



TÉCNICO EM **ELETROTÉCNICA**

Módulo I

Eletricidade



INSTITUTO DE ENSINO PROFISSIONALIZANTE E TÉCNICO
Quadra 101, Conjunto 2, Lote 01, Sobreloja
Recanto das Emas, Brasília/DF

61 3082.1060
ineprotec.com.br

ELETRICIDADE

Ficha Técnica

Tutor Responsável - Flávio Chiapetti
Capa / Diagramação - Gabriel Araújo Galvão
Elaboração - professor Patrick de Souza Girelli

Índice

Eletrostática.....	05
Eletrodinâmica	15
Magnetismo e Eletromagnetismo.....	27
Circuitos Elétricos(CA)	36
Finalizando	48
Referências	49

1. Eletrostática

1.1 Histórico

A eletricidade é algo que sempre despertou a curiosidade e o interesse das pessoas desde a Antiguidade, não é verdade? Entender os diversos fenômenos que aconteciam naquela época se tornou alvo de pesquisa de diversos estudiosos e cientistas ao longo da história da humanidade.

As primeiras observações que se tem registro se reportam ao sábio grego Tales de Mileto¹.

Ele percebeu que um pedaço de lã em atrito com uma substância resinosa denominada âmbar², a substância adquiria a propriedade de atrair corpos leves, como fios de palha ou pequenas penas.

Um dos experimentos mais conhecidos e lembrados por grande parte das pessoas se refere ao fato idealizado por Benjamin Franklin³, quando empinou uma pipa de seda com ponta de metal, em meio a uma tempestade, com a finalidade de confirmar a sua teoria sobre a natureza elétrica do raio.

Inúmeras teorias e modelos atômicos existiram para explicar como a matéria que existe na natureza é constituída, e a partir disso também poder explicar os fenômenos relacionados à eletricidade.

O modelo atômico que nos permite compreender a constituição da matéria foi concebido pelo físico dinamarquês Niels Henrik David Bohr. De acordo com esse modelo, a matéria é constituída de átomos e cada átomo por sua vez é constituído por três tipos fundamentais de partículas: os prótons, os elétrons e os nêutrons.

O átomo, que em grego significa indivisível, é constituído essencialmente de duas partes: núcleo e eletrosfera.

A eletrosfera corresponde à região onde os elétrons orbitam, em altíssima velocidade, e o núcleo corresponde à região onde se localizam os prótons e nêutrons.

Para esses elementos que constituem o átomo se convencionou que os prótons têm carga elétrica positiva,

os elétrons têm carga elétrica negativa e os nêutrons, por sua vez, não têm carga elétrica. No estado natural, a quantidade de prótons e elétrons é a mesma, o que torna o átomo eletricamente neutro, pois possui a mesma quantidade de cargas negativas e positivas, como você pode verificar na figura a seguir.

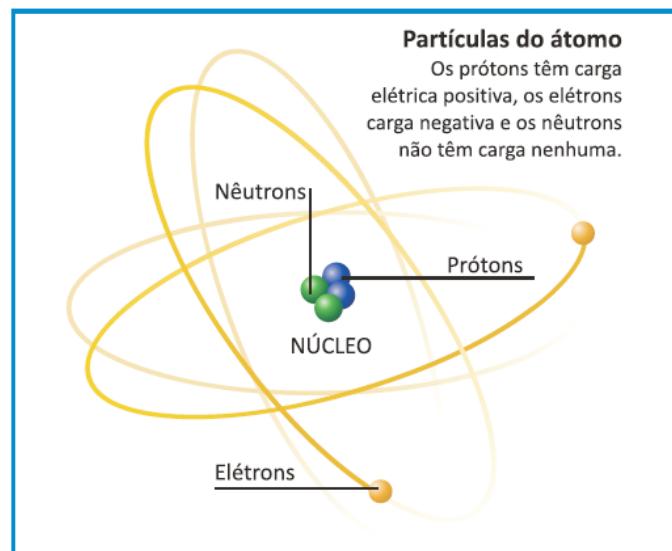


Figura 1 - Estrutura do ÁtomoFonte: Carvalho e Fonseca (2009).

