida em hp (igual a 746 W) ou cv (igual a 736 W).

7.2.2 Torque ou conjugado

- Conjugado nominal
- Conjugado de partida

7.2.3 Velocidade

Medida em rotações por minuto (rpm).

7.2.4 Tensão

7.2.5 Corrente

Além da corrente nominal, o motor possui a corrente de partida (usualmente 7 vezes superior a nominal), que é necessária para vencer a inércia do motor. Ambas as correntes podem ser calculadas pela fórmula

$$I = \frac{P}{V \eta \cos \phi} \quad (7.1)$$

Para sistemas trifásicos:

$$I = \frac{P}{\sqrt{3} V_L \eta \cos \phi} \quad (7.2)$$

7.2.6 Fator de potência

7.2.7 Perdas

A energia elétrica não é totalmente convertida em energia mecânica. Os principais pontos de perda de potência são:

- Perdas por efeito joule nos cabos
- Perdas nos circuitos magnéticos
- Perdas por ventilação acoplada ao eixo
- Perdas por atrito nos mancais

7.3 Projeto de instalações elétricas com motores em partida

Devido à elevada corrente no momento de partida de um motor, e eventualmente em uma condição de rotor preso, a instalação deve suportar certas solicitações.

- A proteção não deve atuar no momento da partida, mas atuar em condições de falha,
- O condutor deve suportar a temperatura,
- A queda de tensão deve ser inferior à permissível, senão o motor não terá força, além de afetar outros equipamentos.

Existem equipamentos que auxiliam a partida de motores, como por exemplo:

Chave estrela-triângulo: através da comutação da forma de interligação das bobinas, o motor recebe menos tensão, partindo gradualmente. Com as bobinas em estrela a tensão é reduzida, comutando automaticamente em delta, para tensão nominal, quando o motor estiver em movimento.

Transformador de partida: fornece uma tensão mais baixa para uma partida suave. Uma chave automática seleciona níveis de transformação até a tensão nominal.

Eletrônica de potência: controla a forma de onda de tensão fornecida, aumentando gradualmente a corrente.

7.4 Partida de motores elétricos

A partida de um motor demanda uma corrente muito acima do normal, geralmente entre 6 a 10 vezes a corrente nominal, durando entre 0,5 a 10 segundos. Para isso, o sistema deve estar projetado para suportar esta partida.

A corrente de partida é um fator de projeto da proteção do circuito. A princípio a potência reativa não é preocupante, pois a partida é muito rápida e não afeta o consumo total.

$$S = \frac{P_m}{\eta \cos \phi} \quad (7.3)$$

$$I = \frac{P_m}{V \eta \cos \phi} \quad (7.4)$$

7.4.1 Circuitos trifásicos com motores

Para o cálculo de motores trifásicos, pode-se considerar a potência dividindo-se em três circuitos monofásicos, com tensão fase-terra. Neste caso o circuito seria do tipo estrela-estrela (vide aula anterior). Como o motor é um circuito equilibrado, não haverá corrente circulando no neutro (caso exista).

7.4.2 Fator de potência de motores

Um motor não necessariamente terá uma carga constante. Para cada nível de carga, suas características podem variar, como por exemplo, o rendimento e o fator de potência. Desta forma podemos pensar que o motor possui um ponto aonde seu desempenho seja ótimo. Este ponto, em geral, será o regime de trabalho nominal do motor.

Capítulo 8

Resumo

8.1 Questionário

Abaixo segue um questionário com os conceitos básicos descritos nesta apostila.

8.1.1 Introdução

1. Explique com suas palavras os conceitos de tensão, corrente e resistência elétrica.

8.1.2 Princípios de corrente alternada

1. Porque a corrente alternada foi escolhida?
2. Explique o princípio do gerador em corrente alternada.
3. Explique o princípio do transformador.
4. Explique o método fasorial, suas vantagens no estudo de sistemas de corrente alternada e uma restrição.

8.1.3 Potência e energia

1. Explique a diferença entre potência ativa, reativa e aparente.
2. Defina fator de potência. Como isto influencia a produção e transmissão de energia elétrica?
3. Cite métodos de reduzir o consumo descontrolado de energia reativa, e eventuais cuidados a se tomar ao usar estes métodos.
4. Cite fontes de “geração” de energia reativa.

