

ELETRICIDADE APLICADA

AUTOR DO ORIGINAL
ALEX FERREIRA DOS SANTOS



Estácio

ELETRICIDADE APLICADA

AUTOR DO ORIGINAL
ALEX FERREIRA DOS SANTOS

1ª EDIÇÃO
SESES
RIO DE JANEIRO 2016



Conselho editorial REGIANE BURGER, MAX RICARDO PANTOJA TRINDADE, ROBERTO PAES,
GLADIS LINHARES

Autor do original ALEX FERREIRA DOS SANTOS

Projeto editorial ROBERTO PAES

Coordenação de produção GLADIS LINHARES

Projeto gráfico PAULO VITOR BASTOS

Diagramação BFS MEDIA

Revisão linguística BFS MEDIA

Revisão de conteúdo KLEIBER TENÓRIO DE SOUSA

Imagem de capa PAN DEMIN | SHUTTERSTOCK.COM

Todos os direitos reservados. Nenhuma parte desta obra pode ser reproduzida ou transmitida por quaisquer meios (eletrônico ou mecânico, incluindo fotocópia e gravação) ou arquivada em qualquer sistema ou banco de dados sem permissão escrita da Editora. Copyright SESES, 2016.

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)

S237E SANTOS, ALEX FERREIRA DOS

Eletricidade aplicada / Alex Ferreira dos Santos.

Rio de Janeiro: SESES, 2016.

116 P: IL.

ISBN: 978-85-5548-270-0

1. COMPONENTES ELÉTRICOS. 2. CIRCUITOS ELÉTRICOS. 3. MEDIDAS ELÉTRICAS.
4. FUNÇÃO SENOIDAL. I. SESES. II. ESTÁCIO.

CDD 621.3

Diretoria de Ensino — Fábrica de Conhecimento
Rua do Bispo, 83, bloco F, Campus João Uchôa
Rio Comprido — Rio de Janeiro — RJ — CEP 20261-063

Sumário

Prefácio	7
1. Energia Elétrica	9
1.1 Histórico	11
1.2 Coulomb, Galvani, Volta, Ampère, Oersted, Ohm, Edison e Tesla	12
1.2.1 Coulomb	12
1.2.2 Galvani	13
1.2.3 Volta	14
1.2.4 Ampère	16
1.2.5 Oersted (ØRSTED)	17
1.2.6 Ohm	19
1.2.7 Edison	19
1.2.8 Tesla	20
1.3 Transformadores CC e CA, circuitos polifásicos, motor de indução	21
1.3.1 Transformadores CC e CA	21
1.3.2 Circuitos polifásicos	23
1.3.3 Sistema elétrico de potência em CA (corrente alternada)	23
1.4 Geração	24
1.5 Hidrelétrica	24
1.6 Termelétrica	27
1.7 Nuclear	29
1.8 Solar fotovoltaica	32
1.9 Transmissão	33
1.10 Componentes do sistema de transmissão de energia elétrica	34
1.11 Sistema Interligado Nacional – SIN	35
1.12 Distribuição	35
1.13 Matriz energética, sustentabilidade e perspectivas	38

2. Conceitos Básicos de Corrente, Tensão, Resistência, Potência e Energia Elétricas; Lei de Ohm	43
2.1 Definições e unidades	45
2.2 Carga elétrica e corrente elétrica	46
2.2.1 Carga elétrica	46
2.3 Corrente elétrica	49
2.4 Natureza das cargas elétricas	51
2.5 Tensão elétrica	52
2.5.1 Noção qualitativa de campo elétrico	52
2.6 Sentido convencional de deslocamento (ou fluxo) da corrente elétrica	53
2.7 Fenômenos que caracterizam a corrente elétrica	55
2.8 Noção qualitativa de diferença de potencial elétrico	55
2.9 Noção quantitativa de diferença de potencial elétrico	56
2.10 Lei de Ohm	57
2.11 Potência e energia elétrica	60
2.11.1 Potência elétrica	60
2.12 Energia elétrica	62
3. Circuitos Resistivos de Corrente Contínua em Série	69
3.1 Ramos, nodos (nós), circuitos fechados e malhas	71
3.2 Lei da Tensão de <i>Kirchhoff</i> e circuitos de corrente contínua em série	72
3.3 Divisão de tensão	77
4. Circuitos Resistivos de Corrente Contínua em Paralelo	81
4.1 Lei da Corrente de <i>Kirchhoff</i> e circuitos de corrente contínua em paralelo	83
4.2 Divisão de corrente	89
4.3 Resumo das equações principais estudadas nos Capítulos 2, 3 e 4	91

5. Considerações Básicas Sobre Circuitos de Corrente Alternada 97

5.1	Introdução	99
5.2	Tensão contínua	99
5.3	Tensão alternada	100
5.4	Tensão senoidal	101
5.5	Corrente alternada	102
5.6	Frequência e período	103
5.7	Relação entre graus elétricos e tempo	104
5.8	Valores eficazes (ou <i>rms</i>) de tensão e corrente	105

6. Medidas Elétricas 107

6.1	Introdução a medidas elétricas	109
6.1.1	Conceitos básicos	109
6.2	Classificação dos instrumentos de medidas elétricas	109
6.2.1	Grandeza a ser medida	109
6.2.2	Forma de apresentação dos resultados	109
6.3	Considerações básicas sobre os instrumentos analógicos e os digitais	111
6.3.1	Instrumentos analógicos	111
6.3.1.1	Características construtivas	111
6.3.2	Instrumentos digitais	112
6.3.2.1	Características construtivas	112
6.4	Instrumentos básicos de medidas elétricas	113
6.4.1	Amperímetro	113
6.4.2	Voltímetro	114

Prefácio

Prezados(as) alunos(as),

O objetivo principal deste livro é apresentar e desenvolver os princípios básicos de análise de circuitos elétricos, de tal forma que a teoria apresentada possa ser aplicada à solução de circuitos de corrente contínua envolvendo combinações de resistores em série e em paralelo.

Antes de se iniciar a apresentação do conteúdo supracitado, faz-se, no Capítulo 1, um resumo da história da energia elétrica no mundo, citando a importância de alguns cientistas e estudiosos que, com os resultados de suas pesquisas, colaboraram de maneira decisiva para o atual cenário da energia elétrica.

O Capítulo 1 ainda aborda, qualitativamente, os transformadores cc e ca, circuitos polifásicos, motores de indução, sistema elétrico de potência em ca, para, em seguida, discorrer sobre os componentes básicos desse sistema, que são a geração, a transmissão, a distribuição e os consumidores. Esse capítulo se encerra citando o problema da matriz energética no Brasil e no mundo, sustentabilidade e perspectivas.

O Capítulo 2 inicia a apresentação do conteúdo principal deste livro, citando as definições e unidades usadas no Sistema Internacional de Unidades, carga elétrica, corrente elétrica, natureza das cargas elétricas, tensão elétrica, noção qualitativa de campo elétrico, sentido convencional de deslocamento (ou fluxo) da corrente elétrica, fenômenos que caracterizam a corrente elétrica, noção qualitativa de diferença de potencial elétrico, noção quantitativa de diferença de potencial elétrico, Lei de Ohm, potência elétrica e energia elétrica.

Dando sequência ao conteúdo principal deste livro, o Capítulo 3 discorre sobre os circuitos resistivos de corrente contínua em série, abordando os conceitos de ramos, nodos (nós), circuitos fechados e malhas para, em seguida, apresentar a Lei da Tensão de Kirchhoff aplicada em soluções de circuitos de corrente contínua em série, assim como a técnica da Divisão de Tensão, igualmente utilizada nas soluções desses circuitos.

Finalizando o conteúdo principal do livro, o Capítulo 4 trata dos circuitos resistivos de corrente contínua em paralelo, apresentando a Lei da Corrente de Kirchhoff aplicada em soluções de circuitos de corrente contínua em paralelo, assim como a técnica da Divisão de Corrente, também usada nas soluções desses circuitos.

O Capítulo 5 discorre sobre as considerações básicas de circuitos de corrente alternada, lembrando a definição de tensão contínua para, em seguida, abordar qualitativamente a tensão alternada, mais especificamente a tensão senoidal, a corrente alternada, a frequência e o período de uma forma de onda periódica, dando ênfase à função senoidal, comentando a relação entre graus elétricos e tempo, encerrando-se com um estudo qualitativo dos valores eficazes (ou rms) de tensão e corrente.

Finalmente, o Capítulo 6 trata da introdução a medidas elétricas, passando pelos conceitos básicos, classificação dos instrumentos de medidas elétricas, grandeza a ser medida, forma de apresentação dos resultados, considerações básicas sobre os instrumentos analógicos e os digitais com suas características construtivas para, então, finalizar com os instrumentos básicos de medidas elétricas, que são o amperímetro e o voltímetro.

Embora se reconheça que a análise de circuitos de qualquer complexidade seja geralmente conseguida utilizando-se um computador, sente-se que, em um livro dedicado ao estabelecimento de princípios, a resolução de exercícios “à mão” é mais apropriada. Isso possibilita, então, ao leitor utilizar simuladores computacionais de circuitos e ser mais capaz de interpretar os resultados efetivamente.

Bons estudos!

1

Energia Elétrica



OBJETIVOS

- Resumir a história da energia elétrica no mundo;
 - Citar a importância de alguns cientistas e estudiosos para o atual cenário da energia elétrica no mundo;
 - Abordar, de forma qualitativa, os transformadores cc e ca, circuitos polifásicos, motores de indução e sistema elétrico de potência em ca;
 - Discorrer sobre os componentes básicos de um sistema elétrico de potência, a saber: geração, transmissão, distribuição e consumidores;
 - Citar o problema da matriz energética no Brasil e no mundo.
-

1.1 Histórico

Desde as épocas mais remotas, o homem tem criado mecanismos para aumentar seu conforto, diminuindo seus esforços. Com a técnica do fogo dominada, a invenção da roda, o domínio das forças da água, dos ventos e dos animais, sua qualidade de vida teve uma melhora substancial. Muito tempo de passou até que um fato marcou a história da energia: a invenção da máquina a vapor, um símbolo energético da Revolução Industrial.

Transformou-se o fogo em movimento. Isso permitiu a construção de grandes fábricas e sua aplicação nos transportes. Nesse período, os combustíveis fósseis (carvão mineral, petróleo e gás natural) também evoluíram bastante. Até hoje representam a mais importante fonte de energia, inclusive gerando tecnologias mais avançadas. No entanto, foi apenas há pouco mais de 100 anos que surgiu a energia elétrica, símbolo da Era da Informação.

Por meio dela, outras formas de energia puderam transformar-se com eficiência, como: calor, iluminação e energia mecânica.

No século XX, foi descoberta outra fonte de energia: a energia nuclear, ainda muito questionada pelos elevados riscos ao meio ambiente. Além disso, está em desenvolvimento, entre outras, a conversão de energia solar diretamente em energia elétrica e a utilização do hidrogênio como fonte de energia, o que, num futuro breve, também terá importante participação em nossa vida. No Brasil, a produção de eletricidade a partir do gás natural, em usinas termelétricas de alta tecnologia, contribuirá para o atendimento às grandes necessidades de energia do país.

A energia elétrica é a única capaz de fazer funcionar o rádio, a televisão, o telefone, o computador e todos os equipamentos que transportam a informação e aproximam milhares de pessoas em todo o planeta.

1.2 Coulomb, Galvani, Volta, Ampère, Oersted, Ohm, Edison e Tesla

1.2.1 Coulomb



Charles Augustin de Coulomb

Charles Augustin de Coulomb (Angoulême, 14 de junho de 1736 - Paris, 23 de agosto de 1806) foi um físico francês.

Em sua homenagem, deu-se seu nome à unidade de carga elétrica, o coulomb.

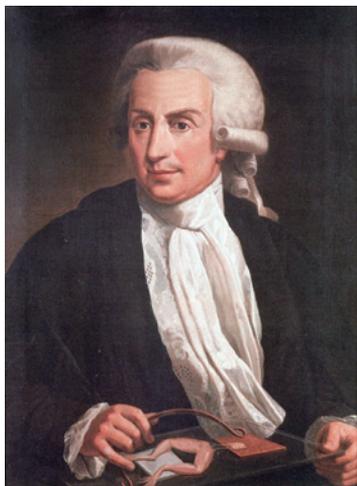
Engenheiro de formação, Coulomb foi principalmente físico. Em 1783 publicou os 7 tratados sobre eletricidade e magnetismo, e outros sobre torção, atrito entre sólidos e outros. Experimentador genial e rigoroso, realizou uma experiência histórica com uma balança de torção para determinar a força exercida entre duas cargas elétricas (lei de Coulomb).

Em um de seus trabalhos mais famosos, Coulomb trata do equilíbrio de torção, mostrando como a torção pode viabilizar medidas de forças muito pequenas com grande precisão, descrevendo um método que utiliza fibras de diversos materiais, que foi um aperfeiçoamento da balança de torção, utilizada por Henry Cavendish para medir a atração gravitacional.

Utilizando a metodologia de medir forças através da torção, Coulomb estabeleceu a relação entre força elétrica, quantidade de carga e distância, enfatizando a semelhança desta com a teoria de Isaac Newton para a gravitação, que estabelece a relação entre a força gravitacional e a quantidade de massa e distância. Além disso, estudou as cargas elétricas pontuais e a distribuição de cargas em superfícies de corpos carregados eletricamente.

Durante os últimos quatro anos da sua vida, foi inspetor-geral do ensino público e teve um papel importante no sistema educativo da época.

1.2.2 Galvani



Luigi Galvani

Luigi Galvani (Bolonha, 9 de setembro de 1737 - Bolonha, 4 de dezembro de 1798) foi um médico, investigador, físico e filósofo italiano. Fez uma das primeiras incursões do estudo de bioeletricidade, um campo que ainda hoje estuda os padrões elétricos e sinais do sistema nervoso. Foi professor de anatomia da Universidade de Bolonha, cidade onde viveu e morreu.

A partir de estudos realizados em coxas de rã, descobriu que músculos e células nervosas eram capazes de produzir eletricidade, que ficou conhecida então como eletricidade galvânica. Mais tarde, Galvani demonstrou que essa eletricidade é originária de reações químicas.

Galvani foi também pioneiro na moderna obstetrícia. Em seus estudos, dissecando rãs em uma mesa, enquanto conduzia experimentos com eletricidade estática, um dos assistentes de Galvani tocou em um nervo ciático de uma rã com um escalpelo metálico, o que produziu uma contração muscular (como uma câimbra) na região tocada sempre que eram produzidas faíscas em uma máquina eletrostática próxima. Tal observação fez com que Galvani investigasse a relação entre a eletricidade e a animação – ou vida. Por isso é atribuída a Galvani a descoberta da bioeletricidade.

Galvani criou então o termo "eletricidade animal" para descrever aquilo que era capaz de ativar os músculos daquele espécime. Juntamente com seus contemporâneos, ele reparou que aquela ativação muscular era gerada por um fluido elétrico que era conduzido aos músculos através dos nervos. Esse fenômeno foi então apelidado de galvanismo, por sugestão dada por seu colega, e, em alguns momentos, adversário intelectual, Alessandro Volta.

Os resultados das pesquisas e investigações de Galvani chegaram a ser mencionados por Mary Shelley, como parte de uma lista de recomendações de leitura direta, para um concurso de histórias de terror, em um dia chuvoso na Suíça

– o que resultou no romance Frankenstein – e sua reconstrução e reanimação através da eletricidade.

As investigações e descobertas de Galvani levaram à invenção da primeira bateria elétrica, mas não por Galvani, que não percebia a eletricidade separada da biologia. Galvani não via a eletricidade como essência da vida, a qual ele percebia ter uma natureza intrínseca e inerente à vitalidade. Ele acreditava que a eletricidade animal vinha do músculo.

Desse modo, foi Alessandro Volta quem construiu a primeira bateria elétrica, que ficou conhecida como a pilha voltaica.

Como Galvani acreditava, toda a vida é de fato elétrica – pelo fato de todas as coisas vivas serem compostas de células e cada célula ter um potencial celular –, a eletricidade biológica tem as mesmas bases químicas para o fluxo de corrente elétrica entre células eletroquímicas, desse modo podendo ser resumida de algum modo fora do corpo. A intuição de Volta estava correta também.

O nome de Galvani também sobrevive nas células galvânicas, no galvanômetro e no processo chamado de galvanização. A cratera Galvani, na superfície da Lua, também foi nomeada em sua homenagem.

1.2.3 Volta



Alessandro Volta

Alessandro Volta (Como, 18 de fevereiro de 1745 – Como, 5 de março de 1827) foi um físico italiano, conhecido especialmente pela invenção da pilha elétrica. Mais tarde, viria a receber o título de conde.

Alessandro Giuseppe Antonio Anastasio Volta nasceu e foi educado em Como, Ducado de Milão, onde se tornou professor de física na Escola Real, em 1774. A sua paixão foi sempre o estudo da eletricidade, e, como um jovem estudante, ele escreve um poema em latim na sua nova fascinante descoberta. *De vi attractiva ignis*

electrici ac phaenomenis inde pendentibus foi o seu primeiro livro científico. Apesar da sua genialidade desde jovem, começou a falar somente aos quatro anos de idade.

Em 1751, com seis anos de idade, foi encaminhado pela família para a escola jesuítica, pois era de interesse familiar que seguisse carreira eclesiástica. No entanto, em 1759, com quatorze anos, decidiu estudar física, e dois anos depois abandonou a escola jesuítica e desistiu da carreira eclesiástica. Em 1775, aprimorou o eletróforo, uma máquina que produz eletricidade estática.

Volta é comumente creditado como o inventor dessa máquina que foi de fato inventada três anos antes.

Estudou a química de gases entre 1776 e 1778. Após ler um ensaio de Benjamin Franklin sobre "ar inflamável", cuidadosamente procurou-o na Itália. Volta descobriu o metano. Em novembro de 1776, Volta encontrou metano no lago Maior e, em 1778, ele conseguiu isolar o metano. Em 1779 tornou-se professor de física na Universidade de Pavia, posição que ocupou durante 25 anos. Em 1794 Volta casou-se com Teresa Peregrini, filha do conde Ludovico Peregrini. O casal teve três filhos.

Em 1800, como resultado de uma discórdia profissional sobre a resposta galvânica, defendida por Luigi Galvani (segundo a qual os metais produziram eletricidade apenas em contato com tecido animal), Volta desenvolveu a primeira pilha elétrica (comprovando que, para a produção de eletricidade, a presença de tecido animal não era necessária), um predecessor da bateria elétrica.

Volta determinou que os melhores pares de metais dissimilares para a produção de eletricidade eram o zinco e a prata. Inicialmente, Volta experimentou células individuais em série. Cada célula era um cálice de vinho cheio de salmoura na qual dois elétrodos dissimilares foram mergulhados. A pilha elétrica substituiu o cálice com um cartão embebido em salmoura. O número de células – e, conseqüentemente, a tensão elétrica que poderiam produzir – estava limitado pela pressão exercida pelas células de cima, que espremiam toda a salmoura do cartão da célula de baixo.

No período de 1800 a 1815, após a invenção da pilha, houve grande evolução da eletroquímica. Em setembro de 1801, Volta viajou a Paris, aceitando um convite do imperador Napoleão Bonaparte, para mostrar as características de seu invento (a pilha) no Institut de France. Em honra ao seu trabalho no campo de eletricidade, Napoleão nomeou Volta conde em 1810.

Em 1815, o imperador da Áustria nomeou Volta professor de filosofia na Universidade de Pádua. Volta está enterrado na cidade de Como, Itália. O "Templo Voltiano", perto do lago de Como, é um museu devotado ao trabalho

do físico italiano: os seus instrumentos e as publicações originais estão à mostra de todos.

1.2.4 Ampère



André-Marie Ampère

André-Marie Ampère (Lyon, 20 de janeiro de 1775 – Marselha, 10 de junho de 1836) foi um físico, filósofo, cientista e matemático francês que fez importantes contribuições para o estudo do eletromagnetismo.

Nasceu em Lyon, foi professor de análise na École Polytechnique de Paris e no Collège de France. Em 1814 foi eleito membro da Académie des Sciences. Ocupou-se com vários ramos do conhecimento humano, deixando obras de importância, principalmente no domínio da física e da matemática. Partindo das

experiências feitas pelo dinamarquês Hans Christian Oersted sobre o efeito magnético da corrente elétrica, soube estruturar e criar a teoria que possibilitou a construção de um grande número de aparelhos eletromagnéticos. Além disso, descobriu as leis que regem as atrações e repulsões das correntes elétricas entre si. Idealizou o galvanômetro, inventou o primeiro telégrafo elétrico e, em colaboração com Arago, o eletroímã.

Entre suas obras, ele deixou por terminar *Ensaio sobre a filosofia das Ciências*, na qual iniciou a classificação do conhecimento do homem. Publicou *Recueil d'Observations électro-dynamiques*; *La théorie des phénomènes électro-dynamiques*; *Précis de la théorie des phénomènes électro-dynamiques*; *Considérations sur la théorie mathématique du jeu*; *Essai sur la philosophie des sciences*.

Em sua homenagem, foi dado o nome de ampère (símbolo: A) à unidade de medida da intensidade de corrente elétrica.

O seu filho Jean-Jacques Ampère (1800-1864) foi filólogo, erudito, viajante e historiador literário francês.

1.2.5 Oersted (ØRSTED)



Hans Christian Ørsted

Hans Christian Ørsted (Rudkøbing, 14 de agosto de 1777 – Copenhague, 9 de março de 1851) foi um físico e químico dinamarquês. É conhecido, sobretudo, por ter descoberto que as correntes elétricas podem criar campos magnéticos que são parte importante do eletromagnetismo. As suas descobertas moldaram a filosofia pós-kantiana e os avanços na ciência durante o final do século XIX. Foi também o primeiro pensador moderno a descrever explicitamente e denominar a experiência mental. Ørsted desenvolveu o seu interesse pela ciência enquanto jovem, por influência de seu pai, Søren Christian Ørsted, que era dono de uma farmácia. Ele e o seu irmão, Anders Sandøe Ørsted, receberam a maior parte da sua educação inicial em casa como autodidatas, partindo para Copenhague em 1793, com o fim de realizar os exames de entrada na Universidade de Copenhague. Ambos os irmãos passaram e distinguiram-se academicamente na Universidade. Por volta de 1796, Ørsted recebeu honrarias pelos seus artigos sobre estética e física. Em 1801, Hans recebeu uma bolsa de estudo para viajar e um subsídio estatal que lhe possibilitaram passar três anos viajando pela Europa. Na Alemanha conheceu Johann Wilhelm Ritter, um físico que acreditava na existência de uma ligação entre eletricidade e magnetismo. A existência dessa ligação fez sentido para Ørsted, uma vez que acreditava na unidade da natureza, e, como tal, que haveria necessariamente uma ligação entre muitos fenômenos naturais. As conversas entre ambos levaram Ørsted ao estudo da física. Tornou-se professor na Universidade de Copenhague em 1806 e continuou a sua pesquisa sobre a corrente elétrica e a acústica. Sob a sua orientação, a Universidade desenvolveu um programa de física e química ampliado e instituiu novos laboratórios. Enquanto se preparava para uma palestra na tarde de 21 de abril de 1820, Ørsted desenvolveu uma experiência que forneceu evidências que o surpreenderam. Enquanto preparava os seus materiais, reparou que a agulha de uma bússola defletia do norte magnético

quando a corrente elétrica da bateria que estava usando era ligada e desligada. Esta deflexão convenceu-o de que os campos magnéticos radiam a partir de todos os lados de um fio que carrega uma corrente elétrica, tal como ocorre com a luz e o calor, e que isso confirmava uma relação direta entre eletricidade e magnetismo.

À época desta descoberta, Ørsted não sugeriu nenhuma explicação satisfatória para o fenômeno nem tentou representar o fenômeno numa estrutura matemática. No entanto, três meses mais tarde, deu início a investigações mais intensivas. Pouco depois, publicou as suas descobertas, provando que a corrente elétrica produz um campo magnético à medida que flui através de um fio. A unidade CGS da indução eletromagnética (Oersted) foi assim designada em honra dos seus contributos no campo do eletromagnetismo. As suas descobertas resultaram numa pesquisa intensa em eletrodinâmica por parte da comunidade científica, influenciando o desenvolvimento de uma forma matemática única que representasse as forças magnéticas entre condutores portadores de corrente por parte do físico francês André-Marie Ampère. As descobertas de Ørsted representaram também um grande passo em direção a um conceito de energia unificado. Em 1825, Ørsted deu um contributo significativo à química ao produzir alumínio pela primeira vez. Embora uma liga metálica alumínio-ferro tenha sido anteriormente desenvolvida pelo cientista e inventor britânico Humphry Davy, Ørsted foi o primeiro a isolar o elemento por meio da redução do cloreto de alumínio. Ørsted foi também poeta e escritor com obras publicadas. A sua série poética *Luftskibet* ("A aeronave") foi inspirada pelos voos de balão do seu amigo físico e mágico de cena Étienne-Gaspard Robert. Ørsted morreu em 1851 e foi enterrado no Cemitério Assistens, em Copenhague. A nota de 100 coroas dinamarquesas lançada de 1950 a 1970 apresenta uma gravura de Ørsted. Atualmente, os edifícios que abrigam o Departamento de Química e o Instituto de Ciências Matemáticas da Universidade de Copenhague são designados por *Instituto Hans Christian Ørsted* em sua homenagem. O primeiro satélite dinamarquês, lançado em 1999, foi designado 'Danny Kaye' Ørsted, também em sua honra.