Saiba Mais

Para saber mais sobre o átomo e a estrutura da matéria acesse o site <www.sprace.org.br/eem>, lá você encontrará explicações mais aprofundadas sobre o átomo e todos os elementos que o constituem, inclusive os que aqui não foram citados por não serem foco do estudo desenvolvido neste curso.

Você sabia que a máquina fotocopiadora é um exemplo prático da aplicação dos princípios de eletrostática?

Isso mesmo! O mecanismo completo dessa máquina é complexo e sofisticado. Entretanto, seus componentes básicos são simples e se constituem de um cilindro rotativo revestido de material fotossensível (selênio ou óxido de zinco), um sistema ótico para refletir a imagem a ser reproduzida sobre o cilindro, uma lâmpada e

1. Tales de Mileto: foi o primeiro matemático grego, nascido por volta do ano 640 e falecido em 550 a.C. Tales foi incluído entre os sete sábios da Antiguidade. Após estudar Astronomia e Geometria no Egito, Tales voltou para Mileto e passado algum tempo abandonou os negócios e a vida pública para se dedicar inteiramente às especulações filosóficas, às observações astronômicas e às matemáticas. Fundou a mais antiga escola filosófica que se conhece – a Escola Jônica (UNIVERSIDADE de Lisboa, 2009).

2. Âmbar: em grego significa eléktron, palavra que dá origem ao termo eletricidade.

3. Benjamin Franklin: suas descobertas sobre a eletricidade lhe trouxeram uma reputação internacional. Além de ser eleito membro da Royal Society, ganhou a medalha Copley em 1753 e seu nome passou a designar uma medida de carga elétrica. Franklin identificou as cargas positivas e negativas e demonstrou que os trovões são um fenômeno de natureza elétrica. Esse conhecimento serviu de base para seu principal invento, o para-raios. Ele criou também o franklin stove (um aquecedor a lenha muito popular) e as lentes bifocais (UOL educação, 2009).

um pó preto chamado toner.

De forma simplificada, confira a seguir como podemos resumir seu funcionamento (WOLSKI, 2007, p. 7):

a. o cilindro rotativo é inicialmente eletrizado. Em seguida, o sistema ótico reflete sobre o cilindro, já em rotação, a imagem a ser fotocopiada. Sobre o cilindro, portanto, são refletidas luz e sombras. Onde a luz incide, as cargas do cilindro são eliminadas (fotossensibilidade). No restante, ou seja, nas sombras, as cargas permanecem;

b. em seguida, o cilindro passa rotacionando sobre o toner, atraindo-o nas partes onde as cargas persistem. Uma folha eletricamente carregada passa então sobre o cilindro, atraindo o toner e, consequentemente, a imagem reproduzida;

c. para fixar definitivamente o toner na folha, esta é exposta a um aquecimento rápido. Está pronta a cópia!

d. Então, gostou de conhecer o funcionamento da máquina fotocopiadora? Agora se prepare, pois entraremos no mundo dos processos de eletrização. Vamos juntos!

1.2 PROCESSOS DE ELETRIZAÇÃO

Quanto ao seu comportamento elétrico, os corpos podem ser classificados em eletricamente neutros (quando possuem o mesmo número de prótons e elétrons), carregados negativamente (quando o número de elétrons é maior que o número de prótons) e carregados positivamente (quando o número de prótons é maior que o número de elétrons).

Para que um corpo que está neutro fique eletricamente carregado positivamente ou negativamente, ele precisa passar por um processo de eletrização. Os processos de eletrização são:

- eletrização por atrito;
- eletrização por contato; e
- eletrização por indução.

Após a eletrização dos corpos, estes estão sujeitos ao princípio básico da eletrostática enunciado pela Lei de Du Fay, cuja afirmação é: cargas elétricas de mesmo sinal se repelem e cargas elétricas de sinais opostos se atraem. Corpos eletricamente neutros são atraídos por corpos carregados com carga de qualquer sinal. Confira a figura a seguir!