8.1.4 Sistemas trifásicos

1. Um electricista lhe explica que as três fases possui a mesma tensão, entretanto existe tensão entre elas. Complete a explicação.

2. Explique as diferenças em usar um sistema trifásico ou três sistemas monofásicos.
3. Esboce os fasores de tensão de um sistema trifásico: fase-neutro e entre fases.
4. Esboce um circuito trifásico, com um gerador ligado em estrela e uma carga em delta. Se cada bobina do gerador produz 1000 V, calcule a tensão na carga.
5. Explique a função do neutro no sistema trifásico. Teoricamente, ele é necessário para um sistema equilibrado? Ele é usado na prática? Porque?

8.1.5 Tarifação

1. Explique a diferença entre demanda e consumo.
2. Cite medidas práticas visando a economia de energia elétrica em uma indústria, conhecendo a curva de carga de energia ativa e reativa e o contrato de demanda.
3. Explique a diferença entre o horário de ponta e fora de ponta.
4. Qual é, aproximadamente, o horário de ponta? Explique porque são usadas tarifas mais elevadas neste horário.
5. Cite os principais parâmetros usados na tarifação de energia elétrica.
6. Descreva o significado de “demanda contratada” e “tarifa de ultrapassagem”. Esboce uma curva de carga como exemplo.

8.1.6 Instalações elétricas industriais

1. Explique as diferenças na aplicação de um disjuntor, chave seccionadora e chave fusível.
2. Explique a função do aterramento.
3. Cite defeitos típicos que podem ocorrer em um sistema de energia elétrica, e os respectivos equipamentos utilizados a minimizá-los.
4. Cite três elementos de proteção elétrica utilizados na indústria, explicando sua função específica (do que eles protegem).

8.1.7 Máquinas elétricas

1. Explique porque a partida de um motor elétrico é uma situação crítica.
2. Explique os possíveis defeitos oriundos de rotores bloqueados e uma forma de evitar tais defeitos.

8.2 Exercícios

Em circuitos de corrente alternada, quando não explicitado, assumir a frequência do gerador como 60 Hz.

8.2.1 Introdução

1. Calcule as correntes e quedas de tensões, em todos os componentes, dos circuitos a seguir.

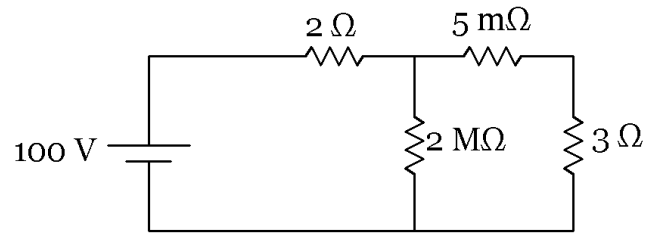


Figura 8.1: Circuito (a)

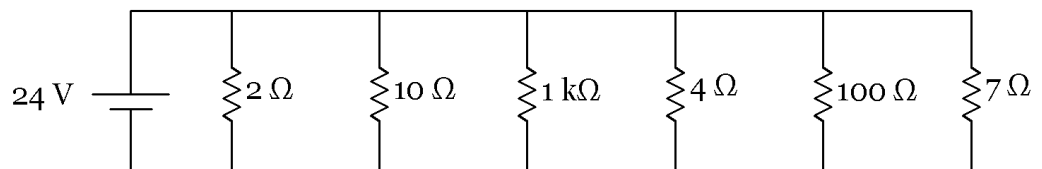


Figura 8.2: Circuito (b)

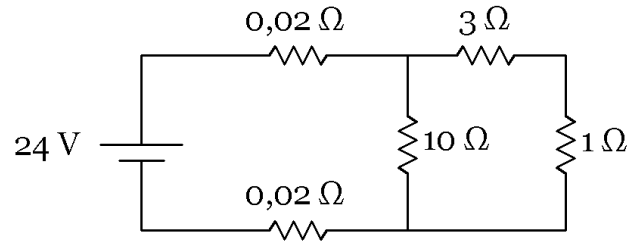


Figura 8.3: Circuito (c)

2. Determine a corrente fornecida pela fonte, nos circuitos a seguir, para as condições de (I) no momento que a chave é fechada, (II) um tempo “considerável” após o fechamento.