1.2.6 Ohm

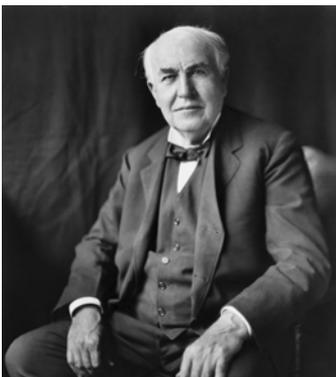


Georg Simon Ohm

Georg Simon Ohm (Erlangen, 16 de março de 1789 - Munique, 6 de julho de 1854) foi um físico e matemático alemão. Irmão do matemático Martin Ohm. Em 1817 foi professor de matemática no colégio jesuíta de Colônia e na "Escola Politécnica Municipal" de Nuremberg (hoje em dia *Georg-Simon-Ohm-Hochschule Nürnberg*) de 1833 a 1849. Em 1852 tornou-se professor de física experimental na Universidade de Munique, na cidade onde viria a falecer.

Entre 1826 e 1827, Ohm desenvolveu a primeira teoria matemática da condução elétrica nos circuitos, baseando-se no estudo da condução do calor de Fourier e fabricando os fios metálicos de diferentes comprimentos e diâmetros usados nos seus estudos da condução elétrica. Este seu trabalho não recebeu o merecido reconhecimento na época, tendo a famosa lei de Ohm permanecido desconhecida até 1841, quando recebeu a medalha *Copley da Royal Society* (o equivalente de então ao atual Prêmio Nobel). Até essa data os empregos que teve em Colônia e Nuremberg não eram permanentes, não lhe permitindo manter um nível de vida médio. Só depois de 1852, dois anos antes de morrer, conseguiu uma posição estável como professor de física na Universidade de Munique.

1.2.7 Edison



Thomas Alva Edison

Thomas Alva Edison (Milan, Ohio, 11 de fevereiro de 1847 - West Orange, Nova Jersey, 18 de outubro de 1931) foi um empresário dos Estados Unidos que patenteou e financiou o desenvolvimento de muitos dispositivos importantes de grande interesse industrial. *O Feiticeiro de Menlo Park* (*The Wizard of Menlo Park*), como era conhecido, foi um dos primeiros a aplicar os princípios da produção maciça ao processo da invenção. Na sua vida, Thomas Edison registrou 2.332 patentes. O fonógrafo foi uma de

suas principais invenções. Outra foi o cinematógrafo, a primeira câmera cinematográfica bem-sucedida, com o equipamento para mostrar os filmes que fazia. Edison também aperfeiçoou o telefone, inventado por Antonio Meucci, em um aparelho que funcionava muito melhor. Fez o mesmo com a máquina de escrever. Trabalhou em projetos variados, como alimentos empacotados a vácuo, um aparelho de raios X e um sistema de construções mais baratas feitas de concreto. Entre as suas contribuições mais universais para o desenvolvimento tecnológico e científico encontram-se a lâmpada elétrica incandescente, o fonógrafo, o cinescópio ou cinetoscópio, o ditafone e o microfone de grânulos de carvão para o telefone. Edison é um dos precursores da revolução tecnológica do século XX. Teve também um papel determinante na indústria do cinema.

1.2.8 Tesla



Nikola Tesla

Nikola Tesla (em sérvio: Nicola Tesla ou НИКОНА Tec.na) (Smiljan, Império Austríaco, 10 de julho de 1856 – Nova York, 7 de janeiro de 1943) foi um inventor nos campos da engenharia mecânica e eletrotécnica, de etnia sérvia nascido na aldeia de Smiljan, Vojna Krajina, no território da atual Croácia. Era súdito do Império Austríaco por nascimento e mais tarde tornou-se um cidadão estadunidense. Tesla é muitas vezes descrito como um importante cientista e inventor da modernidade, um homem que "espalhou luz sobre a face da Terra".

É mais conhecido pelas suas muitas contribuições revolucionárias no campo do eletromagnetismo no fim do século XIX e início do século XX. As patentes de Tesla e o seu trabalho teórico formam as bases dos modernos sistemas de potência elétrica em corrente alternada (AC), incluindo os sistemas polifásicos de distribuição de energia e o motor AC, com os quais ajudou na introdução da Segunda Revolução Industrial.

Depois da sua demonstração de transmissão sem fios (rádio) em 1894 e após ser o vencedor da "Guerra das Correntes", tornou-se largamente respeitado como um dos maiores engenheiros eletrotécnicos que trabalhavam nos

EUA. Muitos dos seus primeiros trabalhos foram pioneiros na moderna engenharia eletrotécnica e muitas das suas descobertas foram importantes a desbravar caminho para o futuro. Durante esse período, nos Estados Unidos, a fama de Tesla rivalizou com a de qualquer outro inventor ou cientista da história e cultura popular, mas, devido à sua personalidade excêntrica e às suas afirmações aparentemente bizarras e inacreditáveis sobre possíveis desenvolvimentos científicos, Tesla caiu eventualmente no ostracismo e era visto como um cientista louco. Nunca tendo dado muita atenção às suas finanças, Tesla morreu empobrecido aos 86 anos.

A unidade do Sistema Internacional de Unidades (SI) que mede a densidade do fluxo magnético ou a indução eletromagnética (geralmente conhecida como campo magnético "B"), o tesla, foi nomeada em sua honra (na *Conférence Générale des Poids et Mesures*, Paris, 1960), assim como o efeito Tesla da transmissão sem fio de energia para aparelhos eletrônicos com energia sem fio, que Tesla demonstrou numa escala menor (lâmpadas elétricas) já em 1893 e aspirava usar para a transmissão intercontinental de níveis industriais de energia no seu projeto inacabado da *Wardenclyffe Tower*.

À parte os seus trabalhos em eletromagnetismo e engenharia eletromecânica, Tesla contribuiu em diferentes medidas para o estabelecimento da robótica, do controle remoto, do radar e da ciência computacional e para a expansão da balística, da física nuclear e da física teórica. Em 1943, o Supremo Tribunal dos Estados Unidos acreditou-o como sendo o inventor do rádio. Muitas das suas realizações foram usadas, com alguma controvérsia, para apoiar várias pseudociências, teorias sobre OVNI e as primeiras formas de ocultismo *New Age*.

1.3 Transformadores CC e CA, circuitos polifásicos, motor de indução

1.3.1 Transformadores CC e CA

O transformador é um dispositivo com função principal de elevar ou rebaixar valores de tensões ou correntes elétricas, mas, também, pode ser utilizado para isolar determinados circuitos elétricos e também em alguns conversores

CC-CC e CC-CA, tendo assim grandes aplicações nos sistemas de transmissão e distribuição de energia elétrica.

As bases do seu funcionamento estão nas Leis de Faraday, Lenz e Ampère. Conhecendo-se essas leis, conclui-se que o transformador não funciona com corrente contínua, a não ser em determinados tipos de conversores.

Os transformadores são utilizados em um conjunto muito variado de aplicações de processamento de informação e de energia. Dentre essas aplicações, destacam-se a elevação e a redução da tensão ou do número de fases em redes de transporte e distribuição de energia elétrica, a redução da tensão e da corrente em instrumentos de medida, a adaptação de impedâncias e a sintonia de filtros RLC em aplicações de áudio, de rádio frequência e de frequência intermédia, o armazenamento de energia em conversores dc-dc, o isolamento galvânico e outros. Observe, a seguir, a figura 1.1.

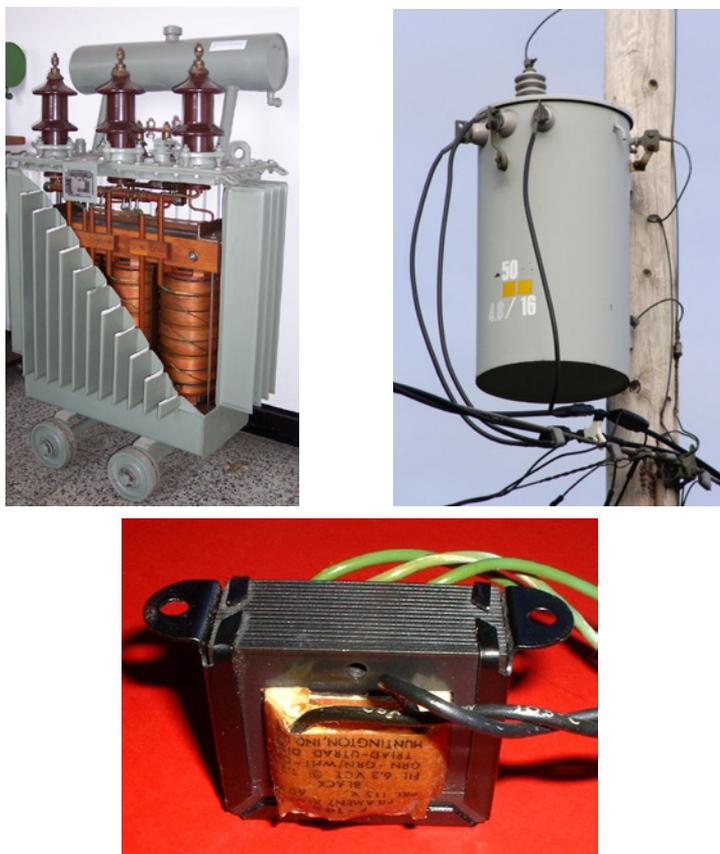


Figura 1.1 – Imagens de transformadores.

1.3.2 Circuitos polifásicos

A maior parte da geração, transmissão e utilização em alta potência da energia elétrica envolve sistemas polifásicos, ou seja, sistemas nos quais estão disponíveis diversas fontes de mesma amplitude com uma diferença de fase entre elas. Por ter vantagens econômicas e operacionais, o sistema trifásico é o mais difundido. Uma fonte trifásica é constituída de três fontes de tensões iguais defasadas de 120° uma da outra. As vantagens do sistema trifásico são as seguintes:

- Permitem transmissão de potência de forma mais econômica;
- Motores trifásicos não necessitam de capacitores para a partida, enquanto que motores monofásicos sim, e;
- Maior versatilidade para a montagem do circuito, pois de um circuito trifásico, podem derivar vários monofásicos.

1.3.3 Sistema elétrico de potência em CA (corrente alternada)

A energia elétrica encontra-se disponibilizada na forma contínua (CC) ou alternada (CA). Inicialmente, no final do século XIX, quando a transmissão era feita em CC, em pequenas potências e baixo nível de tensão, houve muita discussão a respeito de qual seria a forma mais conveniente. De um lado, Nikola Tesla defendia a corrente alternada e, do outro, Thomas Edison defendia a corrente contínua. Interesses comerciais tornaram esta disputa polêmica e acirrada. A facilidade de elevar ou baixar o nível da tensão na corrente alternada fez com que esta se saísse vitoriosa. A forma contínua encontra sua principal aplicação através das baterias, empregadas em automóveis, lanternas, telefones celulares, sempre que o armazenamento de energia elétrica se fizer necessário. Com o advento da eletrônica de potência, no final do século XX, a transmissão de energia em corrente contínua, por longas distâncias e sem conexões intermediárias, também encontrou seu lugar, mas esse fato não afeta o consumidor residencial ou comercial.

Um sistema elétrico de potência em CA é constituído, normalmente, por:

- Geradores e subestações elevadoras de tensão;
- Sistema de transmissão composto por linhas de transmissão e subestações que interligam diversos sistemas em tensões diferentes;
- Sistema de subtransmissão, com as correspondentes linhas e subestações, e;
- Sistemas de distribuição local.

Os principais equipamentos existentes em subestações de CA, além das estruturas e dos barramentos, são:

- Transformadores;
- Reatores;
- Bancos de capacitores;
- Disjuntores;
- Chaves seccionadoras;
- Para-raios, e;
- Transformadores de potencial e de corrente para medição.

1.4 Geração

A geração de eletricidade é o primeiro processo na entrega da eletricidade aos consumidores. Outros três processos são transmissão de energia elétrica, distribuição da eletricidade e venda da eletricidade. Há várias formas de gerar energia elétrica. As turbinas girando unidas aos geradores elétricos produzem a eletricidade. As turbinas podem ser movidas usando o vapor, a água, o vento ou outros líquidos como um portador de energia intermediário. As fontes de energia mais comuns são as térmicas, combustíveis fósseis, reatores nucleares, para a geração de vapor, e da energia potencial gravitacional das barragens das usinas hidrelétricas. As pilhas produzem a eletricidade pelas reações de óxido-redução com uma variedade de produtos químicos.

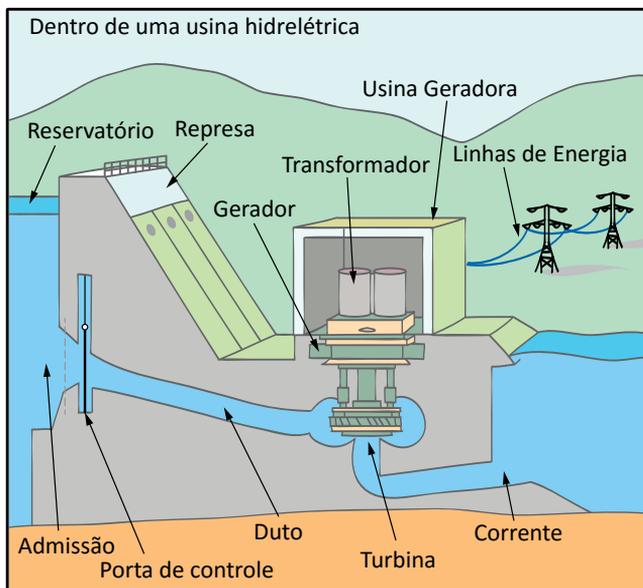
1.5 Hidrelétrica

O uso da força das águas para gerar energia é bastante antigo (desde o século I a.C.) e começou com a utilização das chamadas “noras”, ou rodas d’água do tipo horizontal, que, por meio da ação direta de uma queda d’água, produz energia mecânica. A partir do século XVIII, com o surgimento de tecnologias como o motor, o dínamo, a lâmpada e a turbina hidráulica, foi possível converter a energia mecânica em eletricidade.

No entanto, o acionamento do primeiro sistema de conversão de hidroe-nergia em energia elétrica do mundo ocorreria somente em 1897, quando entrou em funcionamento a hidrelétrica de “Niágara Falls” (EUA), idealizada por

Nikola Tesla, com o apoio da Westinghouse. De lá para cá, o modelo é praticamente o mesmo, com mudanças apenas nas tecnologias que permitem maior eficiência e confiabilidade do sistema. Observe, a seguir, a figura 1.2.

a)



b)

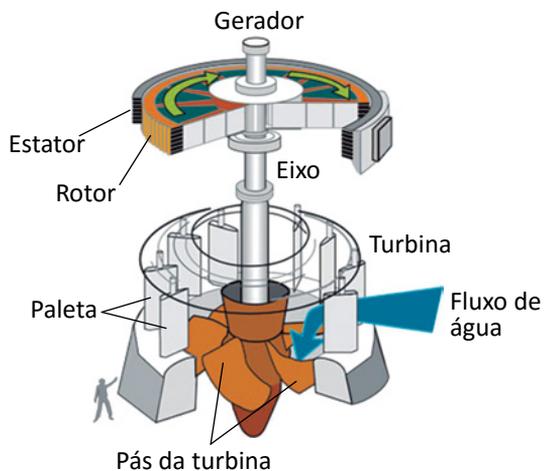


Figura 1.2 – Esquema básico (a) de uma usina hidrelétrica e (b) de um gerador e turbina de uma hidrelétrica.

Cerca de 20% da energia elétrica gerada no mundo todo é proveniente de hidrelétricas. Em números aproximados, só no Brasil, a energia hidrelétrica é responsável por cerca de 75 milhões de kW.

Uma usina hidrelétrica, no Brasil, pode ser classificada de acordo com a sua potência de geração de energia em dois tipos principais: as PCH's, ou pequenas centrais hidrelétricas que produzem de 1 MW a 30 MW e têm um reservatório com área inferior a 3 km² (Resolução ANEEL N.º 394/98), e as GCH's, ou grandes centrais hidrelétricas, que produzem acima de 30 MW.

A segunda maior hidrelétrica do mundo é a usina de Itaipu, mostrada na figura 2.2, pertencente ao Brasil e ao Paraguai. Situada no rio Paraná, Itaipu tem uma capacidade de 14.000 MW, respondendo por 16% da demanda nacional e 75% da demanda paraguaia de energia elétrica. A usina de Belo Monte terá início em 2015 e será a maior usina totalmente nacional com capacidade de 11.233 MW.



Figura 1.3 – Usina hidrelétrica de Itaipu.

A maior do mundo é a Hidrelétrica de Três Gargantas, mostrada na figura 1.3, construída no rio Yang-Tsé, na China. Três Gargantas tem capacidade de produzir 22.500 MW.



Figura 1.4 – Usina hidrelétrica de Três Gargantas.

Obviamente, os impactos ambientais desses dois grandes empreendimentos são tão colossais quanto eles próprios: Três Gargantas engoliu 13 cidades, 4.500 aldeias e 162 sítios arqueológicos importantíssimos para a China. Sem contar os impactos sobre flora, fauna, solo, alterações do microclima da região, ciclo hidrológico e milhares de pessoas que tiveram de ser realocadas.

De fato, as usinas hidrelétricas são uma fonte renovável de energia, mas isso não significa que sejam ambientalmente corretas nem que sejam menos nocivas que outras fontes unanimemente nocivas.

1.6 Termelétrica

A usina termelétrica é uma instalação industrial que produz energia a partir do calor gerado pela queima de combustíveis fósseis (como carvão mineral, óleo, gás, entre outros) ou por outras fontes de calor (como a fissão nuclear, em usinas nucleares).

Essas usinas funcionam da seguinte maneira: aquece-se uma caldeira com água; essa água será transformada em vapor, cuja força irá movimentar as pás de uma turbina, que, por sua vez, movimentará um gerador. Uma maneira de se aquecer o caldeirão é através da queima de combustíveis fósseis (óleo, carvão,

gás natural). Após a queima, eles são soltos na atmosfera, causando grandes impactos ambientais. Outra maneira de aquecimento é utilizar a energia nuclear, através de reações nucleares como a quebra (fissão) do urânio.

Após o vapor ter movimentado as turbinas, ele é enviado a um condensador para ser resfriado e transformado em água líquida para ser reenviado ao caldeirão novamente, para um novo ciclo. Esse vapor pode ser resfriado utilizando-se água de um rio, um lago ou um mar, mas causa danos ecológicos devido ao aquecimento da água e, conseqüentemente, diminuição do oxigênio. Outra maneira de resfriar esse vapor é utilizar água armazenada em torres; por sua vez, esta água é enviada em forma de vapor para a atmosfera, alterando o regime de chuvas.

Um dos maiores problemas das usinas termelétricas é a grande contribuição que elas têm com o aquecimento global por meio do efeito estufa e de chuvas ácidas, devido à queima de combustíveis. No caso das usinas termelétricas de Angra dos Reis, no Brasil, que usam como fonte de calor energia nuclear, além da poluição térmica existe o problema do lixo atômico.

Contudo, essas usinas não têm só desvantagens. As vantagens delas é que podem ser construídas próximas a centros urbanos, diminuindo as linhas de transmissões e desperdiçando menos energia. Também são usinas que produzem uma quantidade constante de energia elétrica durante o ano inteiro, ao contrário das hidrelétricas, que têm a produção dependente do nível dos rios. No Brasil, as térmicas complementam a matriz energética de hidrelétricas, sendo ligadas apenas quando há necessidade (como em períodos de estiagem).

Pouco mais de 60% da energia do mundo é produzida nesse tipo de usina. Observe a figura 1.5:

a)



b)



c)

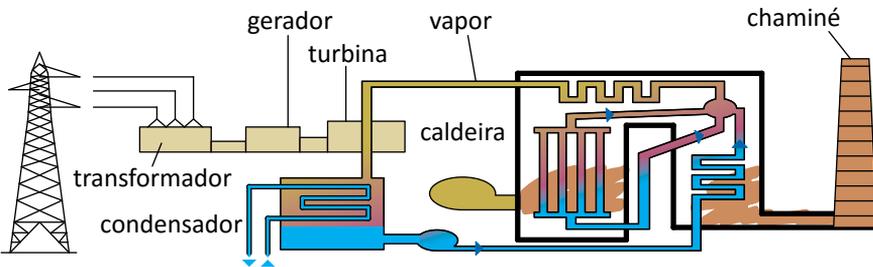


Figura 1.5 – (a) TermoRio (Brasil): termelétrica movida a gás natural. (b) Usina termelétrica da Petrobrás de Juiz de Fora (Brasil). (c) Esquema de funcionamento de uma usina termelétrica.

1.7 Nuclear

A usina nuclear é uma instalação industrial que tem por finalidade produzir energia elétrica a partir de reações nucleares. As reações nucleares de elementos radioativos produzem uma grande quantidade de energia térmica. Geralmente, as usinas nucleares são construídas por um envoltório de contenção feito de ferro armado, concreto e aço, com a finalidade de proteger o reator nuclear de emitir radiações para o meio ambiente. O elemento mais utilizado para a produção dessa energia é o urânio.

Como mostra a figura 1.6, uma usina nuclear é formada basicamente por três fases: a primária, a secundária e a refrigeração. Inicialmente, o urânio é colocado no vaso de pressão. Com a fissão, há a produção de energia térmica. No sistema primário, a água é utilizada para resfriar o núcleo do reator nuclear. No sistema secundário, a água aquecida pelo sistema primário transforma-se em vapor de água em um sistema chamado gerador de vapor. O vapor produzido no sistema secundário é aproveitado para movimentar a turbina de um gerador elétrico. O vapor de água produzido no sistema secundário é então transformado em água através de um sistema de condensação, ou seja, através de um condensador que, por sua vez, é resfriado por um sistema de refrigeração de água. Esse sistema bombeia água do mar, água fria, através de circuitos de resfriamento que ficam dentro do condensador. Por fim, a energia que é gerada através de todo o processo de fissão nuclear chega às residências por redes de transmissão e distribuição de energia elétrica.

Envolvimento de contenção

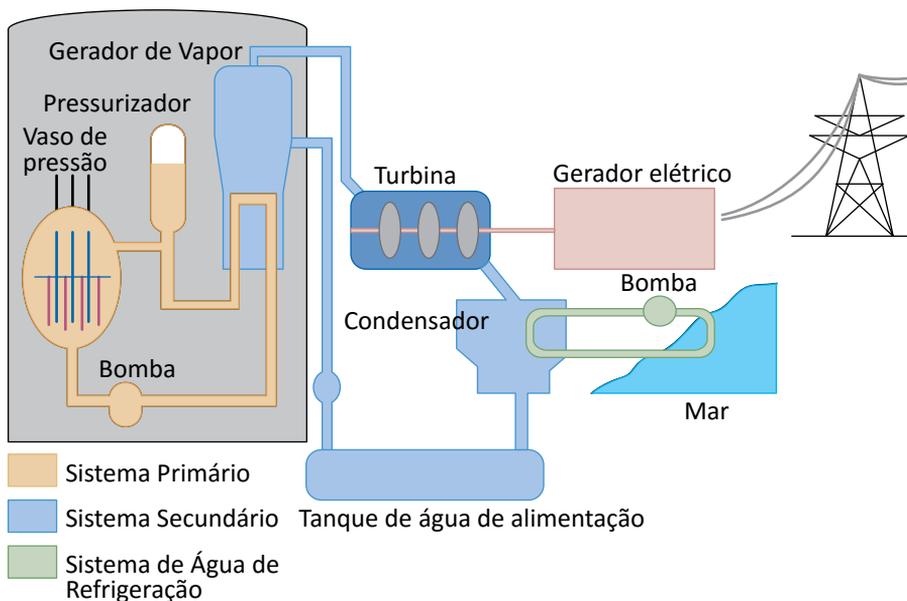


Figura 1.6 – Fases de uma usina nuclear.

A figura 1.7 destaca as usinas nucleares de Angra 1 e 2 no Brasil:

a)



b)

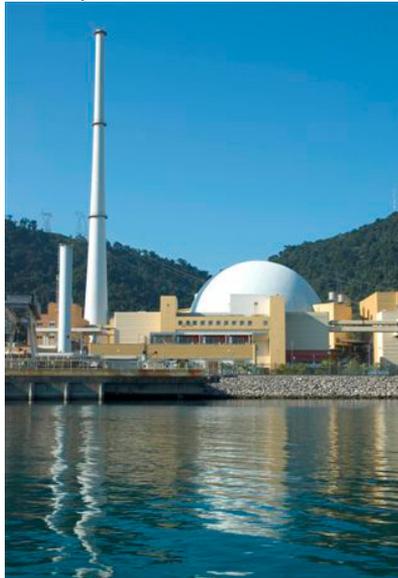


Figura 1.7 – Usina nuclear de (a) Angra 1 e (b) Angra 2.

A figura 1.8 destaca a usina nuclear de Angra 3 no Brasil:



Figura 1.8 – Usina nuclear de Angra 3.

1.8 Solar fotovoltaica

Os sistemas fotovoltaicos são capazes de gerar energia elétrica através das chamadas células fotovoltaicas. As células fotovoltaicas são feitas de materiais capazes de transformar a radiação solar diretamente em energia elétrica através do chamado “efeito fotovoltaico”. Hoje, o material mais difundido para este uso é o silício.

O efeito fotovoltaico acontece quando a luz solar, através de seus fótons, é absorvida pela célula fotovoltaica. A energia dos fótons da luz é transferida para os elétrons, que então ganham a capacidade de se movimentar. O movimento dos elétrons, por sua vez, gera a corrente elétrica.

As células fotovoltaicas podem ser dispostas de diversas formas, sendo a mais utilizada a montagem de painéis ou módulos solares. Além dos painéis fotovoltaicos, utilizam-se filmes flexíveis, com as mesmas características, ou até mesmo a incorporação das células em outros materiais, como o vidro. As diferentes formas com que são montadas as células se prestam à adequação do uso, por um lado maximizando a eficiência e por outro se adequando às possibilidades ou necessidades arquitetônicas.