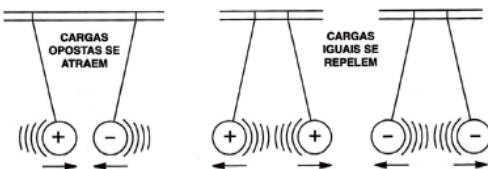


Figura 2 - Princípio Básico da Eletrostática

Fonte: Saturnino ([200-?], p. 17).

ELETRIZAÇÃO POR ATRITO

Uma das formas de se eletrizar um corpo é atritá-lo com outro de característica diferente. Claro que não são quaisquer corpos que podem ser atritados e dessa forma adquirem carga elétrica.

Um exemplo muito simples do processo de eletrização por atrito corresponde ao fato ocorrido quando você esfrega uma régua plástica no cabelo, e após, para evidenciar a existência de carga elétrica, aproxima a régua de pequenos pedacinhos de papel picado que são atraídos pela régua. Quando atritamos a régua no cabelo, um dos corpos ganha elétrons, ficando carregado negativamente, enquanto o outro perde elétrons, ficando carregado positivamente.

É importante salientar que ao final do processo de eletrização por atrito, os corpos adquirem cargas elétricas de mesmo módulo (quantidade), porém de sinais contrários.

Veja na figura a seguir uma situação em que ocorre a eletrização por atrito entre uma canaleta plástica e um pedaço de feltro, cuja evidência da existência de cargas elétricas na canaleta se dá pelo fato dela atraír uma esfera de isopor em um eletroscópio de pêndulo.

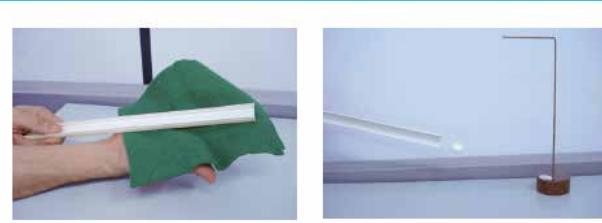


Figura 3 - Eletrização por Atrito e Atração em Eletroscópio de Pêndulo

Você sabia? Os aviões e as espaçonaves em movimento adquirem grande quantidade de carga elétrica pela troca de forças entre a lataria e o ar atmosférico. Essas cargas vão sendo descarregadas pelas várias pontas

existentes na superfície desses veículos: bico, asas e diversas hastes metálicas colocadas como proteção contra o acúmulo de cargas. Esse acúmulo poderia fazer explodir o avião caso uma faísca se formasse nas proximidades do tanque de combustível, incendiando seus vapores (PARANÁ, 1998, p. 25).

DICA

- Arite uma régua plástica em um pedaço de seda ou feltro e depois aproxime a régua de pedacinhos de papel picado.
- Encha um balão e em seguida atrite o mesmo em cabelos compridos. Afaste-o dos cabelos lentamente. O que você observou? Vamos ver juntos!

Eletrização por contato

Quando dispomos de dois corpos condutores, um neutro e outro previamente eletrizado, e colocamos esses dois corpos em contato, pode ocorrer passagem de elétrons de um para outro, fazendo com que o corpo neutro se eletrize.

No caso em que eletrizamos uma régua plástica por atrito com um tecido e a aproximamos de pequenos pedacinhos de papel (inicialmente neutros), esses papéis são inicialmente atraídos pela régua, que está eletrizada. Ao entrarem em contato com a régua, os pedacinhos de papel também irão adquirir carga elétrica, cedida pela régua. Após alguns instantes, esses pedacinhos de papel serão repelidos pela régua, estando eletrizados agora por meio do processo de eletrização por contato.

É importante salientar que ao final do processo de eletrização por contato, os condutores de mesma forma e mesmas dimensões adquirem cargas elétricas de mesmo módulo (quantidade) e de mesmo sinal.

ELETRIZAÇÃO POR INDUÇÃO

Podemos eletrizar um condutor neutro simplesmente aproximando dele um corpo eletricamente carregado, sem que haja contato entre eles.