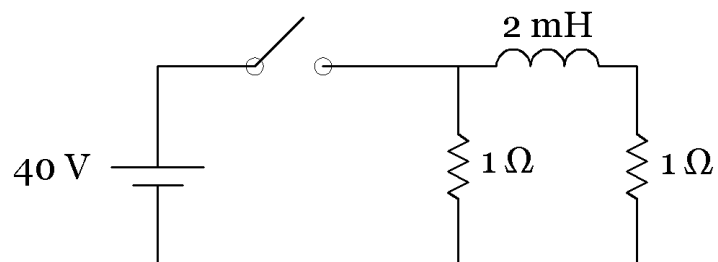


Figura 8.4: Circuito (a)

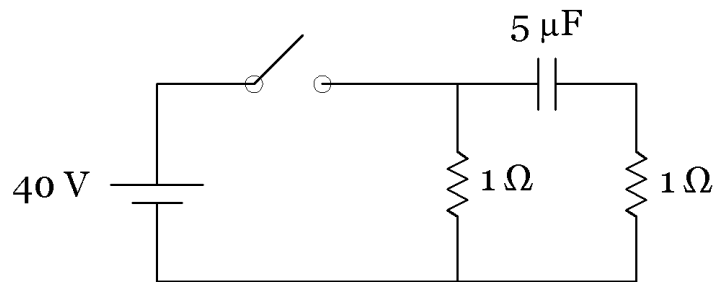


Figura 8.5: Circuito (b)

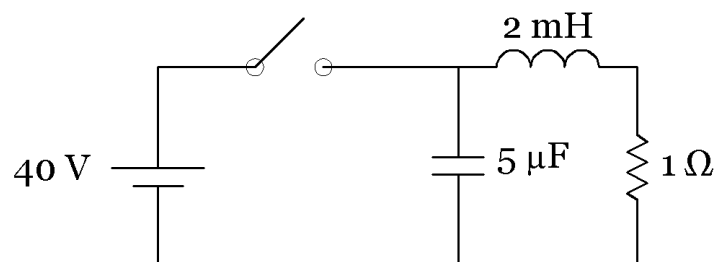


Figura 8.6: Circuito (c)

8.2.2 Princípios de corrente alternada

1. Converter entre notação polar e retangular os números abaixo. Esboçar os números em diagrama fasorial.

- (a) $\dot{A} = 3 + j2$
- (b) $\dot{B} = 200/45^\circ$
- (c) $\dot{C} = -6 - j10$
- (d) $\dot{D} = 0,002 + j5$
- (e) $\dot{E} = -330 + j0,2$
- (f) $\dot{F} = 10$
- (g) $\dot{G} = j3$
- (h) $\dot{H} = -10/ -25^\circ$

(i) $\dot{I} = 1000/\underline{90^\circ}$

(j) $\dot{J} = 2/\underline{0^\circ}$

2. A partir dos números acima, realizar as seguintes operações:

(a) $\dot{A} + \dot{B}$

(b) $\frac{\dot{C}}{\dot{D}}$

(c) $\dot{E} \cdot \dot{F}$

(d) $\dot{G} + \dot{H} \cdot \dot{I} - \dot{J}$

(e) $j\dot{A} + \dot{G}^2 - \frac{1}{\dot{I}}$

3. Calcule a corrente em um circuito série, composto por $R = 12\Omega$, $L = 300 \text{ mH}$, $C = 2,5 \text{ nF}$, alimentado por 450 V .

4. Calcule a frequência de ressonância de um circuito RLC série com $R = 15\Omega$, $L = 100 \text{ mH}$, $C = 500 \mu\text{F}$. Calcule a corrente nesta condição para uma fonte de 200 V .

5. Deseja-se ligar um conjunto de lâmpadas de 60 W em uma rede de 127 V , no qual o circuito possui um disjuntor de 10 A . Calcule o número máximo de lâmpadas que podem ser ligadas sem causar sobrecarga (supondo o disjuntor “ideal”).