Quanto aos sistemas fotovoltaicos, estes podem ser divididos em dois grandes grupos: sistemas isolados (*off-grid*) e sistemas conectados à rede (*grid-tie*). Os sistemas isolados são aqueles que não se integram à rede elétrica e geralmente são utilizados em locais remotos ou onde o custo de acesso à rede é maior que o custo do próprio sistema. Normalmente, esses sistemas utilizam bateria para armazenar a energia. Já os sistemas conectados à rede servem como qualquer outra forma de geração de energia que utilizamos a partir da rede elétrica e são utilizados como substitutos destas outras fontes de energia. Neste caso não há necessidade de armazenamento. Observe a figura 1.9 a seguir:

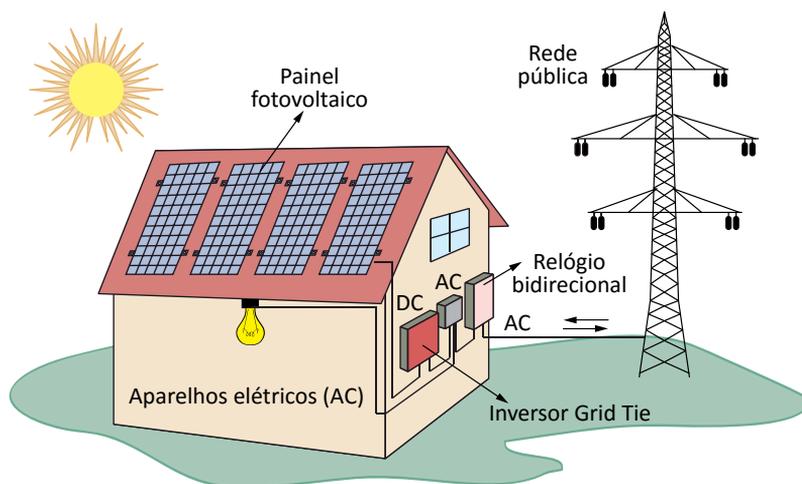


Figura 1.9 – Exemplo de sistema fotovoltaico conectado à rede (*grid-tie*).

1.9 Transmissão

Para que a energia chegue a residências, hospitais, escolas, comércios e indústrias, ela precisa ser transportada de sua fonte geradora por meio de linhas de transmissão. Passando de ponto em ponto, a energia elétrica percorre milhares de quilômetros em corrente alternada (transmissão CA), até chegar a seu destino final.

A primeira etapa é a geração de energia, como foi visto no item 2 deste capítulo. No Brasil, quase 70% da energia elétrica é produzida por hidrelétricas (como Itaipu), que a transmitem por meio de cabos de alta resistência. Para tal, é preciso que uma altíssima tensão elétrica seja gerada, evitando desperdícios ao longo do caminho.

Essa energia em alta voltagem viaja pelos fios da rede elétrica, passando por torres e subestações de energia, que, por sua vez, adaptam a voltagem para o consumidor final. As subestações enviam essa energia até as cidades, através da fiação elétrica que passa pelos postes que vemos nas ruas.

A transmissão DC também é utilizada principalmente em transmissões subaquáticas. Vale destacar que a nova usina de Belo Monte também terá uma linha aérea de transmissão DC, que levará energia do Norte para o Sudeste do país. Ao chegar ao ponto de destino, ela será convertida em CA.

1.10 Componentes do sistema de transmissão de energia elétrica

Todo o sistema de transmissão de energia elétrica poderá ser entendido se analisarmos três componentes principais: torres, isoladores e subestações. As torres têm como função principal erguer as linhas de transmissão a uma altura segura, principalmente para evitar qualquer tipo de contato com pessoas, veículos, animais ou mesmo com a vegetação de uma determinada localidade. Essas torres são projetadas e instaladas para suportar a força dos ventos e até mesmo pequenos tremores de terra.

Os isoladores, por sua vez, evitam que a energia seja dissipada e suportam o peso dos cabos que transmitem a energia elétrica. Normalmente, são fabricados com polímeros, cerâmica ou vidro.

As subestações, por fim, são os locais em que a energia é retransmitida e adequada para o uso final, ou seja, a corrente chega a um ponto com uma tensão muito elevada (imprópria para aplicação), e a subestação reduz a voltagem até um padrão que permite utilização segura e eficiente. Observe a figura 1.10 abaixo:



Figura 1.10 – Exemplo de linhas de transmissão de energia.

1.11 Sistema Interligado Nacional – SIN

Com tamanho e características que permitem considerá-lo único em âmbito mundial, o sistema de produção e transmissão de energia elétrica do Brasil é um sistema hidrotérmico de grande porte, com forte predominância de usinas hidrelétricas e com múltiplos proprietários. O Sistema Interligado Nacional é formado pelas empresas das regiões Sul, Sudeste, Centro-Oeste, Nordeste e parte da região Norte. Apenas 1,7% da energia requerida pelo país está fora do SIN, em pequenos sistemas isolados, localizados principalmente na região amazônica.

1.12 Distribuição

O sistema de distribuição de energia é aquele que se confunde com a própria topografia das cidades, ramificado ao longo de ruas e avenidas para conectar fisicamente o sistema de transmissão, ou mesmo unidades geradoras de médio e pequeno porte, aos consumidores finais da energia elétrica.

A conexão, o atendimento e a entrega efetiva de energia elétrica ao consumidor do ambiente regulado ocorrem por parte das distribuidoras de energia. A energia distribuída, portanto, é a energia efetivamente entregue aos consumidores conectados à rede elétrica de uma determinada empresa de distribuição, podendo ser rede de tipo aérea (suportada por postes) ou de tipo subterrânea (com cabos ou fios localizados sob o solo, dentro de dutos subterrâneos). Do total da energia distribuída no Brasil, dentre as Distribuidoras associadas à *Abradee* (*Associação Brasileira de Distribuidores de Energia Elétrica*), o setor privado é responsável pela distribuição de, aproximadamente, 60% da energia, enquanto as empresas públicas se responsabilizam por, aproximadamente, 40%.

Assim como ocorre com o sistema de transmissão, a distribuição é também composta por fios condutores, transformadores e equipamentos diversos de medição, controle e proteção das redes elétricas. Todavia, de forma bastante distinta do sistema de transmissão, o sistema de distribuição é muito mais extenso e ramificado, pois deve chegar aos domicílios e endereços de todos os seus consumidores.

As redes de distribuição são compostas por linhas de alta, média e baixa tensão. Apesar de algumas transmissoras também terem linhas com tensão abaixo

de 230 kV, as chamadas Demais Instalações da Transmissão (DIT), grande parte das linhas de transmissão com tensão entre 69 kV e 138 kV são de responsabilidade das empresas distribuidoras. Essas linhas são também conhecidas no setor como linhas de subtransmissão.

Além das redes de subtransmissão, as distribuidoras operam linhas de média e baixa tensão, também chamadas de redes primária e secundária, respectivamente. As linhas de média tensão são aquelas com tensão elétrica entre 2,3 kV e 44 kV e são muito fáceis de serem vistas em ruas e avenidas das grandes cidades, frequentemente compostas por três fios condutores aéreos sustentados por cruzetas de madeira em postes de concreto, como mostra a figura 1.11



Figura 1.11 – Poste de concreto usado na rede de distribuição urbana.

As redes de baixa tensão, com tensão elétrica que pode variar entre 110 e 440 V, são aquelas que, também afixadas nos mesmos postes de concreto que sustentam as redes de média tensão, localizam-se a uma altura inferior. As redes de baixa tensão levam energia elétrica até as residências e pequenos comércios/indústrias por meio dos chamados ramais de ligação. Supermercados, comércios e indústrias de médio porte adquirem energia elétrica diretamente das redes de média tensão, devendo transformá-la internamente para níveis de tensão menores, sob sua responsabilidade.

O Brasil conta, em 2015, com mais de 77 milhões de “unidades consumidoras” (UC), termo que corresponde ao conjunto de instalações/equipamentos elétricos caracterizados pelo recebimento de energia elétrica em um só ponto de entrega, com medição individualizada e correspondente a um único consumidor. Do total de UC’s brasileiras, 85% são residenciais.

Pode-se dizer que o setor de distribuição é um dos mais regulados e fiscalizados do setor elétrico; além de prestar serviço público sob contrato com o órgão regulador do setor, a Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL), a própria Agência edita Resoluções, Portarias e outras normas para o funcionamento adequado do setor de Distribuição, sendo muito rigorosa com sua fiscalização. Um exemplo são os Procedimentos de Distribuição (Prodist), que dispõem de disciplinas, condições, responsabilidades e penalidades relativas à conexão, planejamento da expansão, operação e medição da energia elétrica. O Prodist estabelece também critérios e indicadores de qualidade para consumidores e produtores, distribuidores e agentes importadores e exportadores de energia.

Resumindo, a distribuição de energia é um segmento do sistema elétrico, também conhecido como sistema elétrico de potência, o qual pode ser dividido basicamente em três macrossetores: geração, já vista no item 2, transmissão, já tratada no item 3, e distribuição. Dentro de cada segmento, há divisões de níveis de tensão que permitem as interfaces entre as companhias elétricas que têm suas concessões, como a subtransmissão, que é a tensão entregue pelas empresas elétricas de transmissão às concessionárias de distribuição. A função principal dos sistemas elétricos de potência é levar energia elétrica aos consumidores de forma segura, com qualidade e disponibilidade.

O macrosssegmento da distribuição é operado no Brasil por concessionárias de energia elétrica. São 67 empresas, entre as quais 9 estão na região Norte, 11 na região Nordeste, 5 na região Centro-oeste, 22 na região Sudeste e 17 na região Sul do país. Observe a figura 1.13, que mostra, de forma sucinta, a interligação de um sistema elétrico de potência, composto por geração, transmissão, distribuição e consumidores.

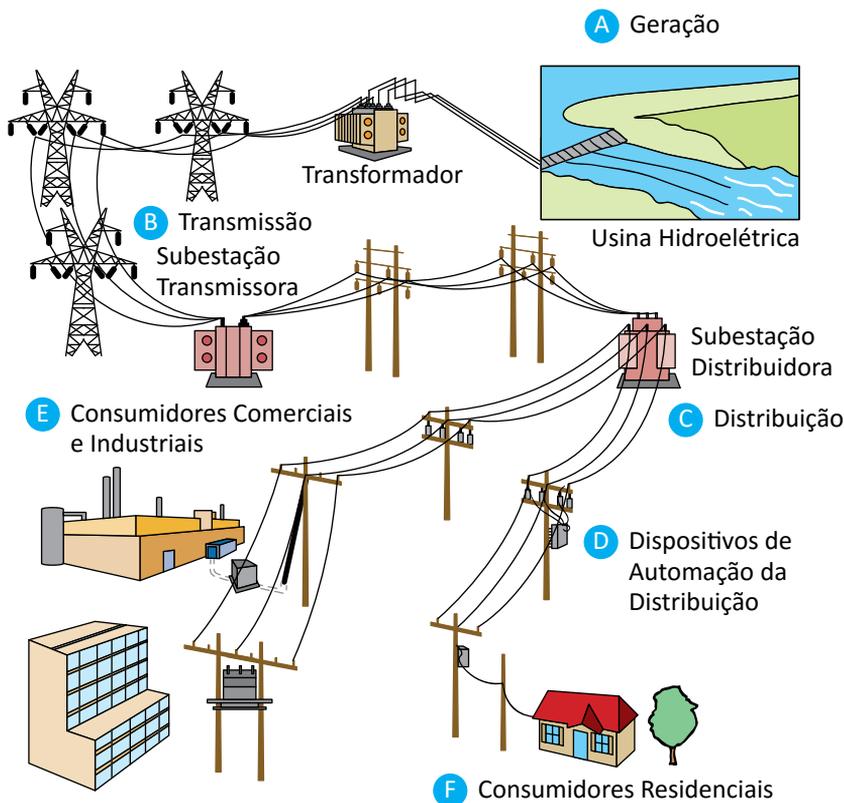


Figura 1.12 – Ideia sucinta de um sistema elétrico de potência, composto por geração, transmissão, distribuição e consumidores.

1.13 Matriz energética, sustentabilidade e perspectivas

Desde o descobrimento do Brasil, utiliza-se a lenha como recurso energético. Todo o ciclo do ouro e da cana-de-açúcar se desenvolveu com o uso da lenha, pois o caldo de cana era aquecido em recipientes de cobre com uso deste combustível. Com o ciclo do café, houve a alteração para o uso do carvão mineral. No entanto, com a Primeira Guerra Mundial, a importação do carvão se tornou difícil, alavancando investimentos na geração de energia elétrica entre 1901 e 1930 (crescimento de 15,6%).

Na estatística da matriz energética atual brasileira, embora estejamos em período de transição, o petróleo e seus derivados representam 42% do total em relação a 35% da matriz de outros países. Contudo, o cenário é promissor. O Brasil já tem 27% de sua matriz energética derivada da biomassa contra 11% no resto do mundo. É claro que este número é assimétrico, principalmente devido à expansão do agronegócio e do cultivo da soja que representa imensa maioria no setor, em contraponto com a falta de investimentos em pesquisa e desenvolvimento de novas fontes de matérias-primas alternativas que não concorram com a indústria de alimentos e tecnologias agrônômicas para investimentos em plantas com alto valor energético reconhecido, como o pinhão-manso. Iniciativas recentes, como a parceria entre uma empresa aérea e consórcios internacionais com intuito de fortalecer as pesquisas em torno do pinhão-manso na região centro-oeste do Brasil, podem ajudar a viabilizar o uso de "combustível verde" em aviões comerciais, com consequente alavancagem do setor de inovação nos próximos anos. As vantagens da inserção da cadeia produtiva do biodiesel na matriz energética brasileira são muitas: biodiversidade de oleaginosas, diminuição da emissão de gases, ocupação de imensas áreas degradadas, além do alto potencial de desenvolvimento tecnológico. A substituição gradual do diesel por biodiesel representa efetiva vantagem econômica. Contudo, ao longo dos próximos anos, será indispensável o aprimoramento das políticas públicas e forte investimento em pesquisas em parcerias público-privadas para que o pequeno consumidor de óleo diesel possa, aos poucos, trocar sua matriz energética. Também será importante investir em ativos e componentes da cadeia produtiva do biodiesel, que muitas vezes são importados.

O declínio na oferta de petróleo no mundo afetará o conjunto das cadeias produtivas que dele dependem, sendo um caminho natural o uso de biomassa como alternativa para este setor. No entanto, a concretização desta previsão poderá ser antecipada ou retardada em função do investimento em PD&I (Pesquisa Científica e Desenvolvimento Tecnológico com Inovação). O poder regulatório e de intervenção do governo pode alterar o quadro exposto, desde que este atue ativamente e na direção correta em médio e longo prazo. No Brasil, é de fundamental importância que aspectos sociais e ambientais sejam considerados, pois o futuro dos biocombustíveis pode estar relacionado à interiorização do desenvolvimento e envolvimento de propriedades rurais e de indústrias de pequeno e médio porte no processo, posto que a autossuficiência energética destes setores poderá minimizar custos e contrabalançar a falta de

investimentos em infraestrutura, como o transporte fluvial e ferrovias, situação que torna, muitas vezes, o frete inviável para várias regiões brasileiras, deixando a indústria nacional em desvantagem em relação a vários países com índices de desenvolvimento próximos.

No caso da eletricidade como fonte de energia, está distribuída em 13% da matriz brasileira comparada com a média de 2% do resto do mundo. Investimentos governamentais e privados no setor, nos últimos anos, além do grande potencial hídrico do Brasil, explicam tal situação. Para se ter uma ideia, do total de empreendimentos, são 846 hidrelétricas que geram 68% da energia elétrica do País, ou seja, 78.979.833 kW. Dados do Ministério de Minas e Energia avaliam que o potencial energético dos rios brasileiros pode chegar a 258.410 megawatts, sendo que hoje apenas 28% são aproveitados.

As três grandes bacias hidrográficas do país (Amazonas, São Francisco e Paraná) cobrem cerca de 70% do território nacional e concentram 80% do volume de água do país, uma força impressionante comparada aos outros países. Em razão do forte investimento no setor, a energia elétrica obtida de hidrelétricas é proporcionalmente bem mais barata que outras fontes: R\$ 78 MW/h, enquanto o valor para usinas eólicas é de R\$ 150,00 e de usinas a gás, R\$ 200,00. O pouco incentivo para subsidiar energias alternativas e desenvolvimento de tecnologias nacionais, inclusive para energia solar, agrava ainda mais o quadro, que poderia ser diferente. Na China, grandes investimentos em pesquisas em células fotovoltaicas permitem que, hoje, condomínios inteiros possam adquirir placas solares, perfazendo a área de um estádio de futebol com viabilidade econômica.



ATIVIDADE

01. Faça um resumo de cada item deste capítulo, destacando as partes principais abordadas.



REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

www.cpfli.com.br/energias.../eficiencia.../historia-da-energia
https://pt.wikipedia.org/wiki/Charles_Augustin_de_Coulomb
https://pt.wikipedia.org/wiki/Luigi_Galvani
https://pt.wikipedia.org/wiki/Alessandro_Volta

https://pt.wikipedia.org/wiki/André-Marie_Ampère
https://pt.wikipedia.org/wiki/Hans_Christian_Ørsted
https://pt.wikipedia.org/wiki/Georg_Simon_Ohm
https://pt.wikipedia.org/wiki/Thomas_Edison
https://pt.wikipedia.org/wiki/Nikola_Tesla
<oengeletricista.blogspot.com/2013/.../transformadores>
www.ufrgs.br/eng04030/Aulas/teoria/cap_13/tiaptran.htm
<www.fotosearch.com.br/fotos-imagens/transformadores>
<www.joinville.udesc.br>
White, M. Rivalidades Produtivas, Editora Record, Rio de Janeiro, 2003
https://pt.wikipedia.org/wiki/Geração_de_eletricidade
<http://www.infoescola.com/energia/usina-hidreletrica>
<www.infoescola.com/fisica/usina-termoeletrica>
<www.mundoeducacao.com/geografia/usina-termeletrica.htm>
<www.brasilecola.com> › Física › Física Moderna
<www.eletronuclear.gov.br> › ... › Central Nuclear › Angra 1
<www.eletronuclear.gov.br> › ... › Central Nuclear › Angra 2
<www.eletronuclear.gov.br> › ... › Central Nuclear › Angra 3
<www.neosolar.com.br/aprenda/saiba-mais/energia-solar-fotovoltaica>
<www.tecnogeradores.com.br/.../como-funcionam-linhas-de-transmis...>
<www.abradee.com.br/setor-de-distribuicao/a-distribuicao-de-energia>
www.ambito-juridico.com.br/site/index.php?n_link=revista...id...
www.andradecanellas.com.br/default.asp?id_materia=7095

2

Conceitos Básicos de Corrente, Tensão, Resistência, Potência e Energia Elétricas; Lei de Ohm



OBJETIVOS

- Citar as definições e unidades usadas no Sistema Internacional de Unidades;
 - Estudar a carga elétrica, corrente elétrica, natureza das cargas elétricas, tensão elétrica, noção qualitativa de campo elétrico, sentido convencional de deslocamento (ou fluxo) da corrente elétrica, fenômenos que caracterizam a corrente elétrica, noção qualitativa de diferença de potencial elétrico e noção quantitativa de diferença de potencial elétrico;
 - Com base no item anterior, deduzir a Lei de Ohm, aplicando-a no estudo da potência elétrica e energia elétrica.
-

2.1 Definições e unidades

Um *circuito elétrico*, ou *rede elétrica*, é uma coleção de elementos elétricos (p. ex. resistores, indutores, capacitores, geradores e outros) interligados de maneira específica. Elementos de circuitos podem ter dois ou mais terminais. No momento, serão apresentados apenas elementos elétricos de dois terminais (bipolos), como mostra a figura 2.1:



Figura 2.1 – Bipolo genérico.

Posteriormente, nos cursos de Eletrônica Analógica, serão abordados alguns elementos multiterminais (p. ex. transistores, amplificadores operacionais e outros). A figura 2.2 mostra um circuito elétrico com seis bipolos genéricos interligados:

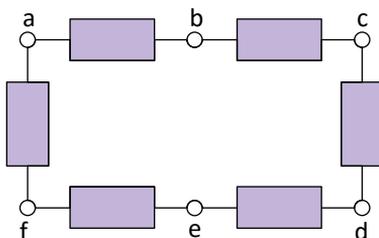


Figura 2.2 – Circuito elétrico.

Um circuito deve ter, no mínimo, um percurso fechado, como o percurso abcdefa do circuito da figura 2.2, sem o qual será de pouco ou nenhum interesse prático. Na definição de um elemento de circuito, devem-se considerar certas quantidades associadas a ele, como *tensão* e *corrente*. A estas grandezas, e outras mais, há unidades de medidas padrões associadas no chamado *Sistema Internacional de Unidades* (SI), adotado em 1960 pela Conferência Geral de Pesos e Medidas. Existem seis unidades básicas no SI, e todas as outras são derivadas destas. Quatro destas unidades básicas – metro, quilograma, segundo e Coulomb – são importantes para a teoria de circuitos; as duas restantes são o grau Kelvin e a candela, importantes para as áreas de física dos dispositivos eletrônicos e engenharia de iluminação. A tabela 2.1 relaciona algumas unidades no SI com o Sistema Britânico de Unidades (SBU):

SI	SBU
Comprimento → metro (m)	Comprimento → polegada = 0,0254 m
Massa → quilograma (kg)	Massa → libra-massa = 0,45359237 kg
Tempo → segundo (s)	Tempo → segundo (s)

Tabela 2.1 – Algumas unidades relacionadas entre o SI e o SBU.

Como o SI incorpora o sistema decimal para relacionar unidades grandes e pequenas às unidades básicas, as várias potências de 10 são designadas por prefixos-padrões seguidos de suas abreviaturas ou símbolos na tabela 2.2:

FATOR	PREFIXO	SÍMBOLO	FATOR	PREFIXO	SÍMBOLO
$10 = 10^1$	deca	da	$0,1 = 10^{-1}$	deci	d
$100 = 10^2$	hecto	h	$0,01 = 10^{-2}$	centi	c
$1000 = 10^3$	quilo	k	$0,001 = 10^{-3}$	mili	m
$1000000 = 10^6$	mega	M	$0,000001 = 10^{-6}$	micro	μ
$1000000000 = 10^9$	giga	G	$0,000000001 = 10^{-9}$	nano	n
$1000000000000 = 10^{12}$	tera	T	$0,000000000001 = 10^{-12}$	pico	p
$1000000000000000 = 10^{15}$	peta	P	$0,000000000000001 = 10^{-15}$	femto	f
$100000000000000000 = 10^{18}$	exa	E	$0,00000000000000001 = 10^{-18}$	atto	a
$10000000000000000000 = 10^{21}$	zetta	Z	$0,0000000000000000001 = 10^{-21}$	zepto	z
$1000000000000000000000 = 10^{24}$	yotta	Y	$0,000000000000000000001 = 10^{-24}$	yocto	y

Tabela 2.2 – Alguns prefixos utilizados com as unidades do SI.

2.2 Carga elétrica e corrente elétrica

2.2.1 Carga elétrica

Existem corpos que se atraem mutuamente por forças proporcionais às suas massas (p. ex. força gravitacional terrestre). Outros corpos, contudo, atraem-se

mutuamente por forças não proporcionais às suas massas. Tais forças podem *atrair* ou *repelir* esses corpos; explicam-se essas forças afirmando-se que são de *natureza elétrica* e aparecem pela presença de cargas elétricas. A existência de ambas as forças, atração e repulsão, é justificada por dois tipos de cargas, positivas e negativas; cargas diferentes se atraem e iguais se repelem. Veja a figura 2.3:

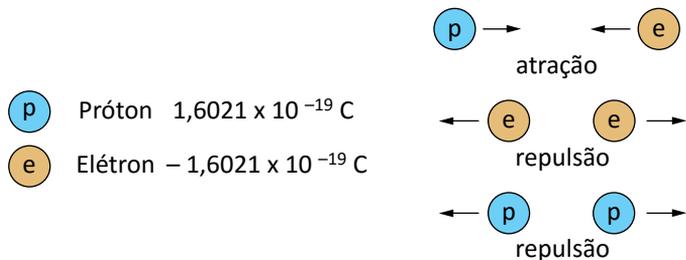


Figura 2.3 – Cargas elétricas.

De acordo com a teoria moderna, a matéria é feita de átomos, que são compostos de partículas fundamentais. As mais importantes são os *prótons* (carga positiva) e os *nêutrons* (ausência de carga), localizadas no núcleo do átomo, e os *elétrons* (cargas negativas), que descrevem uma órbita em torno do núcleo. Normalmente, o *átomo* é *eletricamente* neutro; as cargas negativas dos elétrons contrabalançam as cargas positivas dos prótons, como mostra o exemplo genérico da figura 2.4.