Quando aproximamos um bastão eletrizado de um corpo neutro, as cargas negativas do bastão eletrizado repelem os elétrons livres do corpo neutro para posições mais distantes possíveis. Assim, o corpo neutro fica com falta de elétrons numa extremidade e excesso de elétrons na outra. Esse fenômeno de separação de cargas

num condutor, provocado pela aproximação de um corpo eletrizado, é denominado indução eletrostática. Nesse processo de indução eletrostática ocorre apenas uma separação entre algumas cargas positivas e negativas do corpo, de modo que se afastarmos o corpo eletricamente carregado, o corpo induzido voltará à sua condição inicial de neutralidade.

É importante ressaltar que o corpo eletrizado que provoca a indução é denominado indutor e o que sofreu a indução, induzido.

Se desejarmos obter no induzido uma eletrização com cargas de apenas um sinal, devemos ligá-lo à terra por meio de um condutor. Desse modo, os elétrons livres do induzido que estão sendo repelidos pela presença do indutor se movem pelo condutor até a terra para se neutralizarem. Após esse processo, basta afastarmos o indutor do induzido, porém antes do afastamento, é necessário que se desfaça a ligação do induzido à terra, caso contrário, ao afastarmos o indutor, as cargas no induzido voltarão a se neutralizar.

É importante salientar que ao final do processo de eletrização por indução, os condutores adquirem cargas elétricas de mesmo módulo (quantidade) e de sinal contrário.

Você já ouviu falar na Lei de Coulomb? E sobre carga elétrica elementar? É sobre esses assuntos que conversaremos a seguir. Vamos em frente!

1.3 CARGA ELÉTRICA ELEMENTAR E LEI DE COULOMB

Nas seções anteriores você viu que um átomo está eletricamente equilibrado quando possui o mesmo número de prótons e elétrons e caso isso não ocorra ele estará desequilibrado, possuindo cargas positivas ou negativas, certo?

Mas como será que podemos saber a quantidade de cargas positivas ou negativas que esse corpo possui?

Fácil! Tanto os elétrons quanto os prótons possuem o mesmo valor de carga elétrica em módulo (numericamente iguais e diferentes apenas em seu sinal), sendo esse valor conhecido como **carga elétrica elementar**, confira.

$$e = -1,6 \cdot 10^{-19} \text{ C} \rightarrow \text{carga elétrica do elétron}$$

$$p = +1,6 \cdot 10^{-19} \text{ C} \rightarrow \text{carga elétrica do próton}$$

A quantidade de carga elétrica de um corpo dependerá exatamente da diferença entre o número de elétrons e de prótons nesse corpo, e pode ser determinada por meio da seguinte equação:

$$q = n \cdot e$$

Sendo:

$q \rightarrow$ carga elétrica do corpo em coulomb (C);
 $n \rightarrow$ número de cargas em excesso no corpo;
 $e \rightarrow$ carga elementar em módulo ($1,6 \cdot 10^{-19}$ C).

RELEMBRANDO OPERAÇÕES COM NOTAÇÃO CIENTÍFICA

$$\begin{aligned} a^x \cdot a^y &= a^{x+y} \\ \frac{a^x}{a^y} &= a^x \cdot a^{-y} = a^{x-y} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} 05 \cdot 10^{-3} &= 10^2 \\ 10^5 : 10^{-3} &= 10^{5-(3)} = 10^8 \end{aligned}$$

Exemplo

Determine a carga elétrica adquirida por um corpo que após o processo de eletrização por atrito perdeu $5 \cdot 10^8$ elétrons.

$$\begin{aligned} q &= n \cdot e \\ q &= 5 \cdot 10^8 \cdot 1,6 \cdot 10^{-19} \\ q &= 8 \cdot 10^{-11} \text{ C} \end{aligned}$$

Observamos nesse exemplo que o sinal da carga elétrica no resultado é positivo, pois o corpo perdeu elétrons e dessa forma ficou com maior número de prótons, que possuem carga elétrica positiva.

LEI DE COULOMB

Já vimos, pela Lei de Du Fay, que corpos eletrizados com cargas de mesmo sinal se repelem e corpos eletrizados com cargas de sinal diferente se atraem. Quando esses corpos se repelem ou se atraem, exercem entre si uma força.