6. Esboce os gráficos das seguintes grandezas pela frequência (entre 0 a 100 kHz):

(a) Reatância indutiva, para $L = 1\text{H}$.

(b) Reatância capacitiva, para $C = 5 \mu\text{F}$.

(c) Corrente em um circuito RL, para $L = 1 \text{ mH}$, $R = 10\Omega$, $V = 200 \text{ V}$.

7. A partir dos circuitos apresentados nas figuras 8.4, 8.5 e 8.6, substituir a fonte para 120 V , 60 Hz e, para a condição da chave fechada a um tempo considerável, calcular a corrente total fornecida pelo gerador, a corrente e queda de tensão em cada componente.

8.2.3 Potência e energia

1. Calcule a corrente (módulo e fase) em um banco de capacitores monofásico de 100 kVAr , ligados em uma rede de 380 V .

2. Calcule a potência ativa e reativa de uma carga monofásica com 380 V , 40 A , fator de potência unitário.

3. Calcule a potência ativa e reativa para uma carga monofásica de $4,5/\underline{45^\circ} \Omega$ ligado a uma tensão de 220 V . Calcule o dispositivo que compense totalmente o reativo desta carga.

4. Calcule o fator de potência de uma carga de $10 - j3\Omega$. Verifique o fator de potência de um conjunto de três cargas deste mesmo valor, em paralelo.

8.2.4 Sistemas trifásicos

1. Uma carga trifásica é composta por três elementos idênticos com impedância de $20 + j8\ \Omega$ cada. Calcule a corrente em cada elemento da carga ao ligar em um sistema trifásico, cuja tensão fase-neutro seja de 440 V, em uma configuração (a) delta, (b) estrela.

8.2.5 Tarifação

1. Calcule a conta de luz aproximada de uma empresa com a seguinte utilização de energia:
 - Consumo na ponta: 245 MWh,
 - Consumo fora da ponta: 2450 MWh,
 - Demanda média na ponta: 4,3 MW,
 - Demanda média fora da ponta: 5,6 MW,
 - Energia reativa excedente: 1 MVARh,
 - Demanda reativa excedente média: 100 kVAR,
 - Demanda contratada: 5 MW,
 - Tarifa azul.
 - Tarifas (fonte: <http://www.lightempresas.com.br/> abril de 2006, tarifa azul tipo A2):
 - Consumo fora da ponta período seco: 122,15 R\$/ MWh
 - Consumo na ponta período seco: 194,76 R\$/ MWh
 - Consumo fora da ponta período úmido: 110,83 R\$/ MWh
 - Consumo na ponta período úmido: 176,48 R\$/ MWh
 - Demanda fora da ponta: 3,34 R\$/ kW
 - Demanda na ponta: 18,07 R\$/ kW
 - Demanda de ultrapassagem fora da ponta: 11,12 R\$/ kW
 - Demanda de ultrapassagem na ponta: 60,25 R\$/ kW
2. Pesquise dois equipamentos elétricos do mesmo tipo e capacidade (ex. lâmpada, microondas, ar condicionado, geladeira, TV), eventualmente de tecnologias diferentes (ex. lâmpadas incandescentes e fluorescentes, TV de LCD e de plasma). Compare potência e preço. Procure um equipamento dito "mais eficiente", supostamente mais caro, e compare com um equipamento "menos eficiente", mais barato. Compare para um mesmo regime de utilização (número de horas por dia no qual o equipamento ficará ligado) e para uma mesma tarifa, o período no qual o equipamento mais eficiente torna-se vantajoso em relação ao menos eficiente. Calcule a economia para a vida útil total do equipamento.