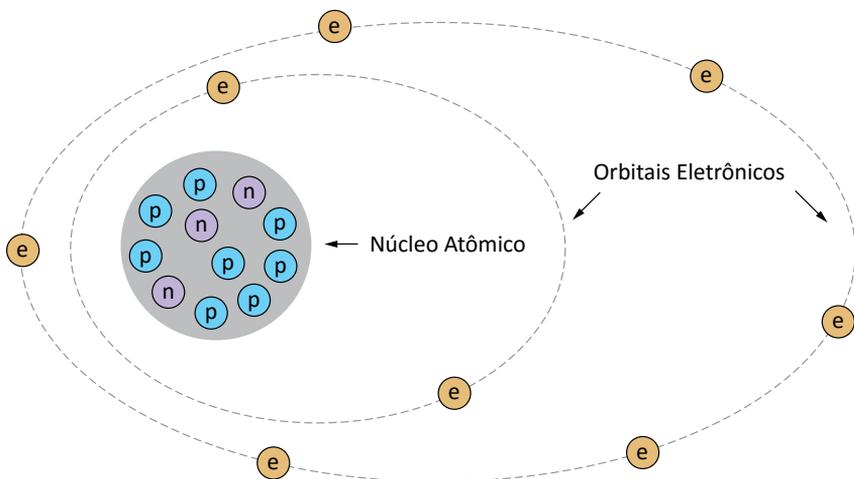


Figura 2.4 – Exemplo genérico de um átomo eletricamente neutro.

Átomos podem se tornar *positivamente carregados se perderem um ou mais elétrons de sua camada eletrônica*, e neste caso passam a ser chamados de *íons positivos* ou *íons cátion* ou simplesmente *cátions*, como mostra o exemplo genérico da figura 2.5.

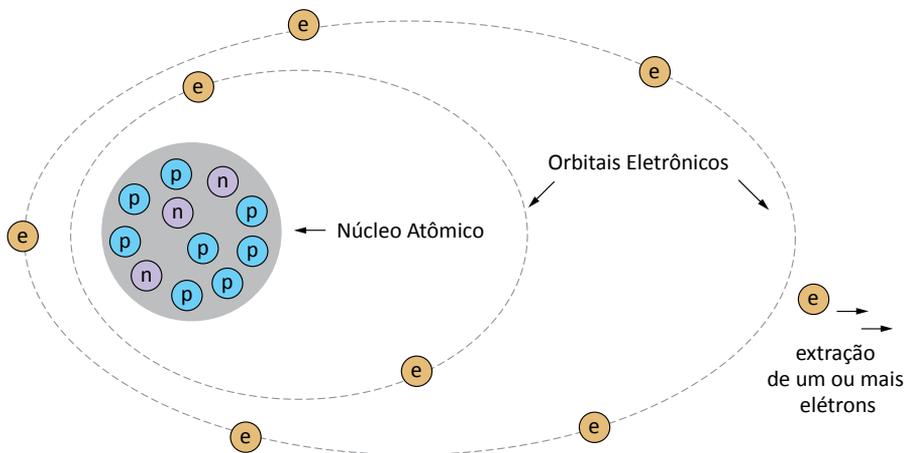


Figura 2.5 – Exemplo genérico de um átomo positivamente carregado → íon cátion ou cátion.

Em contrapartida, átomos podem se tornar *negativamente carregados se ganharem um ou mais elétrons em sua camada eletrônica*, e neste caso passam a ser chamados de *íons negativos* ou *íons ânion* ou simplesmente *ânions*, como mostra o exemplo genérico da figura 2.6.

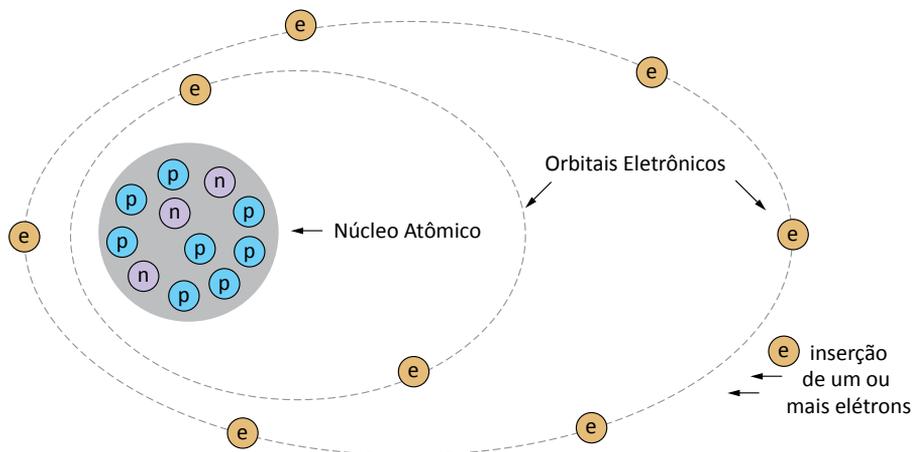


Figura 2.6 – Exemplo genérico de um átomo negativamente carregado → íon ânion ou ânion.

É importante ressaltar que, entre as duas partículas atômicas eletricamente carregadas acima consideradas, os elétrons e os prótons, as que podem ser facilmente deslocadas são os elétrons, uma vez que os prótons estão fortemente ligados e confinados no interior do núcleo atômico.

A carga de um elétron é, por convenção, negativa, e é igual a $-1,6021 \times 10^{-19}$ coulomb (C), cuja unidade do SI homenageia o cientista francês, inventor e engenheiro militar Charles Augustin de Coulomb (1736-1806), um dos pioneiros no campo da fricção, eletricidade e magnetismo. A carga de um próton é, por convenção, positiva e é igual à do elétron em módulo, ou seja, $1,6021 \times 10^{-19}$ C, embora a massa de um próton seja muito maior que a de um elétron.

Sendo assim, um cátion pode ter a carga de um ou mais prótons, dependendo de quantos elétrons deixarem a sua camada eletrônica; por sua vez, um ânion pode ter a carga de um ou mais elétrons, dependendo de quantos elétrons se fixarem em sua camada eletrônica.

Como a carga elétrica de um elétron ou de um próton é muito pequena, definiu-se que a unidade básica de uma carga elétrica é igual a 1 C, o que corresponde a uma carga equivalente a $6,24 \times 10^{18}$ elétrons reunidos. Antes de prosseguir, estude os exercícios resolvidos 1, 2 e 3, no final deste capítulo.

2.3 Corrente elétrica

A proposição básica de um circuito elétrico é a de mover ou transferir cargas elétricas através de um determinado percurso fechado. Considere a figura 2.7 abaixo:

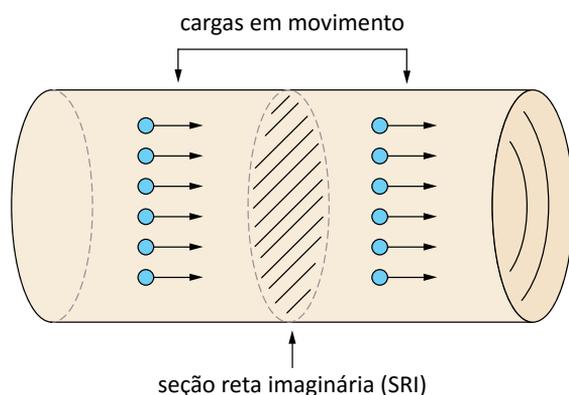


Figura 2.7 – Cargas em movimento através de um condutor metálico.

A corrente elétrica é definida como a quantidade de cargas que atravessam a SRI em um dado intervalo de tempo. Sendo assim, observe os dois exemplos a seguir:

★ EXEMPLO

01. Para um intervalo de tempo $\Delta t = 3\text{s}$, a quantidade de cargas que atravessam a SRI é igual a $\Delta q = 3\text{C}$;

02. Diminuindo-se o intervalo de tempo Δt para $\Delta t = 2\text{s}$, observa-se que $\Delta q = 2\text{C}$;

03. Seguindo-se este procedimento, tem-se que: $\Delta q/\Delta t = 3/3 = 2/2 = 1/1 = 0,1/0,1 = \dots = 0,00\dots 1/0,00\dots 1 = 1\text{C/s}$.

Portanto, a corrente elétrica permanece constante para qualquer intervalo de tempo considerado. Neste caso, o símbolo que denota a corrente elétrica é I , originária da palavra francesa "*intensité*", e a unidade é dada por C/s ou *ampère* (A), que é a unidade básica de corrente elétrica, e é assim denominada em homenagem a André Marie Ampère (1775-1836), o matemático e físico francês que formulou leis do eletromagnetismo na década de 1820. Um ampère, portanto, é igual a 1 coulomb por segundo.

Por definição, se um fluxo constante de 1 C de carga passar por uma SRI num condutor em 1 s, a corrente resultante será de 1 A. Em geral, tem-se:

$$I = Q(\Delta q) / t(\Delta t), \text{ C/s ou A} \therefore I \text{ cte } \forall \Delta t \text{ e } Q \text{ uniforme ao longo de qualquer } \Delta t. \quad (2.1)$$

★ EXEMPLO

01. Se, para um intervalo de tempo $\Delta t = 3\text{ s}$, a quantidade de carga que atravessa a SRI é *variante*, e portanto *inconstante ao longo dos 3 s*, a equação (2.1) não mais fornecerá o valor exato da corrente para um intervalo de tempo Δt , dentro do qual o fluxo de carga varia a todo momento. Neste caso, é necessário reduzir o intervalo de tempo " Δt " para um *valor tão pequeno que a imaginação humana não possa conceber, a fim de se ter o valor exato do fluxo de carga*, e, portanto, da corrente, neste pequeníssimo intervalo de tempo agora considerado. O símbolo que denota este pequeníssimo intervalo de tempo é " dt ", denominado pelo cálculo

integral e diferencial de *intervalo infinitesimal* (de tempo, no caso), ou simplesmente de *infinitésimo* (de tempo). Em resumo: “ Δ ” \rightarrow acréscimo ou intervalo mensurável de uma grandeza qualquer, e “ d ” \rightarrow intervalo infinitesimal ou infinitésimo de uma grandeza qualquer. É evidente, portanto, que, *durante um intervalo infinitesimal de tempo*, fluirá, através da SRI do condutor mostrado na figura 2.7, uma *quantidade infinitesimal de carga elétrica*, simbolizada por “ dq ”. A *corrente instantânea* – e, portanto, *exata* – que flui através da SRI durante o *intervalo infinitesimal de tempo* dt é dada por:

$$i(t) = dq / dt, \text{ C/s ou A. } \therefore i(t) \text{ variante } \forall dt \text{ e fluxo de carga variante de } dt \text{ para } dt. \quad (2.2)$$

02. Portanto, se existe uma corrente constante no tempo através de um condutor, por exemplo, usa-se a equação (2.1) para o seu cálculo, doravante expressa apenas como:

$$I = Q / t \cdot A \quad (2.3)$$

03. Em contrapartida, se existe uma corrente variante no tempo através de um condutor, por exemplo, usa-se a equação (2.2) para o seu cálculo, doravante expressa apenas como:

$$i(t) = dq / dt \cdot A \quad (2.4)$$

04. O que faz a corrente ser variante ou invariante (constante) no tempo é o tipo de fonte de alimentação à qual um circuito elétrico está ligado.

2.4 Natureza das cargas elétricas

A natureza das cargas elétricas que compõem uma determinada corrente elétrica está intimamente ligada com o tipo do meio condutor considerado. Portanto, considerem-se os seguintes meios:

1. **Líquidos e gases:** deslocamento de íons e elétrons;
2. **Sólidos:** deslocamento de elétrons, apenas. Particularmente, para este curso de circuitos elétricos, este é o meio de interesse e, portanto, onde os estudos a respeito de correntes elétricas são analisados. Sendo assim, como os

circuitos elétricos de interesse consistem quase inteiramente de materiais sólidos (**p. ex.** condutores metálicos, elementos de circuito, e outros), somente os elétrons produzem fluxo de corrente em todos os circuitos compostos de materiais condutores. Em circuitos compostos por materiais semicondutores (**p. ex.** diodos, transistores, e outros), os quais são estudados em detalhes na disciplina Eletrônica Analógica, os elétrons continuam sendo as únicas partículas atômicas a se deslocar. No entanto, devido à natureza deste deslocamento, que se realiza através de átomos que compartilham elétrons de valência (**p. ex.** silício, germânio, e outros), observa-se o deslocamento de cargas elétricas positivas (buracos ou lacunas) e negativas (elétrons). Com relação à direção (ou sentido) do deslocamento das cargas elétricas (especificamente de elétrons livres em materiais condutores), será feito em estudo detalhado mais adiante. Antes de prosseguir, estude os exercícios resolvidos 4, 5, 6, 7 e 8, no final deste capítulo.

2.5 Tensão elétrica

2.5.1 Noção qualitativa de campo elétrico

Uma carga elétrica puntiforme cria, em torno de si, um campo elétrico. As forças entre duas cargas elétricas não são exercidas pelas cargas em si, mas pelos campos que elas criam. Um campo elétrico pode ser criado tanto por uma única carga quanto por um conjunto de cargas. De modo geral, “diz-se haver um campo elétrico em um ponto do espaço sempre que uma carga elétrica, colocada neste ponto, fique solicitada por uma força de origem elétrica”. Por convenção, “considera-se a linha de força de um campo elétrico como a trajetória que seria seguida por uma carga elétrica puntiforme *positiva*, caso fosse abandonada à ação do campo”. Ao se fazer esta consideração, atribui-se um sentido às *linhas de força*: “sentido que vai de um corpo com carga positiva para outro com carga negativa”.

2.6 Sentido convencional de deslocamento (ou fluxo) da corrente elétrica

Em sentido amplo, *corrente elétrica* é qualquer deslocamento de cargas elétricas. Em virtude da existência de duas espécies de cargas elétricas, foi necessário convencionar um sentido para a corrente elétrica. A convenção, estabelecida antes de se ter conhecimento da estrutura atômica da matéria, é a seguinte: “O sentido convencional de uma corrente elétrica é o do deslocamento das cargas positivas”. Esta convenção foi estabelecida por Benjamin Franklin (1706-1790), o qual imaginou que a corrente elétrica fluía do positivo para o negativo (compare com a convenção estabelecida para o sentido das linhas de fluxo de um campo elétrico no item 3.1, que leva em conta o deslocamento de uma carga positiva). Você deve estar achando que se deveria mudar o sentido convencional da corrente elétrica para que coincidissem com o deslocamento das cargas negativas. Afinal, através dos condutores metálicos, só os elétrons se deslocam quando se desprendem das órbitas dos átomos do metal. Você não deve esquecer, porém, que, no caso dos gases e das soluções eletrolíticas, há um deslocamento simultâneo de íons positivos (cátions) e íons negativos (ânions), em sentidos opostos, estabelecendo-se, para efeito de análise, um único sentido de deslocamento, que some as contribuições das cargas positivas e negativas.

Como se vê, não haveria grande vantagem em mudar o sentido convencional da corrente elétrica, pois estaríamos atendendo especificamente ao caso do deslocamento dos elétrons, esquecendo-nos do que ocorre nas soluções líquidas e gasosas.

Deve ficar bem claro que, a menos que seja especificado de outro modo, ao falarmos em sentido de uma corrente elétrica, estaremos nos referindo ao sentido convencional.

É importante observar que, quando o intervalo de tempo durante o qual se processa o deslocamento de cargas elétricas é muito curto (da ordem de uma fração de segundo), prefere-se usar a expressão descarga elétrica em lugar de corrente elétrica.

Com relação ao modo como se processa o deslocamento (ou fluxo) da corrente elétrica, a tabela 2.3 mostra a seguinte classificação:

CLASSIFICAÇÃO GERAL	
CORRENTE DIRETA (<i>DIRECT CURRENT</i>)	CORRENTE ALTERNADA (<i>ALTERNATING CURRENT</i>)
<p>Classificação parcial</p> <p>1. Direta pulsante → significa que a corrente tem o mesmo sentido ou direção de deslocamento, mas varia continuamente sua intensidade ao longo do intervalo total de tempo considerado. A notação (ou símbolo) comumente usada é a seguinte:</p> <ul style="list-style-type: none"> ▪ domínio do tempo: i_{DC} ou i_{dc} ou i ou $i(t)$. ▪ domínio da frequência: I_{DC} ou I_{dc} ou I. <p>Obs.: A notação "dc" vem do inglês – <i>direct current</i>.</p> <p>2. Direta contínua → significa que a corrente tem o mesmo sentido ou direção de deslocamento e não varia sua intensidade ao longo do intervalo total de tempo considerado. A notação (ou símbolo) comumente usada é a seguinte:</p> <ul style="list-style-type: none"> ▪ domínio do tempo: i_{DC} (ou I_{CC}) ou I_{dc} (I_{cc}) ou I. <p>Obs.: A notação "cc" vem do inglês – <i>continuous current</i> – que se confunde com corrente contínua no português. Normalmente, a bibliografia escrita em inglês se refere às correntes diretas pulsantes e às diretas contínuas com o subscrito "dc".</p>	<p>Classificação parcial</p> <p>1. Alternada (pulsante ou não) ou simplesmente alternada → significa que a corrente, em um intervalo total de tempo considerado, tem um determinado sentido ou direção de deslocamento até um dado momento deste intervalo, variando continuamente ou não sua intensidade e, a partir deste momento, inverte o seu sentido ou direção de deslocamento, variando continuamente ou não sua intensidade, até o final do intervalo total de tempo considerado. A notação (ou símbolo) comumente usada é a seguinte:</p> <ul style="list-style-type: none"> ▪ domínio do tempo: i_{AC} ou i_{ac} ou i ou $i(t)$. ▪ domínio da frequência: I_{AC} ou I_{ac} ou I. <p>Obs.: A notação "ac" vem do inglês – <i>alternating current</i>. Normalmente, mas nem sempre, a bibliografia escrita em português se refere a este tipo de corrente com o subscrito "ca", devido ao fato de a escrita em português ser corrente alternada. A maneira usual que se encontra nas diversas bibliografias escritas em vários idiomas é a seguinte: "ac".</p>

Tabela 2.3 – Classificação da corrente elétrica quanto ao modo como se processa o seu deslocamento ou fluxo.

2.7 Fenômenos que caracterizam a corrente elétrica

EFEITOS TÉRMICOS	Um condutor se aquece ao ser percorrido por uma corrente elétrica. Qualquer aquecedor elétrico demonstra isto.
EFEITOS LUMINOSOS	Um gás rarefeito emite luz quando atravessado por uma corrente elétrica. É o caso, por exemplo, dos anúncios luminosos (tubos de néon). Devemos nos lembrar que a luz emitida por uma lâmpada de incandescência não é um efeito luminoso da corrente elétrica, mas uma consequência do seu efeito térmico. A corrente elétrica aquece o filamento da lâmpada. É este que, por incandescência, emite luz.
EFEITOS QUÍMICOS	Uma solução eletrolítica sofre o fenômeno da eletrólise ao ser percorrida por uma corrente elétrica.
EFEITOS MAGNÉTICOS	Uma agulha imantada sofre um desvio ao ser colocada nas proximidades de um condutor por uma corrente elétrica.

2.8 Noção qualitativa de diferença de potencial elétrico

Considere dois condutores eletrizados, ambos isolados. Suponha que se ligue um ao outro por meio de um fio condutor. Há duas hipóteses a se considerar:

1ª hipótese:

Pode haver uma transferência de cargas elétricas de um condutor para o outro. Isto ocorrendo, dizemos que entre dois condutores existe uma diferença de potencial (abreviando-se: d.d.p.). Podemos, também, dizer que os dois condutores têm potenciais diferentes. Por convenção, “tem potencial maior o condutor que, pela ligação, diminui suas cargas positivas (ou, aumenta suas cargas negativas)”. Ao ligarmos um condutor positivamente carregado à Terra, ele diminui suas cargas positivas, pois se descarrega. Na realidade, ele ganha cargas negativas que neutralizam as suas cargas positivas. Logo, o potencial de um condutor com carga positiva é maior que o da Terra, assim como o potencial de um condutor com carga negativa é menor que o da Terra. Por convenção, “o potencial da Terra é nulo”.

2ª hipótese:

Pode não haver transferência de cargas elétricas entre os dois condutores, apesar da ligação. Neste caso, dizemos que os dois condutores têm o mesmo potencial, ou que a d.d.p. entre eles é nula.

2.9 Noção quantitativa de diferença de potencial elétrico

Quantitativamente, define-se: “Diferença de potencial entre dois condutores é a razão entre o trabalho realizado para transportar uma carga elétrica, positiva, entre os dois condutores, e a carga transportada”. Se q é a carga positiva transportada e τ é o trabalho realizado para transportá-la do condutor A até o condutor B , a d.d.p. $V_A - V_B$ (ou V_{AB}) entre o condutor A e o condutor B será dada por:

$$V_A - V_B = V_{AB} = \tau/q \quad (2.5)$$

Cargas em um condutor, exemplificadas por elétrons livres, podem mover-se aleatoriamente. Entretanto, se queremos um movimento orientado, como no caso da corrente elétrica, devemos aplicar uma *força eletromotriz* (f.e.m.). Portanto, um trabalho é realizado sobre as cargas. Definiremos a tensão “sobre” um elemento de circuito como o trabalho realizado para mover uma unidade

de carga (definida como sendo $+1C$) através do elemento, de um terminal para o outro. A unidade de tensão, ou *diferença de potencial*, como é algumas vezes chamada, é o *volt* (V), em honra ao físico italiano Alessandro Giuseppe Antonio Anastasio Volta (1745-1827), que inventou a bateria voltaica.

Visto que a tensão é o número de joules de trabalho desenvolvido sobre 1 coulomb, podemos dizer que 1 V é igual a 1 J/C. Então, o volt é uma unidade derivada no SI, expressa em termos de outras unidades.

Representamos uma tensão por vou V e usaremos a convenção de polaridade (+ e -) mostrada na figura 2.8:

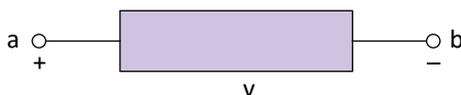


Figura 2.8 – Convenção de polaridade de tensão.

Na figura 2.8, o terminal a é v volts positivo em relação ao terminal b . Em termos de diferença de potencial, o terminal a está num *potencial v volts* acima do terminal b . Em termos de trabalho, é claro que, para mover uma unidade de carga do terminal b para o terminal a , são necessários v joules de trabalho. Alguns autores preferem descrever a tensão sobre um elemento de circuito em termos de queda e elevação de tensão. Com referência à figura 2.8, uma queda de tensão de v volts ocorre no movimento de a para b . Em contraste, uma elevação de tensão de v volts ocorre no movimento de b para a .

2.10 Lei de Ohm

Ao passar por um condutor, os elétrons livres colidem com os átomos do condutor e perdem um pouco da energia cinética que é transformada em calor. Uma tensão aplicada fará com que eles recuperem a energia e a velocidade, mas as colisões subsequentes as reduzirão novamente. Este aumento e redução ocorrem continuamente à medida que os elétrons livres se deslocam entre os átomos do condutor.

Resistência é a propriedade dos materiais de se opor ou resistir ao movimento dos elétrons e exige a aplicação de uma tensão para fazer passar a corrente. Nos condutores metálicos, e em outros tipos de condutores, a corrente é proporcional à tensão aplicada. George Simon Ohm, físico alemão (Erlangen

1789 – Munique 1854), introduziu uma terminologia científica nos fenômenos de eletrocinética, comparando a corrente elétrica à vazão de um líquido, e a diferença de potencial a uma diferença de nível; definiu de maneira precisa as grandezas elétricas. Formulou, em 1827, a lei fundamental da eletrocinética.

Pela Lei de Ohm, referente a correntes estacionárias, “a corrente num circuito é diretamente proporcional à força eletromotriz total do circuito e inversamente proporcional à resistência total do mesmo”. Se, através de um bipolo genérico (figura 2.1), a tensão aplicada nos seus terminais for diretamente proporcional à intensidade de corrente que o atravessa, esse bipolo genérico é chamado de “bipolo ôhmico”.

Para se levantar, experimentalmente, a curva característica da tensão em função da corrente para um bipolo, é preciso que se meça a intensidade de corrente que o percorre e a tensão aplicada em seus terminais. Para tal, considere-se o circuito da figura 2.9:

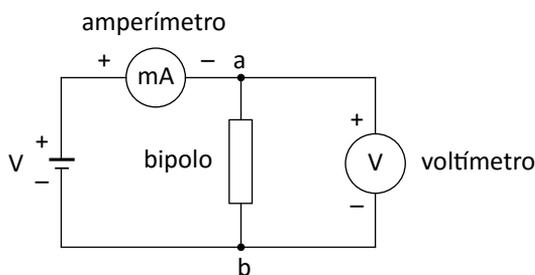


Figura 2.9 – Circuito para levantamento da curva característica de tensão e corrente para um bipolo. AFG.

LEITURA DO VOLTÍMETRO (V)	LEITURA DO AMPERÍMETRO (mA)
0	0
2	20
4	40
6	60
8	80
10	100

Tabela 2.4 – Valores de tensão e corrente através do bipolo.

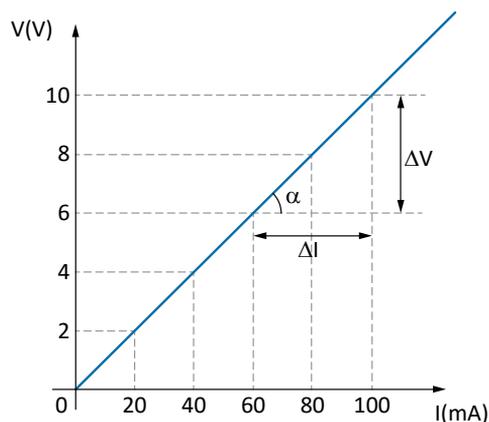


Figura 2.10 – Curva característica do bipolo.