A Lei de Coulomb, verificada experimentalmente pelo cientista francês Charles Augustin Coulomb, permite expressar quantitativamente as forças de atração e repulsão entre cargas elétricas por meio da equação:

$$F = K \cdot \frac{q_1 \cdot q_2}{d^2}$$

Sendo:

$F \rightarrow$ força que atua entre cargas, em Newton (N)
 $q_1, q_2 \rightarrow$ cargas envolvidas, em Coulomb (C)
 $d \rightarrow$ distância entre as cargas, em metros (m)
 $K \rightarrow$ constante eletrostática do meio (Nm^2/C^2)
 Para o vácuo: $K = K_0 = 9 \cdot 10^9 \text{ Nm}^2/\text{C}^2$

A intensidade da força elétrica da interação entre duas cargas puntiformes é diretamente proporcional ao produto dos módulos das cargas e inversamente proporcional ao quadrado da distância que as separam.

Ao representarmos em um gráfico a força de interação elétrica em função da distância que separa duas cargas puntiformes, obtemos como resultado o gráfico de uma hipérbole, como indicado a seguir. Observe que ao duplicarmos a distância entre as cargas, a força diminui quatro vezes.

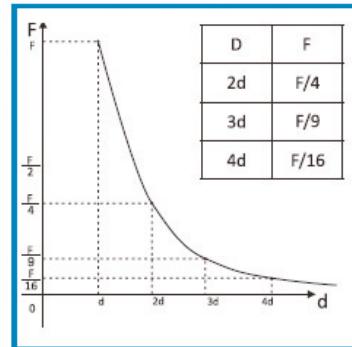


Gráfico 1 - Força de Interação Elétrica em Função da distância

Fonte: SENAI (2004, p. 15).

Comumente no estudo de eletricidade utilizamos grandezas físicas que podem ser representadas por números com ordem de grandeza muito elevada ou muito reduzida. Dessa forma, para evitarmos a escrita de um número muito grande ou muito pequeno, fazemos a utilização da notação científica que, para determinados valores, pode ser substituída por prefixos pré-determinados pelo Sistema Internacional de Unidades, como podemos verificar na tabela a seguir:

Prefixo SI	Símbolo	Fator multiplicador
Giga	G	$10^9 = 1000\,000\,000$
Mega	M	$10^6 = 1000\,000$
Quilo	k	$10^3 = 1000$
Mili	m	$10^{-3} = 0,001$
Micro	μ	$10^{-6} = 0,000\,001$
Nano	n	$10^{-9} = 0,000\,000\,001$
Pico	p	$10^{-12} = 0,000\,000\,000\,001$

Tabela 1 - Prefixos do SI

Exemplo

Dois cargas, $q_1 = 10 \mu\text{C}$ e $q_2 = 5 \mu\text{C}$, estão separadas pela distância de 20 cm no vácuo. Determine a intensidade da força que atua entre elas.

$$q_1 = 10 \mu\text{C}$$

$$q_2 = 5 \mu\text{C}$$

$$d = 0,20 \text{ m}$$

$$\text{vácuo} \rightarrow K_0 = 9 \cdot 10^9 \text{ Nm}^2/\text{C}^2$$

$$F = K \cdot \frac{q_1 \cdot q_2}{d^2}$$

$$F = 9 \cdot 10^9 \cdot \frac{10 \cdot 10^{-6} \cdot 5 \cdot 10^{-6}}{0,2^2}$$

Vamos para a próxima seção? Acompanhe!

1.4 CAMPO ELÉTRICO

Observe novamente a Figura 3 – Eletrização por atrito e atração em eletroscópio de pêndulo. Depois responda: como a esfera de isopor é capaz de perceber que a canaleta está eletrizada e, portanto, dessa forma ser atraída por ela?

Para responder a tal pergunta recorremos ao conceito de campo elétrico.

Campo elétrico é uma região dentro da qual uma carga elétrica qualquer fica sujeita a uma força.