8.2.6 Máquinas elétricas

1. Um motor de indução trifásico, 220/ 380 V, 600 cv, rendimento 0,80, fator de potência 0,76, $I_p/ I_n = 6,7$. Calcular:

- Corrente nominal (A)
 - Potência elétrica (kW)
 - Corrente de partida (A)
 - Corrente com o rotor bloqueado (A)
 - Capacitor necessário para corrigir o fator de potência para 0,92.
2. Seja o motor acima instalado em um ramal com 100 m de comprimento, cuja resistência seja de 3Ω por cabo. Calcule a queda de tensão em regime permanente e na partida.
 3. Um motor trifásico tem como dados de placa 127/ 220 V, 15 cv, 60 Hz, I_p/ I_n 7,0 , rendimento 85 %, fator de potência 0,77. Calcular:
 - (a) A corrente de partida,
 - (b) Ajustar o relé representado pela Figura 8.7 para o disjuntor não desarmar na partida do motor (2 s) e atuar no caso de rotor preso (tempo máximo admissível 10 s).
 4. Seja um motor de 50 cv, 380 V, cuja curva de potência seja a indicada no gráfico acima. Determine:
 - O fator de potência a plena carga, a vazio e a 50% da carga.
 - O rendimento a plena carga e a 50% da carga.

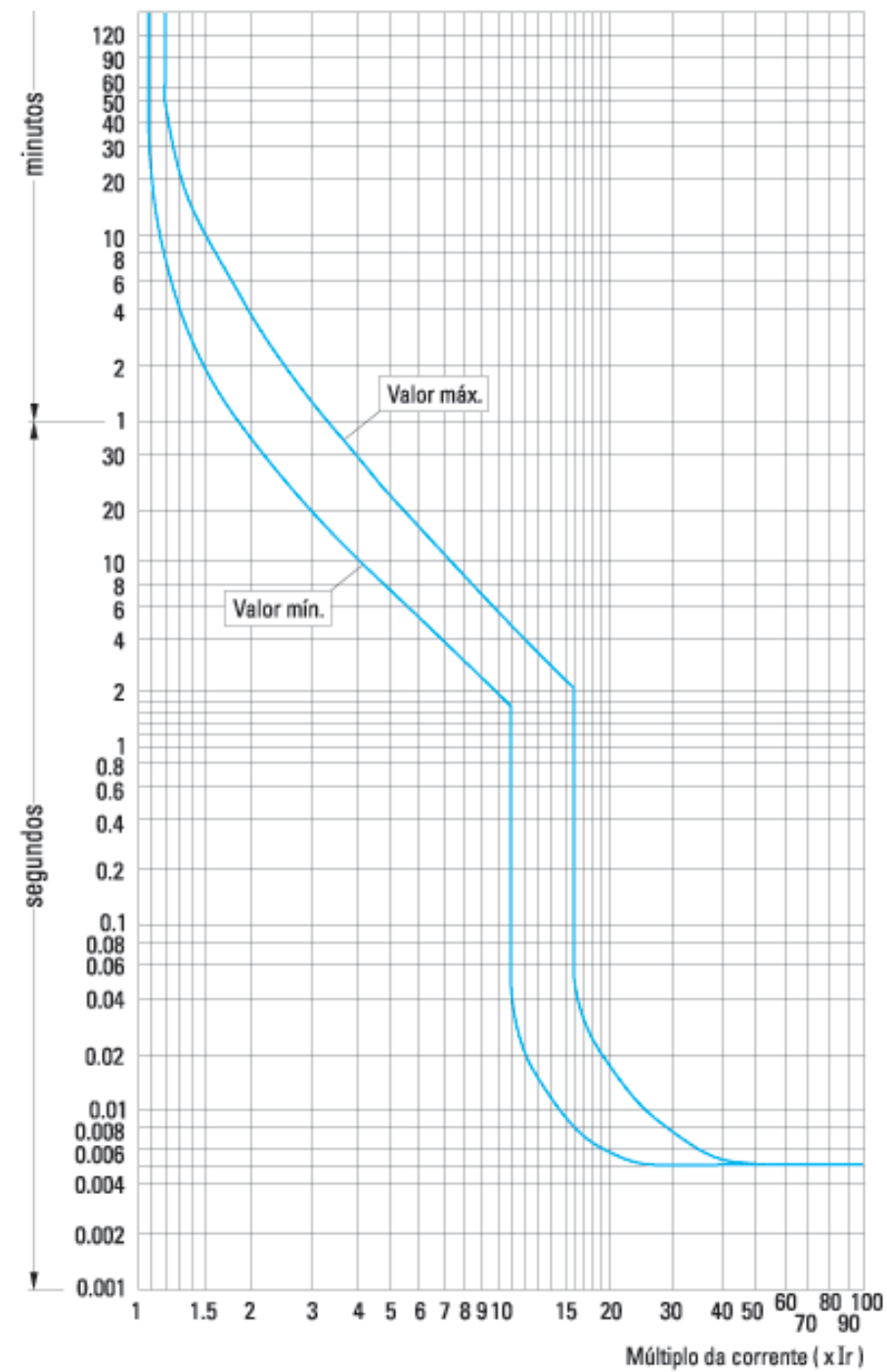


Figura 8.7: Exemplo de curva de disparo do relé.