Após o preenchimento da tabela 2.4 de forma experimental e o consequente levantamento da curva característica mostrada na figura 2.10, conclui-se que o bipolo em estudo (resistor) apresenta uma característica linear (uma reta). Da característica temos que:

$$\operatorname{tg} \alpha = \Delta V / \Delta I \quad (2.6)$$

em que ΔV representa qualquer intervalo de valores de tensão que variem de 0 V a 10 V, e ΔI representa qualquer intervalo de valores de corrente que variem de 0 mA a 100 mA. Da figura 4.2, substituindo-se o valor de $\Delta V = 10 - 6 = 4\text{V}$ e o valor de $\Delta I = (100 - 60) \times 10^{-3} = 40 \times 10^{-3}\text{A} = 40 \text{ mA}$, na equação (2.6), tem-se que $\operatorname{tg} \alpha = 100 \text{ V/A}$. O valor de $\operatorname{tg} \alpha$ é constante e igual a 100 V/A ao longo dos intervalos de $\Delta V = [0\text{V}, 10\text{V}]$ e $\Delta I = [0 \text{ mA}, 100 \text{ mA}]$; ele mede, ao longo desta variação de V & I, o valor quantitativo da resistência feita pelo resistor à passagem da corrente elétrica. Logo, é conveniente que se escreva $\operatorname{tg} \alpha = R$, em que R é o símbolo da resistência do resistor, cuja unidade no SI, em homenagem a George Simon Ohm, é o *ohm*, simbolizada pela letra grega maiúscula ômega – Ω .

Nos condutores metálicos e nos outros tipos de condutores, a corrente é geralmente proporcional à tensão aplicada: dobrando-se a tensão, dobra-se a corrente; triplicando-se a tensão, triplica-se a corrente, e assim por diante. Portanto, sendo este o caso do circuito da figura 2.9, após toda a análise feita, variando-se a diferença de potencial $V_a - V_b = V$ através do resistor de resistência

R, a corrente através dele varia proporcionalmente segundo a equação (2.7) abaixo:

$$I = (V_a - V_b) / R \rightarrow I = V / R \quad (2.7)$$

em que R, conforme já se viu, é a constante de proporcionalidade. Esta relação é conhecida como *Lei de Ohm*. A equação (2.7) ainda pode ser escrita como:

$$V_a - V_b = R \cdot I \rightarrow V = R \cdot I \quad (2.8)$$

que é a forma mais conhecida da Lei de Ohm. Segundo a Lei de Ohm, mais especificamente pela equação (2.7), é evidente que, quanto maior a resistência, menor a corrente para a mesma tensão aplicada. Em contrapartida, quanto menor a resistência, maior a corrente para a mesma tensão aplicada.

2.11 Potência e energia elétrica

2.11.1 Potência elétrica

Começemos este item por um exemplo bem simples. Suponhamos que o tanque de gasolina de um automóvel “Gol 1.0” tenha a capacidade de armazenar 50 litros de gasolina, e o tanque de gasolina de um automóvel “Corolla 2.0” também tenha a capacidade de armazenar 50 litros de gasolina. Como o motor do automóvel “Gol 1.0” é bem menos possante que o motor do automóvel “Corolla 2.0”, então, para um mesmo intervalo de tempo, o motor do “Gol” consumirá menos gasolina que o motor do “Corolla”. Isto quer dizer o seguinte: a mesma quantidade de energia é cedida aos dois automóveis, ou seja, 50 litros de gasolina; entretanto, o “Corolla” gasta mais energia (gasolina, neste caso) que o “Gol”, em um mesmo intervalo de tempo. A razão pela qual o “Corolla” e o “Gol” absorvem energia (a gasolina) é a potência absorvida.

De maneira geral, a *razão* pela qual alguma coisa absorve ou gera energia é a potência absorvida ou desenvolvida. Uma fonte de energia gera ou desenvolve potência, e uma carga a absorve. A potência absorvida por um componente

elétrico é o produto da tensão à qual o componente está submetido pela corrente que flui através dele, de acordo com a equação (2.9) abaixo:

$$P = V \cdot I \quad (2.9)$$

A unidade no SI da potência elétrica absorvida por uma carga é o watt, que tem símbolo de unidade W, em homenagem ao físico escocês James Watt (1736-1819), a quem se deve a invenção da máquina a vapor e cujo nome serve para indicar a potência elétrica aludida acima. Substituindo-se a equação (2.7) na equação (2.9), ocorre:

$$P = V^2 / R \quad (2.10)$$

Substituindo-se a equação (2.8) na equação (2.9), tem-se:

$$P = I^2 \cdot R \quad (2.11)$$

Portanto, a potência elétrica consumida por um resistor pode ser expressa por:

$$P = V \cdot I \text{ ou } P = V^2 / R \text{ ou } P = I^2 \cdot R \quad (2.12)$$

Comparando-se as equações (2.7) e (2.8) com o conjunto de equações (2.12), é importante que se observe a potência nominal (ou suportável) do resistor que se está utilizando, para que ele não seja submetido a uma diferença de potencial que imponha, através dele, uma corrente elétrica maior do que a suportável. Como exemplo, suponhamos um resistor de $100 \Omega - 5 \text{ W}$ (potência nominal \rightarrow máxima potência suportável). Portanto, pela equação (2.10), este resistor deve ser submetido a uma diferença de potencial máxima de 22,36 V, o que equivale dizer que pode ser atravessado por uma corrente máxima de 0,2236 A pela equação (2.11). De fato, pela equação (2.9), a potência nominal do resistor é dada por: $22,36 \text{ V} \times 0,2236 \text{ A} = 4,999696 \text{ W} \approx 5 \text{ W}$! Antes de prosseguir, estude os exercícios resolvidos 9, 10, 11, 12 e 13.

2.12 Energia elétrica

A energia elétrica usada ou gerada é o produto da potência elétrica absorvida ou desenvolvida pelo tempo sobre o qual esta absorção ou desenvolvimento ocorre, como mostra a equação (2.13):

$$W = P \cdot t \quad (2.13)$$

A energia elétrica é o que os consumidores compram das concessionárias de energia elétrica (p. ex., REDECELPA no Pará, ELETROPAULO em São Paulo e outras). Estas companhias não utilizam o joule, que é a unidade de energia no SI. Em vez do *joule*, utilizam o *quilowatt-hora* (kWh), muito maior e mais conveniente, mesmo não sendo uma unidade do SI. O número de quilowatt-horas consumido é igual ao produto da potência absorvida em quilowatts pelo tempo em horas sobre o qual é absorvido, como mostra a equação (2.14):

$$W (\text{quilowatt-horas}) = P (\text{quilowatts}) \cdot t (\text{horas}) \quad (2.14)$$



EXERCÍCIO RESOLVIDO

01. Achar a carga em coulombs de (a) $5,31 \times 10^{20}$ elétrons, e (b) $2,9 \times 10^{22}$ prótons:

Solução:

a)

$$1 \text{ elétron} \text{ ----- } 1,602 \times 10^{-19} \text{ C}$$

$$5,31 \times 10^{20} \text{ elétrons} \text{ ----- } \text{carga em C}$$

$$\therefore \text{carga} = (5,31 \times 10^{20} \text{ elétrons} \times 1,602 \times 10^{-19} \text{ C}) / 1 \text{ elétron} = 85,1 \text{ C}$$

b)

$$1 \text{ próton} \text{ ----- } 1,602 \times 10^{-19} \text{ C}$$

$$2,9 \times 10^{22} \text{ prótons} \text{ ----- } \text{carga em C}$$

$$\therefore \text{carga} = (2,9 \times 10^{22} \text{ prótons} \times 1,602 \times 10^{-19} \text{ C}) / 1 \text{ próton} = 4,65 \text{ kC ou } 4,65 \times 10^3 \text{ C}$$

02. Quantos elétrons tem uma carga combinada de 1 C?

Solução:

$$1 \text{ elétron} \text{ ----- } 1,602 \times 10^{-19} \text{ C}$$

$$\text{no de elétrons} \text{ ----- } 1 \text{ C}$$

$$\therefore \text{ no de elétrons} = (1 \text{ elétron} \times 1 \text{ C}) / 1,602 \times 10^{-19} \text{ C} = 6,24219 \times 10^{18} \text{ elétrons}$$

03. Quantos prótons tem uma carga combinada de 6,8 pC (= $6,8 \times 10^{-12}$ C)?

Solução:

$$1 \text{ próton} \text{ ----- } 1,602 \times 10^{-19} \text{ C}$$

$$\text{no de prótons} \text{ ----- } 6,8 \times 10^{-12} \text{ C}$$

$$\therefore \text{ no de prótons} = (6,8 \times 10^{-12} \text{ C} \times 1 \text{ próton}) / 1,602 \times 10^{-19} \text{ C} = 4,24 \times 10^7 \text{ prótons}$$

ou (do resultado do exercício 6.2)

$$6,24 \times 10^{18} \text{ prótons} \text{ ----- } 1 \text{ C}$$

$$\text{no de prótons} \text{ ----- } 6,8 \times 10^{-12} \text{ C}$$

$$\therefore \text{ no de prótons} = (6,8 \times 10^{-12} \text{ C} \times 6,24 \times 10^{18} \text{ prótons}) / 1 \text{ C} = 4,24 \times 10^7 \text{ prótons}$$

04. Achar o fluxo de corrente que passa por uma lâmpada em um movimento constante de

(a) 60 C em 4 segundos, (b) 15 C em 2 minutos e (c) 10^{22} elétrons em uma hora:

Solução:

a) $I = Q / t \rightarrow 60 \text{ C} / 4 \text{ s} = 15 \text{ C/s}$ ou 15 A

b) $I = Q / t \rightarrow 15 \text{ C} / (2 \times 60 \text{ s}) = 15 \text{ C} / 120 \text{ s} = 0,125 \text{ C/s}$ ou 0,125 A ou 125×10^{-3} A ou 125 mA

c) $I = Q / t \rightarrow [(10^{22} \text{ elétrons}) \times (-1,602 \times 10^{-19} \text{ C})] / 3.600 \text{ s} = 4,45 \times 10^{-1} \text{ C/s}$ ou 0,445 C/s ou 0,445 A ou 445×10^{-3} A ou 445 mA

05. Elétrons passam através de seção transversal de um fio numa velocidade de $6,4 \times 10^{21}$ elétrons por minuto. Qual a corrente no fio?

Solução:

$$I = Q / t \rightarrow [(6,4 \times 10^{21} \text{ elétrons}) \times (1,602 \times 10^{-19} \text{ C})] / 60 \text{ s} = 0,1708 \times 10^2 \text{ C/s}$$
 ou 17,1 C/s ou 17,1 A

06. Num líquido, os íons negativos, cada um com um excesso de um único elétron, deslocam-se para a esquerda numa razão constante de $2,1 \times 10^{20}$ íons por minuto, e os íons positivos, cada um com um excesso de dois prótons, deslocam-se para a direita numa velocidade constante de $4,8 \times 10^{19}$ íons por minuto, como mostra a figura 2.11. Encontre a corrente total dos íons.

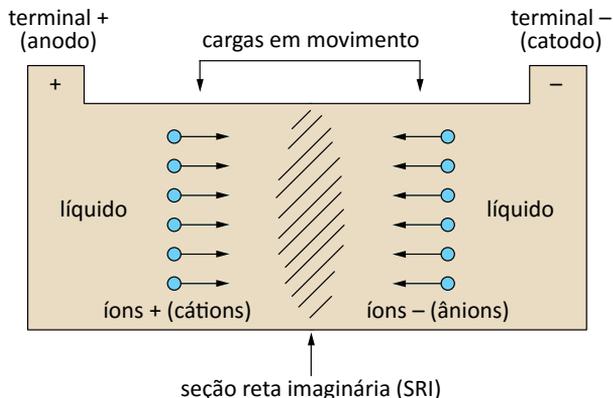


Figura 2.11 – Íons em movimento (carga) através de um líquido.

Solução:

▪ corrente elétrica devida ao movimento dos ânions:

$$I = Q / t \rightarrow [(2,1 \times 10^{20} \text{ elétrons}) \times (1,602 \times 10^{-19} \text{ C})] / 60 \text{ s} = 0,05607 \times 10^1 \text{ C/s ou } 0,5607 \text{ C/s ou } 0,5607 \text{ A}$$

▪ corrente elétrica devida ao movimento dos cátions:

$$I = Q / t \rightarrow [(2 \times 4,8 \times 10^{19} \text{ prótons}) \times (1,602 \times 10^{-19} \text{ C})] / 60 \text{ s} = 0,25632 \text{ C/s ou } 0,25632 \text{ A}$$

▪ corrente elétrica total devida ao movimento dos cátions e dos ânions:

Somam-se os efeitos das duas correntes, por se tratarem de correntes elétricas de polaridades diferentes. O sentido de deslocamento da corrente total pode ser para a direita ou para a esquerda. Este assunto ainda será discutido com mais detalhes. Portanto, $I_T = 0,81702 \text{ A}$.

07. Um fusível de 10 A se queimará quando passar por ele uma razão constante de fluxo de carga de 45.000 C/h?

Solução:

A corrente é $I = Q / t \rightarrow 45.000 \text{ C} / 36.00 \text{ s} = 12,5 \text{ C/s ou } 12,5 \text{ A}$, que é maior que o regime nominal de 10 A. Portanto, o fusível queimará!

08. Admitindo-se que uma corrente constante passe por um interruptor, achar o tempo exigido para (a) 20 C passarem, se a corrente for de 15 mA, (b) 12 μC passarem, se a corrente for de 30 μA , e (c) $2,58 \times 10^{15}$ elétrons passarem, se a corrente for 64,2 nA.

Solução:

Visto que $I = Q / t$, então $t = Q / I$. Logo:

- a) $t = Q / I \rightarrow t = 20 \text{ C} / (15 \times 10^{-3} \text{ A}) = 1,33 \times 10^3 \text{ s}$ ou 22,166 min ou 22,2 min
b) $t = Q / I \rightarrow 12 \times 10^{-6} \text{ C} / (30 \times 10^{-12} \text{ A}) = 4 \times 10^5 \text{ s}$ ou 6666,67 min ou 111,11 h
c) $t = Q / I \rightarrow (2,58 \times 10^{15} \text{ elétrons} \times 1,602 \times 10^{-19} \text{ C}) / (64,2 \times 10^{-9} \text{ A}) = 6437,94 \text{ s}$ ou $6,43794 \times 10^3 \text{ s}$ ou $6,44 \times 10^3 \text{ s}$ ou 107,33 min ou 1,7888 h

09. Qual é a resistência de um fio de soldar que solicita 0,8333 A em 120 V?

Solução:

Pela equação (1.8), ocorre: $R = V / I \rightarrow R = 120 / 0,8333 \rightarrow R = 144 \Omega$

10. Uma torradeira com 8,27 Ω de resistência solicita 13,9 A. Achar a tensão aplicada.

Solução:

Pela equação (1.8), ocorre: $V = R \cdot I \rightarrow V = 13,9 \times 8,27 \rightarrow V = 114,953 \text{ V} \rightarrow V \approx 115 \text{ V}$

11. Achar a resistência de um aquecedor elétrico que absorve 2400 W quando ligado a uma linha de 120 V.

Solução:

Pela equação (1.10), ocorre: $P = V^2 / R \rightarrow R = V^2 / P \rightarrow R = 120^2 / 2400 \rightarrow R = 6 \Omega$

12. Achar a resistência interna de um aquecedor de água de 2 kW que solicita 8,33 A.

Solução:

Pela equação (1.11), ocorre: $P = I^2 \times R \rightarrow R = P / I^2 \rightarrow R = 2000 / 8,33^2 \rightarrow R = 28,8 \Omega$

13. Qual é a maior tensão que pode ser aplicada sobre um resistor de (1/8) W e 2,7 $\text{M}\Omega$ sem provocar seu superaquecimento?

Solução:

Pela equação (1.10), ocorre: $P = V^2 / R \rightarrow V = (R \times P)^{1/2} \rightarrow V = [(2,7 \times 10^6) \cdot (1/8)]^{1/2} \rightarrow V \approx 581 \text{ V}$



ATIVIDADES

01. Achar a carga em coulombs de (a) $6,28 \times 10^{21}$ elétrons e (b) $8,76 \times 10^{20}$ prótons.
02. Quantos elétrons tem uma carga combinada de 4 nC?
03. Achar o fluxo da corrente que passa por um interruptor com um movimento constante de (a) 90 C em 6 segundos, (b) 900 C em 20 minutos e (c) 4×10^{23} elétrons em 5 horas.
04. Um capacitor é um componente de circuito elétrico que armazena carga elétrica. Se um capacitor se carrega numa razão constante de 10 mC em 0,02 ms e se descarrega numa razão constante de 10 mC em 1 μ s, quais são as grandezas das correntes de carga e descarga?
05. Num gás, se íons negativos duplamente ionizados se deslocam para a direita numa razão constante de $3,62 \times 10^{20}$ íons por minuto e se íons positivos simplesmente ionizados se deslocam para a esquerda numa razão constante de $5,38 \times 10^{20}$ íons por minuto, achar a corrente total para a direita ou para a esquerda.
06. Achar o menor tempo em que 120 C podem passar por um disjuntor de 20 A sem desarmá-lo.
07. Se uma corrente constante flui por um capacitor, achar o tempo necessário para o capacitor (a) carregar até 2,5 mC se a corrente for de 35 mA, (b) carregar até 36 pC se a corrente for de 18 μ A e (c) armazenar $9,36 \times 10^{17}$ elétrons se a corrente for de 85,6 nA.
08. Qual é a resistência de uma secadora de roupas elétrica de 240 V que solicita 23,3 A?
09. Se um voltímetro tem 500 k Ω de resistência interna, achar o fluxo da corrente que passa por ele quando ele indica 86 V.
10. Se um amperímetro tem 2 m Ω de resistência interna, achar a tensão sobre ele quando ele indica 10 A.
11. Qual é a corrente máxima que um resistor de 56 k Ω e 1 W pode conduzir com segurança?

12. Qual é a tensão máxima que pode ser aplicada com segurança sobre um resistor de $91\ \Omega$ e $(1/2)\ W$?



REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Santos, Alex Ferreira dos, **Apostila texto de circuitos elétricos I**, 2004 a 2015, IESAM, Belém, Pará, Brasil.

3

Circuitos Resistivos de Corrente Contínua em Série



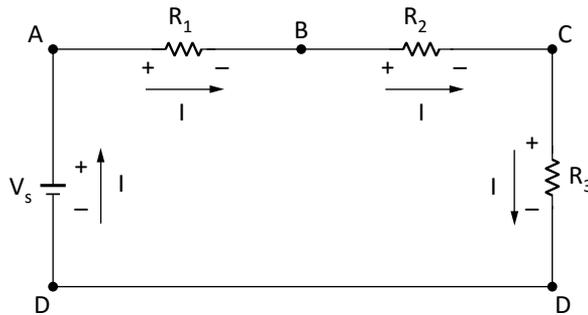
OBJETIVOS

- Estudar os circuitos resistivos de corrente contínua em série, abordando os conceitos de ramos, nodos (nós), circuitos fechados e malhas;
 - Apresentar a Lei da Tensão de Kirchhoff aplicada em soluções de circuitos de corrente contínua em série;
 - Apresentar a técnica da Divisão de Tensão, igualmente utilizada nas soluções de circuitos de corrente contínua em série.
-

3.1 Ramos, nodos (nós), circuitos fechados e malhas

Considere as análises feitas a respeito das figuras 3.1 a e b a seguir:

a)



b)

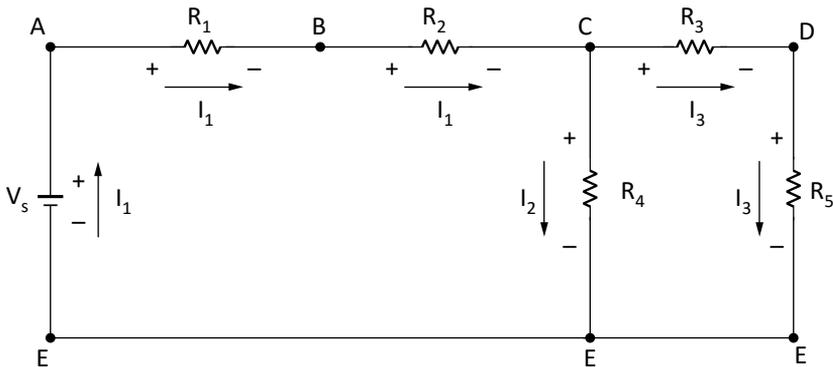


Figura 3.1 – Exemplos de circuitos elétricos.

Um *ramo* de um circuito é um componente isolado, tal como um resistor (R_1 , R_2 , R_3 , R_4 e R_5) ou uma fonte ($V_S \rightarrow$ em que o subscrito 'S' deriva do inglês: 'source' = fonte). Algumas vezes, no entanto, este termo é usado para um grupo de componentes através dos quais passa a mesma corrente elétrica – componentes em série, especialmente quando eles são do mesmo tipo, como é o caso de R_1 , R_2 e R_3 no circuito da figura 3.1a, por onde passa a mesma corrente I (sentido convencional).

Um *nodo* ou *nó elétrico* é um ponto de conexão entre dois ou mais ramos, como os nós **A**, **B**, **C** e **D** no circuito da figura 3.1a, e os nós **A**, **B**, **C**, **D** e **E** no circuito da figura 3.1b. Num diagrama de circuito, um nó é, às vezes, indicado por um ponto que pode ser um ponto de solda no circuito real. O nó também inclui todos os fios ligados ao ponto. Em outras palavras, ele engloba todos os pontos que estão ao mesmo potencial. Se um curto-circuito ligar dois nós, estes dois nós serão equivalentes a apenas um único nó, mesmo se forem mostrados dois, três ou mais pontos, como é o caso do nó **D** no circuito da figura 3.1a e do nó **E** no circuito da figura 3.1b.

Um *circuito fechado* é qualquer trajeto num circuito elétrico que comece e termine no mesmo nó, como é o caso do trajeto **ABCD**A no circuito da figura 3.1a, do trajeto **ABCDE**A no circuito da figura 3.1b, do trajeto **ABCE**A no circuito da figura 3.1b e do trajeto **CDEC** no circuito da figura 3.1b. Uma *malha* é um circuito fechado que não tem ramos em seu interior, como é o caso do trajeto **ABCD**A no circuito da figura 3.1a, do trajeto **ABCE**A no circuito da figura 3.1b e do trajeto **CDEC** no circuito da figura 3.1b; em outras palavras, não existe componente dentro de uma malha. Sendo assim, o trajeto **ABCDE**A no circuito da figura 3.1b não é considerado uma malha, pois possui o ramo constituído pela resistência R_4 em seu interior; este trajeto é simplesmente um circuito fechado. É importante ressaltar que os trajetos podem ser no sentido horário (como é o caso dos trajetos acima citados) ou anti-horário. Este assunto será visto com detalhes mais adiante, em solução de circuitos por análise de correntes de malha.

3.2 Lei da Tensão de *Kirchhoff* e circuitos de corrente contínua em série

Considerando-se um circuito elétrico de corrente contínua, a Lei da Tensão de Kirchhoff – LTK ou KVL (do inglês, *Kirchhoff Voltage Law*) – diz que, ao longo do percurso (ou trajeto) de um circuito fechado, no sentido horário ou anti-horário, “a soma algébrica das elevações de tensão é igual à soma algébrica das quedas de tensão”. É interessante que se entenda e que se memorize a figura 3.2 a seguir:

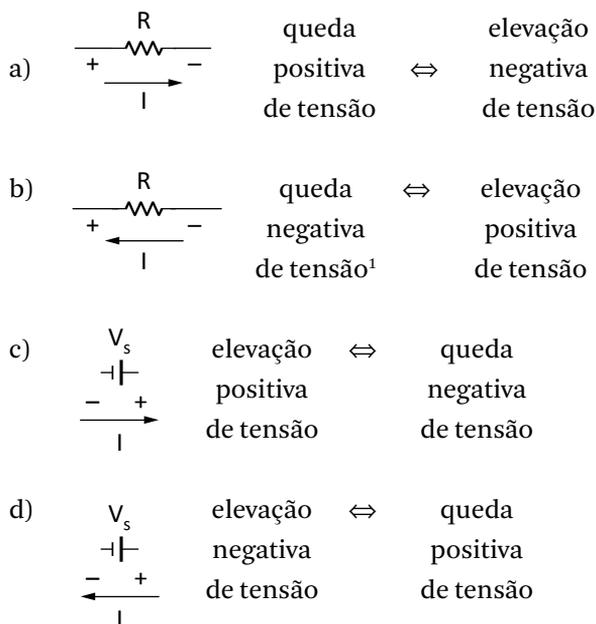


Figura 3.2 – Sentidos associados de tensão e corrente, considerando-se o sentido convencional da corrente.

Na realidade, com relação à figura 3.2, apenas as situações expressas pelas figuras (a), (c) e (d) são possíveis de ocorrer quando se considera a corrente convencional resultante através de um resistor ou de uma bateria; com relação à figura (b), trata-se de uma situação hipotética que ocorre por ocasião da solução de um circuito elétrico pelas equações das correntes de malha, técnica esta que será estudada mais adiante.

De qualquer forma, quando se analisa a diferença de potencial elétrico (d.d.p.) através de dois nós elétricos genéricos X e Y, faz-se esta análise através da seguinte equação: $V_{XY} = V_X - V_Y$. Se $V_{XY} > 0$, então tem-se uma queda positiva de tensão ou elevação negativa de tensão de X para Y; se $V_{XY} < 0$, então tem-se uma queda negativa de tensão ou elevação positiva de tensão de X para Y. Se $V_{XY} = 0$, então não há diferença de potencial elétrico entre os nós elétricos X e Y; as situações que podem gerar esse fato serão apresentadas ao longo do curso. Observe que $V_{XY} = -V_{YX}$.

¹ Caso especial utilizado em solução de circuitos por análise de correntes de malha.