8.3 Palavras-chave

A lista abaixo pode ser usada para pesquisas, discussões em sala de aula, ou simplesmente para atiçar a curiosidade do aluno.

- Co-geração
- Norma NR-10
- Tensão de toque e tensão de passo
- Retificador
- Motor "gaiola de esquilo"
- Transformador zig-zag
- Sistema "undercarpet"
- Equalização de potencial
- Dispositivo DR
- Esquemas TT, TN e IT
- Cabos unipolares e multipolares
- Forno de indução
- Coordenação de isolamento
- Eficiência energética
- Disjuntor a vácuo
- Compatibilidade eletromagnética
- UPS
- Cabo OPGW
- Relé de distância
- Cabos EPR e XLPE
- CLP

Referências Bibliográficas

- [1] *All About Circuits*, <http://www.allaboutcircuits.com/>
- [2] Close, C. M. *Circuitos Lineares*, Ed. LTC.
- [3] Cotrim, A. A. M. B. *Instalações Elétricas*, Ed. Pearson.
- [4] Creder, H. *Instalações Elétricas*, Ed. LTC.
- [5] Edminister, J. A. *Circuitos Elétricos*, Ed. McGraw-Hill.
- [6] Eletrosul, *Dicas para Evitar o Desperdício de Energia*, 2005.
- [7] Irwin, J. David. *Análise de Circuitos de Engenharia*, Ed. Pearson.
- [8] Mamede Filho, J. *Instalações Elétricas Industriais*, Ed. LTC.
- [9] Lopes, Juarez Castrillon. *Manual de Tarifação de Energia Elétrica*, Programa Nacional de Conservação de Energia Elétrica - Procel, Julho 2002.
- [10] Silva Filho, Matheus Teodoro. *Fundamentos de Eletricidade*, Ed. LTC.

Apêndice A

Uso de calculadores com funções de números complexos

Este apêndice serve de esclarecimento para a utilização das calculadoras científicas.

A.1 Texas TI-83

A máquina trata de forma direta, permitindo inclusive realizar contas sem preocupar-se em conversão. Pode-se configurar o modo de exibição em MODE, escolhendo entre $a+bi$ (retangular) e $r e^{i\theta}$ (polar).

Exemplo de forma retangular: $4+2i$ (usar o i minúsculo)

A forma polar é usada na sua definição de exponencial: $10e^{(30i)}$

Atenção: apesar da calculadora exibir os ângulos em graus, a entrada deve ser SEMPRE em radianos. Isto trata-se de um erro de implementação da máquina.

Apêndice B

Erros comuns

A seguir são listados alguns enganos muito comuns que ocorrem durante o curso. Espera-se que o aluno não os repita.

B.1 Omitir unidade

em todos os campos da engenharia é essencial uma informação precisa. É necessário informar as unidades em que se encontram os resultados, juntamente com múltiplos e submúltiplos.

B.2 Esquecer do múltiplo/ submúltiplo da unidade

Conforme dito anteriormente, mas o que ocorre regularmente é de não se considerar os múltiplos na hora dos cálculos. Fatalmente o resultado será muito irreal. A prática, realizando-se exercícios regularmente, permite que o aluno ganhe sensibilidade e permita perceber quando um valor esteja fora do esperado.

B.3 Múltiplo da unidade ao quadrado ou ao cubo

Algumas medidas comuns, como mm^2 , merecem atenção pois o múltiplo também é elevado ao quadrado (ou ao cubo). Logo, $1 \text{ mm}^2 = (10^{-3})^2 \text{ m}^2 = 10^{-6} \text{ m}^2$.

B.4 Confusão entre série e paralelo