Portanto, com base nas figuras 3.1a, 3.2a e 3.2.c, observe a análise a seguir:

Na aplicação da LTK, uma corrente de circuito fechado é referenciada no sentido horário (mas também poderia ser no sentido anti-horário), como está mostrado no circuito em série da figura 3.1a, redesenhado abaixo:

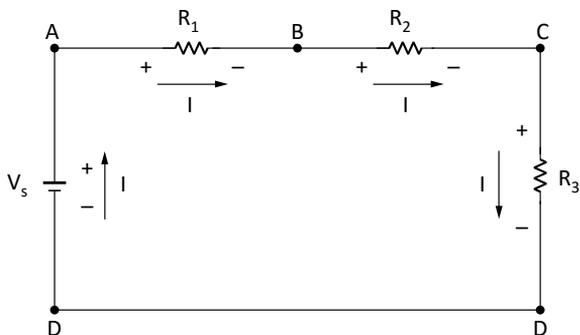


Figura 3.1a – Circuito com resistores em série.

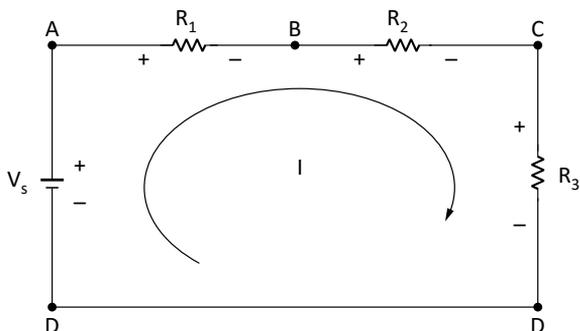


Figura 3.1a' – Forma equivalente da figura 3.1a.

A LTK é aplicada na direção da corrente I . O circuito da figura 3.1a, ou 3.1a', é um circuito em série porque a mesma corrente I passa por todos os componentes. Aliás, ***o que garante que dois ou mais resistores estão em série é o fato de todos estarem ligados em sequência e por todos eles passar a mesma corrente elétrica***. A soma das quedas de tensão sobre os resistores R_1 , R_2 e R_3 , respectivamente, V_{AB} , V_{BC} e V_{CD} somada com a elevação de tensão através de V_s , dada por V_{DA} , é igual a 0,0 (zero), como mostra a equação (3.1):

$$V_{DA} + V_{AB} + V_{BC} + V_{CD} = 0 \quad (3.1)$$

Manipulando-se a equação (3.1) como segue, tem-se:

$$V_{DA} = -(V_{AB} + V_{BC} + V_{CD})$$

$$-V_{AD} = -(V_{AB} + V_{BC} + V_{CD})$$

$$V_{AD} = (V_{AB} + V_{BC} + V_{CD}), \text{ em que } V_{AD} \text{ é a queda de tensão através da fonte } V_s \text{ (3.2)}$$

A equação (3.2) pode ser interpretada assim: “A queda total de tensão através da fonte V_s é igual à somatória das quedas de tensão através dos resistores R_1 , R_2 e R_3 ”.

Aplicando-se a Lei de Ohm às quedas de tensão V_{AB} , V_{BC} e V_{CD} na equação (3.2), vem:

$$V_{AB} = R_1 \cdot I \quad (3.3)$$

$$V_{BC} = R_2 \cdot I \quad (3.4)$$

$$V_{CD} = R_3 \cdot I \quad (3.5)$$

Substituindo-se as equações (2.3), (2.4) e (2.5) na equação (2.2), ocorre:

$$V_{AD} = (R_1 \cdot I) + (R_2 \cdot I) + (R_3 \cdot I) \Rightarrow V_{AD} = I \cdot (R_1 + R_2 + R_3) \quad (3.6)$$

A equação (3.6) representa o circuito da figura (3.1a).

Considerando-se que a equação (3.6) representa um circuito de uma malha, conclui-se que a parte resistiva total desse circuito é composta pela soma de todas as resistências presentes nele. Neste caso, tem-se:

$$R_T \text{ ou } R_{EQ} = R_1 + R_2 + R_3 \quad (3.7)$$

Generalizando-se a equação (3.7) para uma associação série de N resistores, vem:

$$R_T \text{ ou } R_{EQ} = R_1 + R_2 + R_3 + \dots + R_N \quad (3.8)$$

O termo R_T é a resistência total dos resistores ligados em série. Outro termo usado é resistência equivalente, com o símbolo R_{EQ} .

Caso $R_1 = R_2 = R_3 = \dots = R_N = R$, a equação (3.8) pode ser reescrita como:

$$R_T = N \cdot R \quad (3.9)$$

Antes de prosseguir, estude o exercício resolvido do exemplo 3.1 a seguir:



EXEMPLO 3.1

Considere o circuito da figura 3.1a, redesenhada abaixo por conveniência, e encontre: (a) a corrente total I do circuito; (b) as quedas de tensão V_{AB} , V_{BC} e V_{CD} ; (c) a queda de tensão V_{AD} , através da fonte V_S , como soma das quedas de tensão V_{AB} , V_{BC} e V_{CD} , verificando, assim, a 1ª Lei de Kirchhoff, ou Lei da Tensão de Kirchhoff – LTK; (d) as potências elétricas dissipadas nos resistores R_1 , R_2 e R_3 .

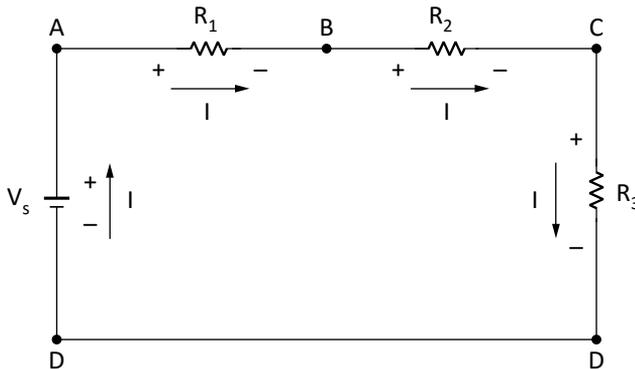


Figura 3.1a – Circuito com resistores em série.

Dados do circuito:

$$V_S = V_{AD} = 100 \text{ V}$$

$$R_1 = 10 \, \Omega, R_2 = 20 \, \Omega \text{ e } R_3 = 30 \, \Omega$$

Solução:

a) Pela Lei de Ohm, ocorre: $I = V_{AD} / R_T$, em que $R_T = R_1 + R_2 + R_3$. Então, substituindo-se os dados do circuito na equação de I , tem-se: $I = 100 / (10 + 20 + 30) \Rightarrow I = 100 / 60 \Rightarrow I = 1,666 \text{ A}$.

Comentário – Nunca se esqueça do seguinte: o valor numérico da resistência equivalente de uma associação série de N resistores é sempre maior que o valor numérico da resistência de maior valor da associação!

b) Pela Lei de Ohm, novamente, vem: $V_{AB} = I \cdot R_1$, $V_{BC} = I \cdot R_2$ e $V_{CD} = I \cdot R_3$. Sabendo-se, pelo item (a) que $I = 1,666 \text{ A}$, e pelos dados dos circuitos, tem-se: $V_{AB} = 1,666 \cdot 10 \Rightarrow V_{AB} = 16,66 \text{ V}$; $V_{BC} = 1,666 \cdot 20 \Rightarrow V_{BC} = 33,32 \text{ V}$ e; $V_{CD} = 1,666 \cdot 30 \Rightarrow V_{CD} = 49,98 \text{ V}$.

c) Pela LTK, tem-se: $V_{AD} = V_{AB} + V_{BC} + V_{CD}$. Pelos resultados obtidos no item (b) acima, ocorre: $V_{AD} = 16,66 + 33,32 + 49,98 \Rightarrow V = 99,96 \approx 100 \text{ V}$, verificando-se, assim, a LTK!

d) Pelas equações da potência elétrica, $P = V \cdot I$ ou $P = V_2 / R$ ou $P = I_2 \cdot R$, vem:

Cálculo da potência dissipada no resistor R_1 , de três formas, levando-se ao mesmo resultado:

$$P = V \cdot I \Rightarrow P_{R_1} = V_{AB} \cdot I \Rightarrow P_{R_1} = 16,66 \cdot 1,666 \Rightarrow P_{R_1} = 27,75556 \text{ W.}$$

$$P = V_2 / R \Rightarrow P_{R_1} = (V_{AB})^2 / R_1 \Rightarrow P_{R_1} = 277,5556 / 10 \Rightarrow P_{R_1} = 27,75556 \text{ W.}$$

$$P = I^2 \cdot R \Rightarrow P_{R_1} = I^2 \cdot R_1 \Rightarrow P_{R_1} = 2,775556 \cdot 10 \Rightarrow P_{R_1} = 27,75556 \text{ W.}$$

Cálculo da potência dissipada no resistor R_2 , de três formas, levando-se ao mesmo resultado:

$$P = V \cdot I \Rightarrow P_{R_2} = V_{BC} \cdot I \Rightarrow P_{R_2} = 33,32 \cdot 1,666 \Rightarrow P_{R_2} = 55,51112 \text{ W.}$$

$$P = V_2 / R \Rightarrow P_{R_2} = (V_{BC})^2 / R_2 \Rightarrow P_{R_2} = 1110,2224 / 20 \Rightarrow P_{R_2} = 55,51112 \text{ W.}$$

$$P = I^2 \cdot R \Rightarrow P_{R_2} = I^2 \cdot R_2 \Rightarrow P_{R_2} = 2,775556 \cdot 20 \Rightarrow P_{R_2} = 55,51112 \text{ W.}$$

Cálculo da potência dissipada no resistor R_3 , de três formas, levando-se ao mesmo resultado:

$$P = V \cdot I \Rightarrow P_{R_3} = V_{CD} \cdot I \Rightarrow P_{R_3} = 49,98 \cdot 1,666 \Rightarrow P_{R_3} = 83,26668 \text{ W.}$$

$$P = V_2 / R \Rightarrow P_{R_3} = (V_{CD})^2 / R_3 \Rightarrow P_{R_3} = 2498,00004 / 30 \Rightarrow P_{R_3} = 83,26668 \text{ W.}$$

$$P = I^2 \cdot R \Rightarrow P_{R_3} = I^2 \cdot R_3 \Rightarrow P_{R_3} = 2,775556 \cdot 30 \Rightarrow P_{R_3} = 83,26668 \text{ W.}$$

3.3 Divisão de tensão

A *regra da divisão de tensão* ou *divisor de tensão* se aplica aos resistores em série. Ela fornece a tensão sobre qualquer resistor que faça parte da associação em série de resistores sem que se precise achar a corrente através do resistor em questão. Considerando-se o circuito da figura 3.1a, seja $V_{AB} = V_1$ a tensão através do resistor R_1 , $V_{BC} = V_2$ a tensão através do resistor R_2 e $V_{CD} = V_3$ a tensão através do resistor R_3 . Para se encontrar, por exemplo, a tensão V_1 , procede-se da seguinte forma:

Da equação (3.3), tem-se:

$$I = V_{AB} / R_1 = V_1 / R_1 \quad (3.10)$$

Da equação (3.6), vem:

$$I = V_{AD} / (R_1 + R_2 + R_3) \quad (3.11)$$

Igualando-se as equações (3.10) e (3.11), ocorre:

$$V_1 = [R_1 / (R_1 + R_2 + R_3)] \cdot V_{AD} \quad (3.12)$$

De forma semelhante, pode-se obter as tensões $V_2 (=V_{BC})$ e $V_3 (=V_{CD})$. Generalizando-se a equação (3.12), tem-se:

$$V_{XY} = (R_{XY} / R_{EQ}) \cdot V_S \quad (3.13)$$

A equação (3.13) é a **fórmula para a regra da divisão de tensão** ou **divisor de tensão** e é válida para 01 (uma) malha, em que:

V_{XY} → Tensão entre os nós elétricos genéricos X e Y.

R_{XY} → Resistência equivalente ligada entre os nós elétricos genéricos X e Y, por onde circula a corrente que entra no nó X e sai no nó Y.

V_S → Tensão positiva que, diretamente, alimenta a malha que contém V_{XY} e R_{XY} . A tensão V_S , também aplicada entre 02 (dois) nós elétricos genéricos Z e W ($V_S = V_{ZW}$), não precisa ser aquela de uma fonte; ela pode ser apenas a tensão total sobre a associação de resistores em série.

R_{EQ} → Resistência equivalente da malha alimentada por $V_S (=V_{ZW})$.

Antes de resolver os exercícios propostos, estude os exercícios resolvidos dos exemplos 3.2 e 3.3 a seguir:



EXEMPLO 3.2

Encontre as quedas de tensão V_{AB} , V_{BC} e V_{CD} referentes ao circuito da figura 3.1 a, calculadas no item (b) do exemplo 3.1 pela Lei de Ohm, usando, agora, os conceitos do item 3.3.

Solução:

Aplicando-se a equação (3.13) para se calcular a tensão V_{AB} através do resistor $R_1 = 10\Omega$ ligado entre os nós A e B, tem-se: $V_{AB} = (R_1 / R_T) \cdot V_{AD} \Rightarrow V_{AB} = [10 / (10 + 20 + 30)] \cdot 100 \Rightarrow V_{AB} = 16,66 \text{ V}$, resultado que confere com o calculado no item (b) do exemplo 3.1.

Aplicando-se a equação (3.13) para se calcular a tensão V_{BC} através do resistor $R_2 = 20\Omega$ ligado entre os nós B e C, tem-se: $V_{BC} = (R_2 / R_T) \cdot V_{AD} \Rightarrow V_{BC} = [20 / (10 + 20 + 30)] \cdot 100 \Rightarrow V_{BC} = 33,33 \text{ V}$, resultado que confere com o calculado no item (b) do exemplo 3.1.

Aplicando-se a equação (3.13) para se calcular a tensão V_{CD} através do resistor $R_3 = 30\Omega$ ligado entre os nós C e D, tem-se: $V_{CD} = (R_3 / R_T) \cdot V_{AD} \Rightarrow V_{CD} = [30 / (10 + 20 + 30)] \cdot 100 \Rightarrow V_{CD} = 50 \text{ V}$, resultado que confere com o calculado no item (b) do exemplo 3.1.

Comparações entre os dois métodos de solução, a saber, o usado no exemplo 3.1 e o usado no exemplo 3.2:

(1) possíveis diferenças numéricas entre os resultados encontrados nos dois métodos, geralmente em aproximações de casas decimais, são perfeitamente normais, desde que o valor seja praticamente o mesmo;

(2) o método de solução do exemplo 3.2 é mais prático, uma vez que ele fornece a tensão sobre o resistor sem que haja a necessidade de se calcular a corrente através dele.

★ EXEMPLO 3.3

Achar a tensão V_{AB} sobre o circuito aberto mostrado na figura 3.1:

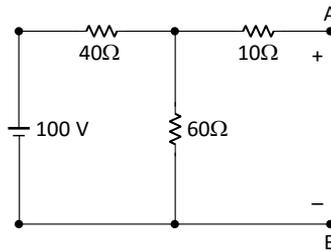


Figura 3.3 – Aplicação do divisor de tensão.

Solução 1: (método de solução do exemplo 3.2)

A tensão (ou queda de tensão) através do resistor de 10 W é igual a zero, já que nenhuma corrente elétrica passa por ele, em função de estar em série com um *circuito aberto*¹. Devido a esta tensão zero, a tensão V_{AB} é igual à queda de tensão sobre o resistor de 60 W, desconsiderando-se, completamente, o resistor de 10 W, como mostra a figura 3.4b abaixo:

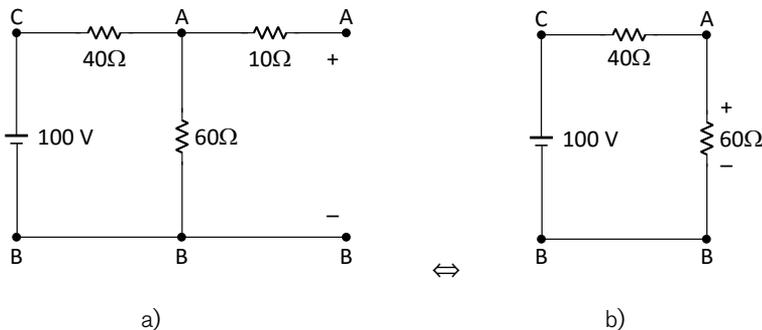


Figura 3.4 – Outra forma de se mostrar a figura 3.1, identificando-se todos os nós do circuito..

¹ Pela Lei de Ohm ($V = R \cdot I$) só há tensão (ou queda de tensão) através de um resistor se há corrente elétrica passando através dele.

Aplicando-se a equação (3.13) para se calcular a tensão V_{AB} através do resistor $R_{AB} = 60\Omega$ ligado entre os nós A e B, tem-se: $V_{AB} = (R_{AB} / R_T) \cdot V_{CB} \Rightarrow V_{AB} = [60 / (40 + 60)] \cdot 100 \Rightarrow V_{AB} = 60 \text{ V}$

Solução 2: (método de solução do exemplo 3.1)

Permanece o mesmo comentário sobre o resistor de 10Ω da solução 1 acima.

Fazendo-se $N = 2$ na equação (3.8), ocorre: $R_T = R_1 + R_2 \Rightarrow R_T = 40 + 60 \Rightarrow R_T = 100 \Omega$.

Aplicando-se a Lei de Ohm nos terminais **CB**, tem-se: $V_{CB} = I \cdot R_T \Rightarrow I = V_{CB} / R_T \Rightarrow I = 100 / 100 \Rightarrow I = 1 \text{ A}$.

Aplicando-se a Lei de Ohm nos terminais **AB**, tem-se: $V_{AB} = I \cdot R_{AB} \Rightarrow V_{AB} = 1 \cdot 60 \Rightarrow V_{AB} = 60 \text{ V}$.

Resultado que confere com aquele encontrado na solução 1 acima, a qual é mais prática, uma vez que ela fornece a tensão sobre o resistor sem que haja a necessidade de se calcular a corrente através dele.



ATIVIDADES

01. Repita o exemplo 3.1, desta vez fazendo: $V_s = V_{AD} = 18 \text{ V}$, $R_1 = 220 \Omega$, $R_2 = 330 \Omega$ e $R_3 = 470 \Omega$. Use dois métodos de solução: a solução do exemplo 3.1 e a solução do exemplo 3.2.

02. Explique, de forma clara, o que garante que dois ou mais resistores estão em série. Faça, também, um desenho explicativo.



REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Santos, Alex Ferreira dos, **Apostila texto de circuitos elétricos I**, 2004 a 2015, IESAM, Belém, Pará, Brasil.

4

Circuitos Resistivos de Corrente Contínua em Paralelo



OBJETIVOS

- Estudar os circuitos resistivos de corrente contínua em paralelo;
 - Apresentar a Lei da Corrente de Kirchhoff aplicada em soluções de circuitos de corrente contínua em paralelo;
 - Apresentar a técnica da Divisão de Corrente, também usada nas soluções de circuitos de corrente contínua em paralelo.
-

4.1 Lei da Corrente de Kirchhoff e circuitos de corrente contínua em paralelo

Considerando-se um circuito elétrico de corrente contínua, a Lei da Corrente de Kirchhoff – LCK – diz que “a soma algébrica das correntes que entram numa superfície fechada é igual à soma algébrica daquelas que saem”. Em quase todas as aplicações de circuitos, as superfícies fechadas de interesse são aquelas que envolvem os nós elétricos, tais como os nós **A** e **B** do circuito elétrico mostrado na figura 4.1 abaixo.

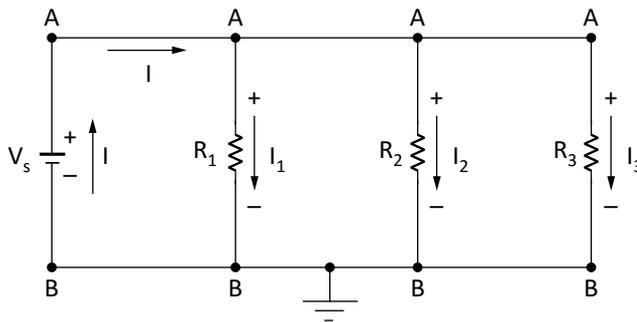


Figura 4.1 – Circuito com resistores em paralelo.

Na aplicação da LCK, um nó é selecionado como *nó-terra* ou *nó de referência*, que é geralmente indicado pelo símbolo de terra a seguir: \perp ou /// . Geralmente, o nó na base do circuito é o *nó-terra*, como mostrado no circuito em paralelo da figura 4.1. Este é um circuito em paralelo porque a mesma tensão V_s está sobre todos os componentes do circuito, ou seja, fonte de tensão e resistores. Aliás, **o que garante que dois ou mais resistores estão em paralelo é o fato de todos estarem ligados no mesmo par de nós elétricos**. As tensões sobre os outros nós são quase sempre consideradas positivas em relação ao *nó-terra*. No nó não ligado à terra (nó **A**), no circuito mostrado na figura 4.1, a soma das correntes que saem do nó **A** e que entram nos resistores R_1 , R_2 e R_3 , respectivamente, I_1 , I_2 e I_3 , é igual à corrente total I que entra no nó **A**, como descreve a equação (4.1) abaixo:

$$I = I_1 + I_2 + I_3 \quad (\text{LCK ou KCL}) \quad (4.1)$$

ou

$$I - I_1 - I_2 - I_3 = 0 \text{ (LCK ou KCL)} \quad (4.2)$$

A equação (4.2) considera que a corrente I , que entra no nó A , é positiva e que as correntes I_1 , I_2 e I_3 , que saem do nó A , são negativas. Geralmente, em Engenharia Elétrica, é este o procedimento adotado; ou seja, as correntes que entram em um nó elétrico são consideradas positivas, pois levam energia a este ponto, ao passo que as correntes que saem de um nó elétrico são consideradas negativas, pois tiram energia deste ponto. No entanto, se o procedimento adotado fosse o oposto do citado acima, não haveria problema algum no que se refere ao balanço geral de energia, ou à LCK.

Aplicando-se a Lei de Ohm às correntes I_1 , I_2 e I_3 da equação (4.1), tem-se:

$$I_1 = V_s / R_1 \quad (4.3)$$

$$I_2 = V_1 / R_2 \quad (4.4)$$

$$I_3 = V_1 / R_3 \quad (4.5)$$

Substituindo-se as equações (4.3), (4.4) e (4.5) na equação (4.1), ocorre:

$$I = (V_s / R_1) + (V_s / R_2) + (V_s / R_3) \Rightarrow I = V_s \cdot (1/R_1 + 1/R_2 + 1/R_3) \quad (4.6)$$

A equação (4.6) representa o circuito da figura (4.1). Já a equação (4.7) a seguir representa o circuito da figura (4.1) em termos de sua resistência equivalente R_{EQ} ou R_T :

$$I = V_s / R_T \text{ ou } I = V_s \cdot (1 / R_T) \quad (4.7)$$

Comparando-se a equação (4.7) com a equação (4.6), tem-se:

$$1/R_T = 1/R_1 + 1/R_2 + 1/R_3 \quad (4.8)$$

Nota-se, pela equação (4.8), que o inverso da resistência equivalente dos resistores ligados em paralelo é igual à soma dos inversos das resistências de cada resistor. Generalizando-se a equação (4.8) para uma associação paralela de N resistores, vem:

$$1/R_T = 1/R_1 + 1/R_2 + 1/R_3 + \dots + 1/R_N \quad (4.9)$$

Comparando-se a equação (4.9) com a equação (3.7) do capítulo 3, abaixo reescrita,

$$R_T = R_1 + R_2 + R_3 + \dots + R_N \quad (3.7)$$

Observa-se, através de uma rápida inspeção, que é muito mais fácil encontrar a resistência total (R_T) proveniente de uma associação série de resistores do que aquela proveniente de uma associação paralela de resistores. Para que se tenha uma noção dessa comparação, considere-se $N = 2$ nas equações (4.9) e (3.7) e observe-se a solução de ambas.

Da equação (3.7), tem-se:

$$R_T = R_1 + R_2 \quad (4.10)$$

Da equação (4.9), tem-se:

$$1/R_T = 1/R_1 + 1/R_2 \Rightarrow 1/R_T = (R_1 + R_2) / (R_1 \cdot R_2) \Rightarrow R_T = (R_1 \cdot R_2) / (R_1 + R_2) \quad (4.11)$$

Considere-se, agora, $N = 3$ nas equações (4.9) e (3.7) e observe-se a solução de ambas.

Da equação (3.7), vem:

$$R_T = R_1 + R_2 + R_3 \quad (4.12)$$

Da equação (4.9), vem:

$$1/R_T = 1/R_1 + 1/R_2 + 1/R_3 \Rightarrow 1/R_T = \{[(R_2 \cdot R_3) + (R_1 \cdot R_3) + (R_1 \cdot R_2)] / (R_1 \cdot R_2 \cdot R_3)\} \\ \Rightarrow R_T = (R_1 \cdot R_2 \cdot R_3) / [(R_2 \cdot R_3) + (R_1 \cdot R_3) + (R_1 \cdot R_2)] \quad (4.13)$$

Observa-se que, para $N = 2$, as soluções de ambas as equações [(4.10) → resistores em série] e [(4.11) → resistores em paralelo] são fáceis e imediatas. Ainda para $N = 3$, a solução da equação (4.12) – resistores em série – continua fácil e imediata, ao passo que a solução da equação (4.13) – resistores em paralelo

- torna-se um pouco mais difícil e demorada, complicando-se ainda mais para $N > 3$.

A fim de se facilitar o cálculo de R_T em uma associação paralela de resistores para $N \geq 3$ na equação (4.9), utiliza-se, agora, o conceito de “condutância” do resistor, que, matematicamente, é dada pelo inverso da “resistência” do resistor, como mostra a equação (4.14) abaixo:

$$G = 1/R \Leftrightarrow R = 1/G, \text{ em que } G \rightarrow \text{símbolo da condutância e } R \rightarrow \text{símbolo da resistência} \quad (1.14)$$

Em setembro de 1885, o matemático e físico inglês Oliver Heaviside (Londres 1850 – Torquay 1925) criou o termo **condutância elétrica**, que é o inverso da **resistência elétrica**. A unidade da condutância derivada do Sistema Internacional de Unidades (SI) é o *siemens*, com o símbolo S, assim chamada em homenagem ao cientista e industrial Werner von Siemens (Lenthe, perto de Han, 1816 – Berlim 1892). A unidade *siemens* (S) substituiu a popular unidade mho (inverso de *ohm*), com o símbolo Ω^{-1} (ômega invertido), visto que a condutância é o inverso da resistência, pela equação (4.14).

Substituindo-se a equação (4.14) na equação (4.7), ocorre:

$$I = G_T \cdot V_S \quad (4.15)$$

Então, reescrevendo-se a equação (4.8) em termos das condutâncias dos resistores, vem:

$$1/R_T = 1/R_1 + 1/R_2 + 1/R_3 \Rightarrow G_T = G_1 + G_2 + G_3 \quad (4.16)$$

Generalizando-se a equação (4.16) para uma associação paralela de N resistores, tem-se:

$$G_T = G_1 + G_2 + G_3 + \dots + G_N, \text{ em que } R_T = 1/G_T \quad (4.17)$$

Observa-se, portanto, que a equação (4.17) facilita o cálculo de R_T em uma associação paralela de N resistores, sendo preferencialmente usada para $N \geq 3$, já que para $N = 2$ tem-se o problema facilmente resolvido pela equação (4.11).

Antes de prosseguir, estude o exercício resolvido do exemplo 4.1 a seguir:



EXEMPLO 4.1

Considere o circuito da figura 4.2, redesenhada abaixo por conveniência, e encontre: (a) a corrente total I do circuito; (b) as correntes I_1 , I_2 e I_3 ; (c) a corrente total I como soma das correntes I_1 , I_2 e I_3 , verificando, assim, a 2ª Lei de Kirchhoff, ou Lei da Corrente de Kirchhoff – LCK; (d) as potências elétricas dissipadas nos resistores R_1 , R_2 e R_3 .

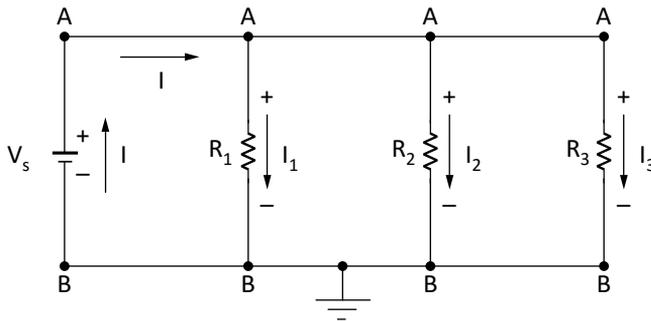


Figura 4.2 – Circuito com resistores em paralelo

Dados do circuito:

$$V_s = V_{AB} = 100 \text{ V}$$

$$R_1 = 10 \, \Omega, R_2 = 20 \, \Omega \text{ e } R_3 = 30 \, \Omega$$

ou

$$G_1 = 0,1 \text{ S}, G_2 = 0,05 \text{ S e } G_3 = 0,0333 \text{ S}$$

Solução:

a) Pela equação (1.7), ocorre: $I = V_s / R_T$, em que R_T pode ser calculada pelas seguintes equações:

a.1) equação (4.8) $\rightarrow (1/R_T) = (1/R_1) + (1/R_2) + (1/R_3)$, que acarreta uma solução para R_T um tanto quanto longa, pois envolve muitas operações de multiplicação e divisão, não sendo, portanto, aconselhável;

a.2) equação (4.16) $\rightarrow G_T = G_1 + G_2 + G_3$, que, embora apresente uma solução mais rápida que a equação (4.8) do item (a.1), necessita do cálculo dos valores das condutâncias relativas às resistências dadas; portanto, tem-se: $G_T = G_1 + G_2 + G_3 \Rightarrow G_T = 0,1 + 0,05 + 0,0333 \Rightarrow G_T = 0,1833 \text{ S} \Rightarrow R_T = (1/G_T) = 5,45 \, \Omega$.

a.3) equação (4.11) $\rightarrow R_T = (R_1 \cdot R_2) / (R_1 + R_2)$. Por esta equação, podemos ter as seguintes opções:

a.3.1) $R_{T1} = R_1 // R_2 \therefore R_T = R_{T1} // R_3$; sendo assim: $R_{T1} = (10 \cdot 20) / (10 + 20) \Rightarrow R_{T1} = 6,666 \Omega \therefore R_T = (6,666 \cdot 30) / (6,666 + 30) \Rightarrow R_T = 5,45 \Omega$.

a.3.2) $R_{T1} = R_1 // R_3 \therefore R_T = R_{T1} // R_2$; sendo assim: $R_{T1} = (10 \cdot 30) / (10 + 30) \Rightarrow R_{T1} = 7,5 \Omega \therefore R_T = (7,5 \cdot 20) / (7,5 + 20) \Rightarrow R_T = 5,45 \Omega$.

a.3.3) $R_{T1} = R_2 // R_3 \therefore R_T = R_{T1} // R_1$; sendo assim: $R_{T1} = (20 \cdot 30) / (20 + 30) \Rightarrow R_{T1} = 12 \Omega \therefore R_T = (12 \cdot 10) / (12 + 10) \Rightarrow R_T = 5,45 \Omega$.

Comparações entre os itens (a.2) e (a.3): (1) possíveis diferenças numéricas entre os resultados encontrados nos dois itens, geralmente em aproximações de casas decimais, são perfeitamente normais, desde que o valor seja praticamente o mesmo; (2) o item (a.3) é mais prático, uma vez que, além de envolver operações matemáticas rápidas, não depende do cálculo dos valores das condutâncias relativas às resistências.

Comentário – nunca se esqueça do seguinte: o valor numérico da resistência equivalente de uma associação paralela de N resistores é sempre menor que o valor numérico da resistência de menor valor da associação! (Compare este comentário com o comentário abaixo da solução do item (a) do exemplo 3.1 do capítulo 3.)

Portanto, substituindo-se o valor de $R_T = 5,45 \Omega$ na equação (4.7), ocorre: $I = V_S / R_T \Rightarrow I = 100 / 5,45 \Rightarrow I = 18,348 \text{ A}$.

b) Pelas equações (4.3), (4.4) e (4.5), ocorre: $I_1 = V_{AB} / R_1$, $I_2 = V_{AB} / R_2$ e $I_3 = V_{AB} / R_3$. Então, $I_1 = 100 / 10 \Rightarrow I_1 = 10 \text{ A}$; $I_2 = 100 / 20 \Rightarrow I_2 = 5 \text{ A}$; e $I_3 = 100 / 30 \Rightarrow I_3 = 3,333 \text{ A}$.

c) Pela LCK, equação (1.1), ocorre: $I = I_1 + I_2 + I_3$. Pelos resultados obtidos no item (b) acima, tem-se: $I = 10 + 5 + 3,333 \Rightarrow I = 18,333 \text{ A}$. Possíveis diferenças numéricas entre os resultados encontrados nos itens (a) e (c), geralmente em aproximações de casas decimais, são perfeitamente normais, desde que o valor seja praticamente o mesmo. Se o valor de R_T (que é uma dízima) no item (a) tivesse levado em consideração pelo menos mais duas casas decimais, então o cálculo da corrente I nesse item teria sido o seguinte: $I = V_S / R_T \Rightarrow I = 100 / 5,4545 \Rightarrow I = 18,333 \text{ A}$, verificando-se, portanto, a LCK!

d) Pelas equações da potência elétrica, $P = V \cdot I$ ou $P = V^2 / R$ ou $P = I^2 \cdot R$, vem:

d.1) Cálculo da potência dissipada no resistor R_1 , de três formas, levando-se ao mesmo resultado:

d.1.1) $P = V \cdot I \rightarrow P_{R1} = V_S \cdot I_1 \rightarrow P_{R1} = 100 \cdot 10 \rightarrow P_{R1} = 1 \text{ kW}$.

d.1.2) $P = V^2 / R \rightarrow P_{R1} = (V_S)^2 / R_1 \rightarrow P_{R1} = (100)^2 / 10 \rightarrow P_{R1} = 1 \text{ kW}$.

$$\mathbf{d.1.3)} \quad P = I^2 \cdot R \rightarrow P_{R_1} = (I_1)^2 \cdot R_1 \rightarrow P_{R_1} = (10)^2 \cdot 10 \rightarrow P_{R_1} = 1 \text{ kW.}$$

d.2) Cálculo da potência dissipada no resistor R_2 , de três formas, levando-se ao mesmo resultado:

$$\mathbf{d.2.1)} \quad P = V \cdot I \rightarrow P_{R_2} = V_S \cdot I_2 \rightarrow P_{R_2} = 100 \cdot 5 \rightarrow P_{R_2} = 500 \text{ W.}$$

$$\mathbf{d.2.2)} \quad P = V^2 / R \rightarrow P_{R_2} = (V_S)^2 / R_2 \rightarrow P_{R_2} = (100)^2 / 20 \rightarrow P_{R_2} = 500 \text{ W.}$$

$$\mathbf{d.2.3)} \quad P = I^2 \cdot R \rightarrow P_{R_2} = (I_2)^2 \cdot R_2 \rightarrow P_{R_2} = (5)^2 \cdot 20 \rightarrow P_{R_2} = 500 \text{ W.}$$

d.3) Cálculo da potência dissipada no resistor R_3 , de três formas, levando-se ao mesmo resultado:

$$\mathbf{d.3.1)} \quad P = V \cdot I \rightarrow P_{R_3} = V_S \cdot I_3 \rightarrow P_{R_3} = 100 \cdot 3,333 \rightarrow P_{R_3} = 333,3 \text{ W.}$$

$$\mathbf{d.3.2)} \quad P = V^2 / R \rightarrow P_{R_3} = (V_S)^2 / R_3 \rightarrow P_{R_3} = (100)^2 / 30 \rightarrow P_{R_3} = 333,3 \text{ W.}$$

$$\mathbf{d.3.3)} \quad P = I^2 \cdot R \rightarrow P_{R_3} = (I_3)^2 \cdot R_3 \rightarrow P_{R_3} = (3,333)^2 \cdot 30 \rightarrow P_{R_3} = 333,26 \text{ W.}$$

4.2 Divisão de corrente

A regra da divisão de corrente ou divisor de corrente se aplica aos resistores em paralelo. Ela fornece a corrente através de qualquer resistor que faça parte de uma associação paralela de resistores sem que se precise achar a tensão através do resistor em questão. Considerando-se o circuito da figura 4.1, seja I_1 a corrente através do resistor R_1 , I_2 a corrente através do resistor R_2 e I_3 a corrente através do resistor R_3 . Para se encontrar, por exemplo, a corrente I_1 , procede-se da seguinte forma:

Da equação (4.3), tem-se:

$$V_S = I_1 \cdot R_1 \Rightarrow V_S = I_1 / G_1 \quad (4.18)$$

Da equação (1.6), vem:

$$V_S = I / (1/R_1 + 1/R_2 + 1/R_3) \Rightarrow V_S = I / (G_1 + G_2 + G_3) \quad (4.19)$$

Igualando-se as equações (4.18) e (4.19), ocorre:

$$I_1 = (G_1 / (G_1 + G_2 + G_3)) \cdot I \quad (4.20)$$

De forma semelhante, pode-se obter as correntes I_2 e I_3 . Generalizando-se a equação (1.20), tem-se:

$$I_X = (G_X / G_{EQ}) \cdot I_T \quad (4.21)$$

A equação (4.21) é válida para 01 (uma) corrente que se divide por 02 (dois) ou mais resistores em paralelo, em que:

I_X → Corrente através do resistor “X” que tem condutância G_X .

G_X → Condutância do resistor “X” por onde circula a corrente I_X .

I_T → Corrente total que se divide pelos “N” resistores em paralelo. A corrente I_T não precisa ser aquela de uma fonte; ela é apenas a corrente total que entra nos resistores em paralelo.

G_{EQ} → Soma das condutâncias de cada resistor da associação paralela dos “N” resistores (condutância equivalente).

Para o caso especial de 02 (dois) resistores em paralelo ($R_1 // R_2$), em que se deseja calcular a corrente I_1 através de R_1 ou a corrente I_2 através de R_2 , a equação (4.21), usada para calcular I_1 reduz-se a:

$$I_1 = (G_1 / (G_1 + G_2)) \cdot I \quad (4.22)$$

Expressando-se a equação (4.22) em termos das resistências dos resistores, tem-se:

$$I_1 = [(1 / R_1) / ((1 / R_1) + (1 / R_2))] \cdot I \quad (4.23)$$

Resolvendo-se, algebricamente, a equação (4.23), ocorre:

$$I_1 = (R_2 / (R_1 + R_2)) \cdot I \quad (4.24)$$

De forma semelhante, pode-se obter a corrente I_2 . Generalizando-se a equação (4.24), vem:

$$I_X = (R_Y / (R_X + R_Y)) \cdot I \quad (4.25)$$

A equação (4.25) é válida para 01 (uma) corrente que se divide por apenas 02 (dois) resistores em paralelo, onde:

$I_x \rightarrow$ Corrente através do resistor “X” que tem resistência R_x .

$R_x \rightarrow$ Resistência do resistor “X” por onde circula a corrente I_x .

$I_T \rightarrow$ Corrente total que se divide pelos 02 resistores em paralelo, R_x e R_y .

4.3 Resumo das equações principais estudadas nos Capítulos 2, 3 e 4

1. LEI DE OHM	$V = R \cdot I$, onde $V = V_{ab} = V_a - V_b$ (diferença de potencial) $\therefore I = V/R$
2. CONDUTÂNCIA ELÉTRICA	$G = 1/R \therefore V = I/G$ e $I = G \cdot V$
3. POTÊNCIA ELÉTRICA	$P = V \cdot I$ ou $P = V^2/R$ ou $P = I^2 \cdot R$
4. RESISTÊNCIA SÉRIE EQUIVALENTE	$R_{EQ} = R_1 + R_2 + \dots + R_N$
5. RESISTÊNCIA PARALELA EQUIVALENTE	$(1/R_{EQ}) = (1/R_1) + (1/R_2) + \dots + (1/R_N)$; $G_{EQ} = G_1 + G_2 + \dots + G_N$, com $R_{EQ} = 1/G_{EQ}$; $R_{EQ} = (R_1 \cdot R_2) / (R_1 + R_2) \rightarrow$ 02 resistores em paralelo.
6. DIVISOR DE TENSÃO	$V_{XY} = (R_{XY} / R_{EQ}) \cdot V_S$, válida para 01 (uma) malha, em que: $V_{XY} \rightarrow$ Tensão entre os pontos (nós elétricos) genéricos X e Y. $R_{XY} \rightarrow$ Resistência equivalente ligada entre os nós elétricos genéricos X e Y, por onde circula a corrente que entra no nó X e sai no nó Y. $V_S \rightarrow$ Tensão que, diretamente, alimenta a malha que contém V_{XY} e R_{XY} . $R_{EQ} \rightarrow$ Resistência equivalente da malha alimentada por V_S .

7. DIVISOR DE CORRENTE

$I_x = (G_x / G_{EQ}) \cdot I_T$, válida para 01 (uma) corrente que se divide por 02 (dois) ou mais resistores em paralelo, em que:

I_x → Corrente através do resistor "X" que tem condutância G_x .

G_x → Condutância do resistor "X" por onde circula a corrente I_x .

I_T → Corrente total que se divide pelos "N" resistores em paralelo.

G_{EQ} → Soma das condutâncias de cada resistor da associação paralela dos "N" resistores (condutância equivalente).

ou

$I_x = (R_x / (R_x + R_y)) \cdot I$, válida para 01 (uma) corrente que se divide por apenas 02 (dois) resistores em paralelo, onde:

I_x → Corrente através do resistor "X" que tem resistência R_x .

R_x → Resistência do resistor "X" por onde circula a corrente I_x .

I_T → Corrente total que se divide pelos 02 resistores em paralelo, R_x e R_y .



ATIVIDADES

01. Achar a resistência equivalente R_{EQ} a partir dos terminais **AB** da rede de interconexão de resistores mostrada na figura 4.3:

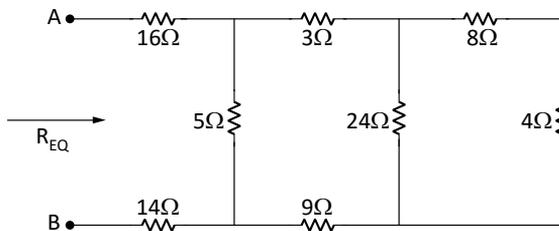


Figura 4.3 –

02. No circuito mostrado na figura 4.4, achar a resistência equivalente R_{EQ} a partir dos terminais **AB** com os terminais **CD** nas seguintes condições: (1) em circuito aberto, e; (2) em circuito fechado (curto-circuito):

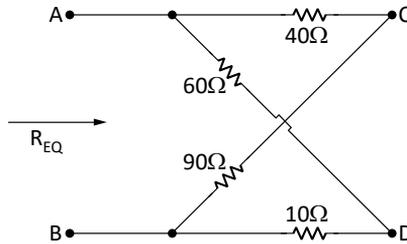


Figura 4.4 –

03. Encontre a queda de tensão V_{AB} no circuito mostrado na figura 4.5:

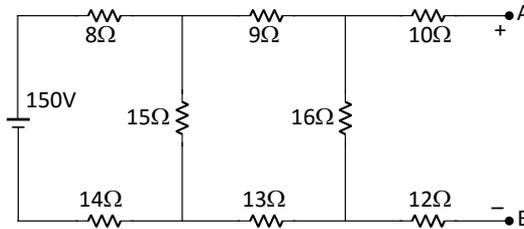


Figura 4.5 –

04. Encontre a corrente I no circuito mostrado na figura 4.6. Justifique, tecnicamente, como a corrente de 28 A pode estar surgindo no circuito:

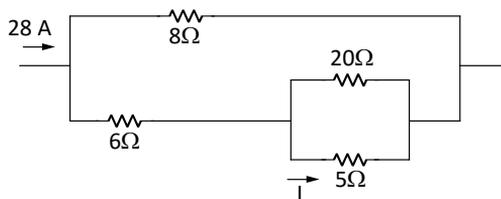


Figura 4.6 –

05. Encontre a queda de tensão V_{AB} no circuito mostrado na figura 4.7, sabendo-se que: $V_1 = 20V$, $V_2 = 25V$, $V_3 = 15V$, $V_4 = 10V$, $R_1 = 1\Omega$, $R_2 = 2\Omega$, $R_3 = 3\Omega$ e $R_4 = 4\Omega$:

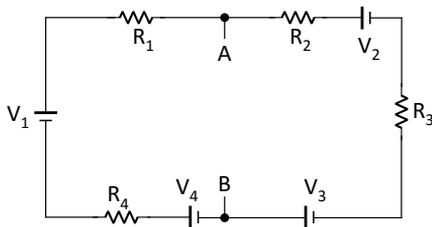


Figura 4.7 –

06. No circuito mostrado na figura 4.8, achar a resistência total R_T com os terminais C e D, (a) em circuito aberto, (b) em circuito fechado:

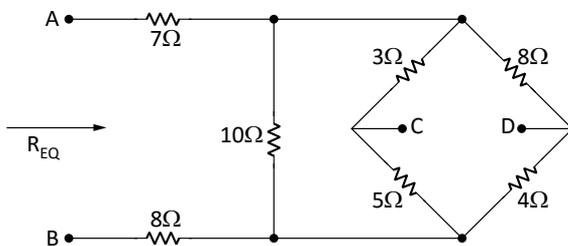


Figura 4.8 –

07. Encontre a corrente I no circuito mostrado na figura 4.9:

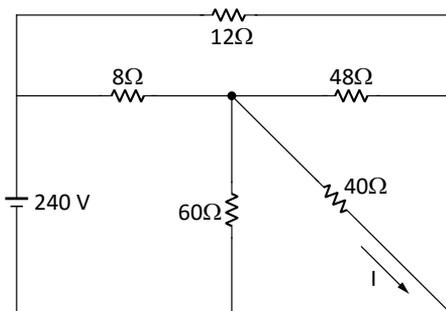


Figura 4.9 –

08. No circuito mostrado na figura 4.9, há uma lâmpada de 120 V e 60 W. Qual deve ser a tensão de alimentação V_s para a lâmpada operar em condições nominais, sabendo-se que $R_1 = 10\Omega$, $R_2 = 55\Omega$, $R_3 = 40\Omega$ e $R_4 = 60\Omega$?

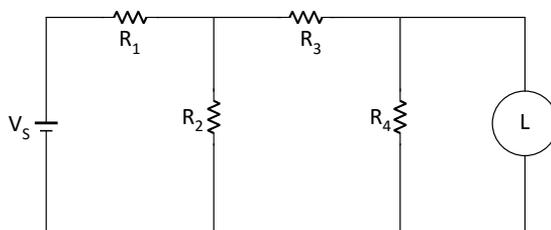


Figura 4.10 –

09. Explique, de forma precisa, o que garante que:

- 02 (dois) ou mais resistores estão em série, justificando sua explicação através do desenho de uma rede genérica de “N” resistores ligados em série.
- 02 (dois) ou mais resistores estão em paralelo, justificando sua explicação através do desenho de uma rede genérica de “N” resistores ligados em paralelo.



REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Santos, Alex Ferreira dos, **Apostila texto de circuitos elétricos I**, 2004 a 2015, IESAM, Belém, Pará, Brasil.

5

Considerações Básicas Sobre Circuitos de Corrente Alternada



OBJETIVOS

- Abordar as considerações básicas de circuitos de corrente alternada, relembrando a definição de tensão contínua;
 - Tratar qualitativamente a tensão alternada, mais especificamente a tensão senoidal, a corrente alternada, a frequência e o período de uma forma de onda periódica;
 - Estudar qualitativamente os valores eficazes (ou rms) de tensão e corrente.
-

5.1 Introdução

O propósito deste capítulo é fornecer uma visão geral dos circuitos em corrente alternada sem qualquer tipo de aprofundamento. Para isso, serão mostrados circuitos alimentados por determinadas formas de ondas, cujos gráficos e equações matemáticas concernentes serão apresentados de uma forma sucinta, sem que haja a preocupação com qualquer tipo de demonstração. Em disciplinas posteriores a esta, todas essas relações matemáticas, assim como todos os conceitos novos aqui presentes, serão devidamente demonstradas sob o aspecto tanto físico como matemático.

O capítulo em pauta inicia com um breve comentário sobre tensão contínua para, em seguida, dar prosseguimento às considerações sobre tensão e corrente alternadas.

5.2 Tensão contínua

Como foi estudado nos Capítulos 2, 3 e 4, uma tensão é chamada de contínua ou constante quando o seu valor não se altera com o tempo. Exemplo de geradores que geram tensão contínua são as pilhas e as baterias. A figura 5.1 a seguir mostra o aspecto físico, o símbolo e a curva da tensão em função do tempo deste tipo de gerador.

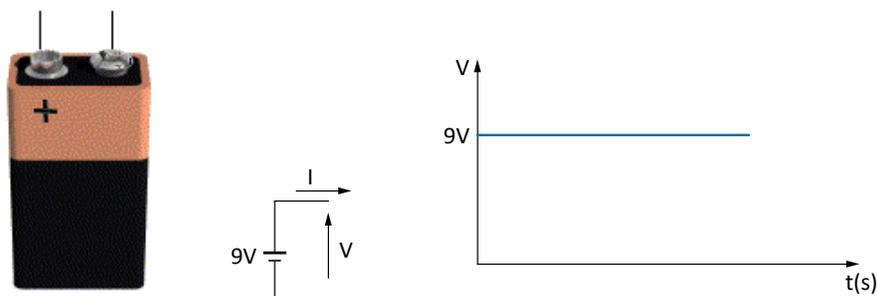


Figura 5.1 – Exemplo de fonte de tensão contínua.

5.3 Tensão alternada

A tensão alternada tem intensidade e polaridade que variam ao longo do tempo. De acordo com a forma da variação da tensão, há diferentes tipos de tensão, a saber: senoidal, quadrada, triangular, pulsante e outros. De todas essas, analisaremos, a partir de agora, a senoidal, porque é a tensão fornecida nas fontes geradoras e que alimenta as indústrias e residências.

Seja o circuito da figura 5.2, no qual há duas baterias e uma chave que ora liga a bateria B_1 ao resistor de 10Ω , ora liga a bateria B_2 a esse resistor.

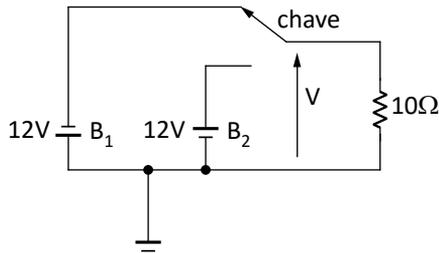


Figura 5.2 – Exemplo de geração alternada, provocando uma tensão alternada sobre uma carga resistiva.

Com relação à figura 5.2, vamos supor que cada bateria fica ligada ao resistor durante 1 s. Então, o gráfico da tensão em função do tempo nos terminais da bateria seria como mostra a figura 5.3:

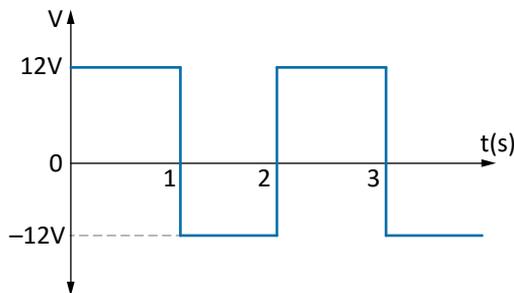


Figura 5.3 – Forma de onda quadrada da geração alternada do circuito da figura 5.2.

Na figura 5.3, o valor negativo significa que a polaridade da tensão mudou. Sendo assim, tem-se uma forma de onda quadrada. O tempo que leva para repetir uma mesma situação é 2 s, sendo chamado de período T. O valor máximo da tensão é de 12 V, chamado de valor de pico V_p ou valor máximo V_M . Além da forma de onda quadrada, há aplicações em eletricidade da forma de onda triangular e, principalmente, da forma de onda senoidal, que será analisada a seguir.

5.4 Tensão senoidal

É uma tensão que varia com o tempo de acordo com uma função senoidal. A expressão matemática é dada pela função $v(t) = V_M \cdot \text{sen}(\omega t + \alpha)$, em que V_M é o valor máximo (ou valor de pico) da tensão dada em V (volts), ω é a frequência angular dada em rd/s (radianos por segundo) e α corresponde ao ângulo de fase inicial dado em graus ou radianos. A representação gráfica dessa função senoidal é mostrada na figura 5.4:

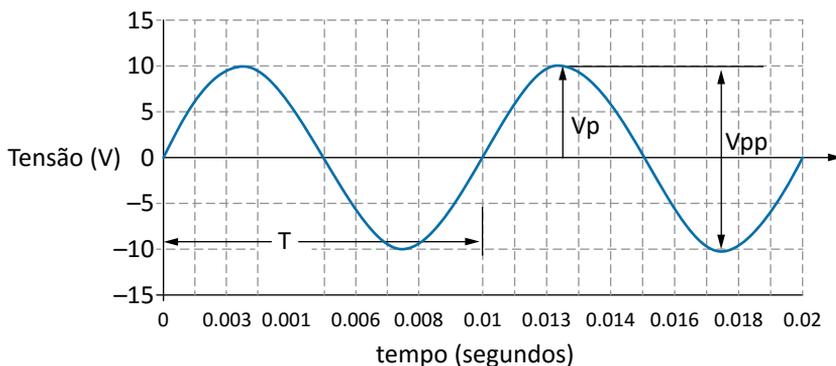


Figura 5.4 – Representação gráfica da função senoidal.

No gráfico da figura 5.4, V_p é o valor de pico, V_{pp} é o valor de pico a pico e T é o período da função. Essa figura é a representação gráfica de uma tensão senoidal provocada pelo giro da espira de uma máquina elétrica elementar funcionando como gerador, como mostra a figura 5.5:

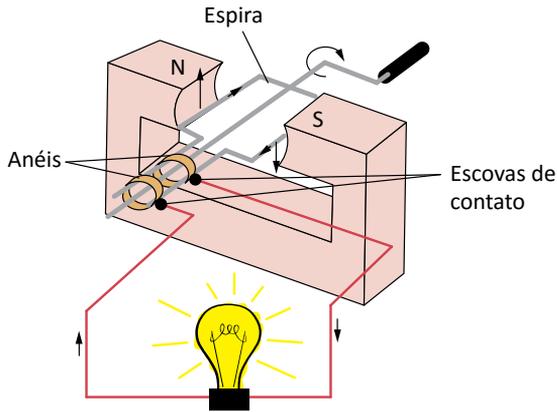


Figura 5.5 – Representação de uma máquina elétrica elementar funcionando como gerador.

5.5 Corrente alternada

Quando uma tensão senoidal é ligada aos terminais de uma carga, a corrente através dessa carga também é representada matematicamente por uma forma de onda senoidal. Veja o exemplo a seguir:

Seja uma tensão senoidal aplicada a uma resistência de carga de $10\ \Omega$, como mostra a figura 5.6:

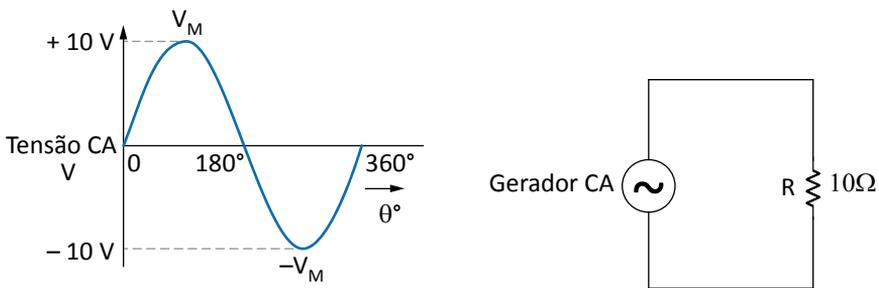


Figura 5.6 – Tensão senoidal aplicada a uma resistência de carga de $10\ \Omega$.

Então, a onda senoidal resultante para a corrente alternada (CA) é obtida da seguinte forma:

- O valor instantâneo da corrente é $I = V/R$;
- O valor máximo da corrente é dado por $I_M = V_M/R = 10/10 = 1\ \text{A}$;

- Em um circuito apenas com resistência, a forma de onda da corrente segue a polaridade da forma de onda da tensão;
- Então, a corrente é definida pela expressão $i(t) = I_M \cdot \text{sen}(\omega t + \alpha)$, e sua representação gráfica é mostrada na figura 5.7 a seguir:

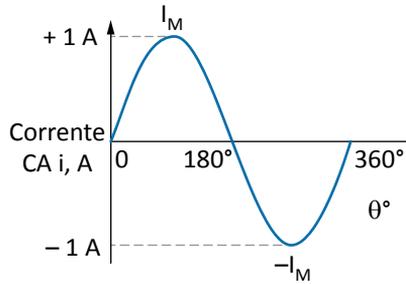
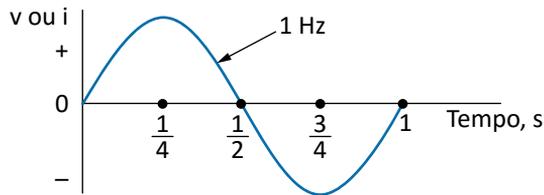


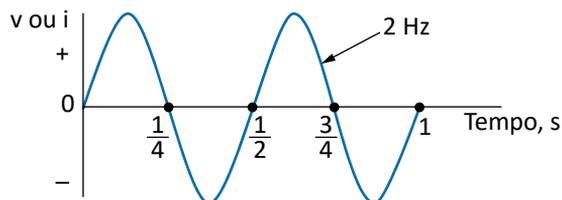
Figura 5.7 – Forma de onda da corrente do circuito da figura 2.3.

5.6 Frequência e período

Observe os gráficos da figura 5.8 abaixo:



(a) $f = 1 \text{ Hz}$



(b) $f = 2 \text{ Hz}$

Figura 5.8 – Análise de frequência e período de uma forma de onda senoidal.

Então, o número de ciclos por minuto da forma de onda é chamado de *frequência* e é representado pelo símbolo f , sendo sua unidade dada em hertz (Hz). O intervalo de tempo para que um ciclo se complete é chamado de período e é representado pelo símbolo T , sendo sua unidade dada em segundos (s). A frequência é o inverso do período, ou seja:

$$f = 1/T \text{ e } T = 1/f$$

Portanto, quanto maior a frequência, menor o período, e vice-versa. Vale ressaltar que, no Brasil, o fornecimento de energia elétrica pelas concessionárias é de 60 Hz de frequência.

5.7 Relação entre graus elétricos e tempo

O ângulo de 360° representa o tempo para um ciclo, ou período T . Portanto, a figura 5.9 mostra a seguinte representação gráfica.

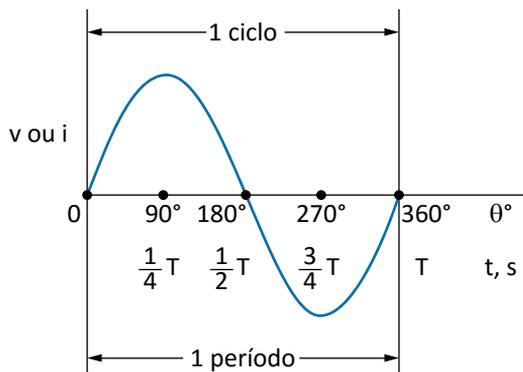


Figura 5.9 – Relação entre graus elétricos e tempo em uma forma de onda senoidal.

Veja o exemplo a seguir:

Uma corrente CA varia ao longo de um ciclo completo em $(1/100)$ s. Qual o período e a frequência? Se a corrente tiver um valor máximo de 5 A, mostrar a forma de onda para a corrente em graus e em segundos.

- $T = (1/100)\text{s}$ ou 10ms;
- $f = 1/T = (1/(1/100)) = 100 \text{ Hz}$;

• A forma de onda para a corrente em graus e em segundos é mostrada na figura 5.10 a seguir:

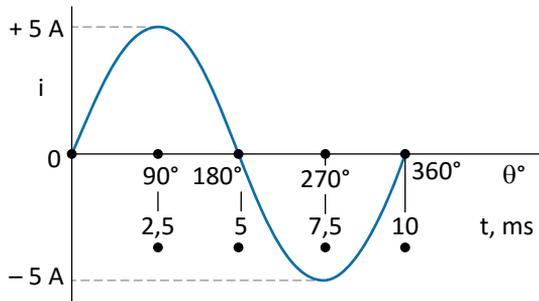


Figura 5.10 – Relação entre graus elétricos e tempo em uma forma de onda senoidal.

5.8 Valores eficazes (ou *rms*) de tensão e corrente

Observe o seguinte:

- O valor de pico é o valor máximo V_M (ou V_p) para tensão e I_M (ou I_p) para corrente;
- O valor de pico a pico – V_{pp} para tensão e I_{pp} para corrente – é igual ao dobro do valor de pico, quando os picos positivo e negativo são simétricos.
- O valor médio corresponde à média aritmética de todos os valores numa onda senoidal, seja de tensão ou de corrente, considerando-se um meio ciclo. Prova-se, matematicamente, que: valor médio = $0,637 \times$ valor de pico. Essa relação vale para valores de tensão e de corrente.
- O valor eficaz (ou *rms*) de uma forma de onda senoidal de tensão ou de corrente corresponde à mesma quantidade de tensão ou corrente contínua capaz de produzir a mesma potência dissipada. Em outras palavras, quando uma carga (p.ex. resistor) é alimentada por uma tensão alternada senoidal, ela não “sente” a variação instantânea de tensão $v(t)$ nem de corrente $i(t)$ através dela; na verdade, ela “sente” uma forma de tensão constante e de corrente constante através dela. Prova-se que esses valores de tensão constante (não verdadeira; apenas aparente) e de *corrente constante* (não verdadeira; apenas aparente) eficazmente produzem a potência média dissipada na carga. Por este ponto de

vista, essa tensão constante é chamada de tensão eficaz; da mesma forma, essa corrente constante é chamada de corrente eficaz. Entretanto, através do cálculo integral e diferencial, chega-se a uma expressão matemática que relaciona a tensão instantânea $v(t)$ através da carga (tensão verdadeira mas que a carga “não sente”) com a tensão eficaz V_{EF} através da carga (tensão não verdadeira mas que a carga “sente”); procedimento válido, também, para a corrente instantânea $i(t)$ e a corrente eficaz. Como essa expressão matemática é uma raiz média quadrada, e que no idioma inglês se traduz como root mean square, adotaram-se as iniciais rms da tradução em inglês para também designar a tensão eficaz e a corrente eficaz. Então, têm-se: $V_{EF} = V_{RMS}$ e $I_{EF} = I_{RMS}$. Prova-se, matematicamente, que, para uma forma de onda senoidal de tensão ou de corrente, ocorrem: $V_{RMS} = V_P / \sqrt{2}$ e $I_{RMS} = I_P / \sqrt{2}$

Portanto, para se medir a tensão através do resistor do circuito mostrado na figura 5.6, estando o voltímetro corretamente ligado ao circuito, escolhe-se uma escala adequada de medida de tensão ACV (volt) para se proceder à medição. Como a tensão do circuito da figura 5.6 é alternada, ela alimenta o circuito com uma corrente alternada, que no idioma inglês se traduz como *alternating current*, sendo as iniciais AC usadas nos multímetros para medidas de tensões alternadas.



ATIVIDADE

01. Faça um resumo de cada item deste capítulo, destacando as partes principais abordadas.



REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

www4.feb.unesp.br/dee/.../Circuitos%20de%20Corrente%20Alternada.p...

Santos, Alex Ferreira dos, **Apostilas texto de circuitos elétricos I e II**, 2004 a 2015, IESAM, Belém, Pará, Brasil.

6

Medidas Eléctricas



OBJETIVOS

- Apresentar os conceitos básicos de medidas elétricas;
 - Classificar os instrumentos de medidas elétricas com relação a grandeza a ser medida;
 - Comparar os instrumentos analógicos e os digitais citando suas características construtivas;
 - Considerar os instrumentos básicos de medidas elétricas, que são o amperímetro e o voltímetro.
-

6.1 Introdução a medidas elétricas

6.1.1 Conceitos básicos

Medir é estabelecer uma relação numérica entre uma grandeza e outra, de mesma espécie, tomada como unidade. Medidas elétricas só podem ser realizadas com a utilização de instrumentos medidores, que permitem a quantificação de grandezas cujo valor não poderia ser determinado através dos sentidos humanos.

6.2 Classificação dos instrumentos de medidas elétricas

Os instrumentos de medidas elétricas podem ser classificados de várias formas, de acordo com o aspecto considerado, quanto à:

6.2.1 Grandeza a ser medida

Neste caso, tem-se:

- Amperímetro para medir corrente
- Voltímetro para medir tensão
- Wattímetro para medir potência ativa
- Varímetro para medir potência reativa
- Fasímetro ou cosifímetro para medir defasagem entre tensão e corrente
- Ohmímetro para medir resistência
- Capacímetro para medir capacitância
- Frequencímetro para medir frequência

6.2.2 Forma de apresentação dos resultados

Os resultados numéricos apresentados pelos instrumentos de medidas elétricas podem estar dispostos nas seguintes formas:

- Analógica, na qual a leitura é feita de maneira indireta, usualmente através do posicionamento de um ponteiro sobre uma escala, como o mostrado na figura 6.1 a seguir:



Figura 6.1 – Multímetro analógico.

- Digital, que fornecem a leitura diretamente em forma alfa-numérica num display, como mostrado na figura 6.2 abaixo:

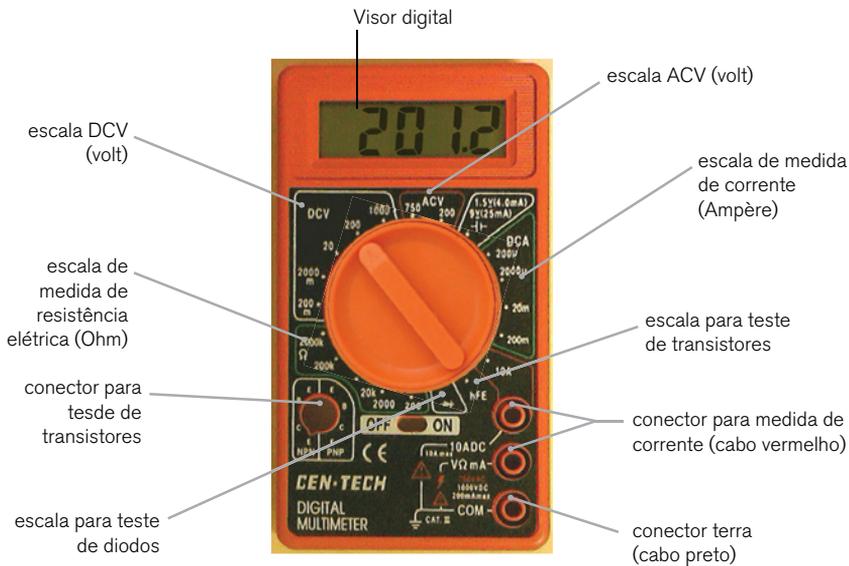


Figura 6.2 – Multímetro digital.

6.3 Considerações básicas sobre os instrumentos analógicos e os digitais

6.3.1 Instrumentos analógicos

O instrumento analógico tem como fundamentação básica a medida de corrente (amperímetro); adaptações feitas neste medidor permitem que seja usado para a medida de outras grandezas, como tensão e resistência.

6.3.1.1 Características construtivas

Os instrumentos analógicos baseiam sua operação em algum tipo de fenômeno eletromagnético ou eletrostático, como a ação de um campo magnético sobre uma espira percorrida por corrente elétrica ou a repulsão entre duas superfícies carregadas com cargas elétricas de mesmo sinal. São, portanto, sensíveis a campos elétricos ou magnéticos externos, de modo que muitas vezes é necessário blindá-los contra esses campos.

O mecanismo de suspensão é a parte mais delicada de um instrumento analógico. É ele que promove a fixação da parte móvel (geralmente um ponteiro) e deve proporcionar um movimento com baixo atrito.

A escala é um elemento importante nos instrumentos analógicos, já que é sobre ela que são feitas as leituras. Entre suas muitas características, podem-se ressaltar as seguintes:

- Fundo de escala 1 ou calibre: o máximo valor que determinado instrumento é capaz de medir sem correr o risco de danos.
- Posição do zero: a posição de repouso do ponteiro, quando o instrumento não está efetuando medidas (zero) pode variar muito: zero à esquerda, zero à direita, zero central, zero deslocado ou zero suprimido (aquela que inicia com valor maior que zero).
- Correção do efeito de paralaxe: muitos instrumentos têm um espelho logo abaixo da escala graduada; neste caso, a medida deverá ser feita quando a posição do observador é tal que o ponteiro e sua imagem no espelho coincidam.

6.3.2 Instrumentos digitais

Se nos instrumentos analógicos o modelo básico é o amperímetro, a operação dos aparelhos digitais tem como fundamento a medida de tensão (voltímetro). A alteração da configuração inicial permite que sejam medidas outras grandezas, como corrente, resistência, frequência, temperatura, capacitância e outros.

6.3.2.1 Características construtivas

A característica básica dos instrumentos digitais é a conversão dos sinais analógicos de entrada em dados digitais. Esta conversão analógico-digital (ou A-D) é realizada por circuitos eletrônicos, cuja operação será estudada em outro momento do Curso. A parte mais evidente em um instrumento digital é seu display (visor), que pode ser de dois tipos, a saber:

- Display de LED (Light Emitting Diode), é um dispositivo semicondutor capaz de emitir luz quando percorrido por corrente elétrica. Esse display geralmente tem fundo escuro, para proporcionar maior destaque ao brilho do LED.

- Display de Cristal Líquido, ou LCD (Liquid Crystal Display), é um dispositivo constituído por duas lâminas transparentes de material polarizador de luz, com eixos polarizadores alinhados perpendicularmente entre si; entre as lâminas existe uma solução de cristal líquido, cujas moléculas podem alinhar-se sob a ação da corrente elétrica, impedindo a passagem da luz. A figura 6.3 mostra os dois modelos de display vistos acima:

(a)



(b)



Figura 6.3 – Exemplos de displays: (a) LED; (b) Multímetro digital – LCD

6.4 Instrumentos básicos de medidas elétricas

Denominam-se básicos os instrumentos destinados à medida das grandezas elétricas básicas: corrente, tensão, potência e energia. Outras grandezas elétricas – como resistência e capacitância – podem ser determinadas a partir de adaptações feitas nesses medidores básicos.

6.4.1 Amperímetro

Utilizado para medir correntes elétricas, sempre é ligado em série com a carga cuja corrente deva ser medida; isto significa que um condutor deverá ser “aberto” no ponto de inserção do instrumento, como mostra a figura 6.4:

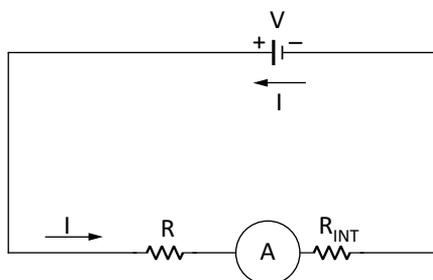


Figura 6.4 – Esquema de ligação do amperímetro em um circuito elétrico.

Como o amperímetro deve ser ligado sempre em série para medir a corrente I que passa por determinada carga R do circuito, sua resistência interna R_{INT} deve ser muito pequena. Sendo sua resistência interna muito pequena quando comparada às demais resistências do circuito, consideramos o amperímetro como sendo ideal; esse é o caso padrão de todos os amperímetros de boa qualidade.

Estando o amperímetro corretamente ligado ao circuito, escolhe-se uma escala adequada de medida de corrente (ver figura 6.2 como exemplo) para se proceder à medição. Como a corrente do circuito da figura 6.4 é contínua, é considerada uma corrente direta, que no idioma inglês se traduz como *direct current*, sendo as iniciais DC usadas nos multímetros para medidas de correntes contínuas.

6.4.2 Voltímetro

Utilizado para medir tensões elétricas, **sempre é ligado em paralelo** com a carga cuja tensão deva ser medida; observe a figura 6.5:

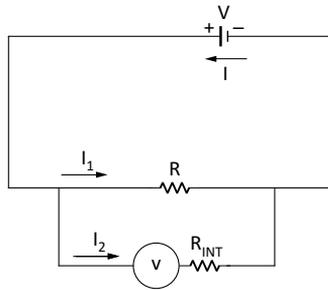


Figura 6.5 – Esquema de ligação do voltímetro em um circuito elétrico.

Como o voltímetro deve ser ligado sempre em paralelo para medir a tensão através de determinada carga R do circuito, sua resistência interna R_{INT} deve ser muito grande para que a corrente elétrica I_2 que passa por ele seja a menor possível, desviando, portanto, uma parte muito pequena da corrente total I que deveria passar pela carga R , na qual, na realidade, estará passando a corrente I_1 . Se sua resistência interna R_{INT} for muito grande, a corrente I_2 será tão pequena que a corrente I_1 será praticamente igual à corrente I ; aí, poderemos considerar o voltímetro como sendo ideal.

Estando o voltímetro corretamente ligado ao circuito, escolhe-se uma escala adequada de medida de tensão DCV (volt) (ver figura 6.2 como exemplo) para se proceder à medição. Como a tensão do circuito da figura 6.5 é constante, ela alimenta o circuito com uma corrente contínua, que é considerada, portanto, uma corrente direta, que no idioma inglês se traduz como *direct current*, sendo as iniciais DC usadas nos multímetros para medidas de tensões contínuas.



ATIVIDADES

01. Faça um resumo de cada item deste capítulo, destacando as partes principais abordadas.



REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- NEVES, E. G. C; MÜNCHOW, R. Caderno Didático – Eletrotécnica – Capítulo 06 – Medidas Elétricas. Vol. 1. Universidade Federal de Pelotas (UFPEL).
- FRANK, E. Electrical Measurement Analysis. Editora Robert E. Krieger, 1977.
- GUSSOW, M. Eletricidade Básica. Editora Pearson Makron Books, 1997.
- Santos, Alex Ferreira dos, Apostilas texto de circuitos elétricos I e II, 2004 a 2015, IESAM, Belém, Pará, Brasil.
-



GABARITO

Capítulo 1

01. Resumo

Capítulo 2

01. (a) 1006 C, (b) 140 C
02. $2,5 \times 10^{10}$ elétrons
03. (a) 15 A, (b) 0,75 A e (c) 3,56 A
04. corrente de carga \rightarrow 500 A; corrente de descarga \rightarrow 10.000 A
05. 3,36 A para a direita ou para a esquerda, conforme a convenção desejada.
06. 6 s
07. (a) 71,4 ms, (b) 2 μ s, (c) 1751719,9 s \rightarrow 20,3 dias
08. 10,3 Ω
09. 172 μ A
10. 20 mV
11. 4,23 mA
12. 6,75 V

Capítulo 3

- 01.
- (1) Corrente elétrica $I = 17,647$ mA;
- (2) A tensão $V_{ab} = 3,88234$ V

A tensão $V_{bc} = 5,82351 \text{ V}$

A tensão $V_{cd} = 8,29409 \text{ V}$

(3) O somatório de $V_{ab} + V_{bc} + V_{cd} = V_{ad} = 17,99994 \text{ V}$, que é aproximadamente igual a 18 V , confirmando a Lei da Tensão de Kirchhoff.

(4) As potências dissipadas em cada resistor são as seguintes:

(4.1) Em $R_1 = 68,51 \text{ mW}$

(4.2) Em $R_2 = 102,76 \text{ mW}$

(4.3) Em $R_3 = 146,36 \text{ mW}$

02. Resposta na página 74 do Capítulo 3, com base nas figuras 3.1a e 3.1a': o que garante que dois ou mais resistores estão em série é o fato de todos estarem ligados em sequência e por todos eles passar a mesma corrente elétrica.

Capítulo 4

01. 34 Ohms .

02. a) $45,5 \text{ Ohms}$; b) 33 Ohms .

03. $20,73 \text{ V}$.

04. $9,95 \text{ A}$.

05. 20 V .

06. a) $18,2 \text{ Ohms}$; b) $18,1 \text{ Ohms}$.

07. 4 A .

08. 285 V .

09. a) Resposta na página 74 do Capítulo 3, com base nas figuras 3.1a e 3.1a': o que garante que dois ou mais resistores estão em série é o fato de todos estarem ligados em sequência e por todos eles passar a mesma corrente elétrica.

b) Resposta na página 83 do Capítulo 4, com base na figura 4.1: o que garante que dois ou mais resistores estão em paralelo é o fato de todos estarem ligados no mesmo par de nós elétricos.

Capítulo 5

01. Resumo

Capítulo 6

01. Resumo



ANOTAÇÕES



ANOTAÇÕES



ANOTAÇÕES



ANOTAÇÕES