Se você reproduzir essa experiência poderá observar que para atrair a esfera de isopor é necessário aproximar a canaleta a uma distância mínima. Se a distância que for mantida a canaleta for maior que essa distância mínima, o efeito do campo elétrico sobre a esfera é desprezível quando comparado a outras forças, como o peso, por exemplo, e dessa forma não observamos nenhum efeito nela. Porém observaremos que quanto mais próximos mantermos a canaleta da esfera, mais intensamente esta última será atraída.

Dessa forma podemos concluir que a força com que a esfera é atraída é devido à existência de cargas elétricas na canaleta plástica, validando assim o conceito de campo elétrico.

Um campo elétrico, do ponto de vista matemático, é definido pela relação entre a força que atua sobre uma carga de teste, que por convenção é positiva, e o valor da carga, expressa pela equação:

$$E = \frac{F}{q}$$

Sendo:

- E → intensidade do campo elétrico em um ponto do espaço em voltmetro ou newton/coulomb (V/m ou N/C);
- F → força que age em uma carga de teste, positiva por convenção, colocada no ponto em newton (N);
- q → carga de teste em coulomb (C).

Exemplo

Calcule a força que age em uma carga de $1 \mu\text{C}$ colocada em um ponto do espaço, em que o campo elétrico equivale a 600 V/m .

$$E = \frac{F}{q} \rightarrow F = E \cdot q \rightarrow F = 1 \cdot 10^{-6} \cdot 600 \rightarrow$$

$$F = 600 \cdot 10^{-6} \rightarrow F = 600 \mu\text{N}$$

DIREÇÃO DO VETOR CAMPO ELÉTRICO E LINHAS DE FORÇA

Quando dispomos de apenas uma carga elétrica pontual, o campo elétrico originado por essa carga é radial em torno dela, de forma que se a carga for positiva, o campo estará se afastando da carga (divergente), e se a carga for negativa, o campo estará se aproximando da carga (convergente), conforme você pode verificar na figura a seguir.

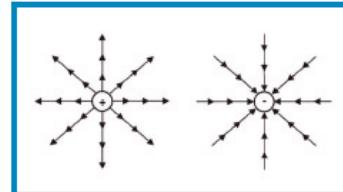


Figura 4 - Linhas de Campo Elétrico em Cargas Elétricas Pontuais (Distintas)

Quando temos duas ou mais cargas pontuais em uma mesma região a configuração das linhas de campo elétrico se dá de acordo com a figura a seguir.

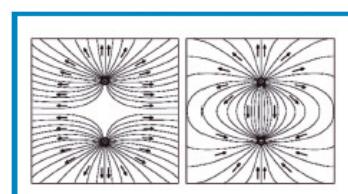


Figura 5 - Representação das Linhas de Campo para um Par de Cargas Elétricas Pontuais

Já vimos que para calcularmos o campo elétrico dividimos o valor da força de origem elétrica que surge sobre uma carga de prova. Se fizermos a substituição da força pela equação da Lei de Coulomb, obteremos:

$$E = \frac{F}{q} \rightarrow E = \frac{K \cdot q_1 \cdot q_2}{d^2} \rightarrow E = K \cdot \frac{q}{d^2}$$

Sendo:

- E → intensidade do campo elétrico em um ponto do espaço em voltmetro ou newton/coulomb (V/m ou N/C);
- q → carga de teste em coulomb (C);
- d → distância da carga ao ponto considerado em metros (m);
- K → constante eletrostática do meio (Nm^2/C^2).
Para o vácuo: $K = K_0 = 9 \cdot 10^9 \text{ Nm}^2/\text{C}^2$.

Exemplo

Determine o campo elétrico a 30 cm de uma carga puntiforme de 200nC no vácuo.

$$E = K \cdot \frac{q}{d^2} \rightarrow E = 9 \cdot 10^9 \cdot \frac{200 \cdot 10^{-9}}{(30 \cdot 10^{-2})^2} \rightarrow 2 \cdot 10^4 \text{ V/m}$$

DICA

Acessando o link a seguir você poderá simular situações que configuram várias cargas elétricas em um mesmo sistema, contendo as linhas de força (campo), traçado de superfícies equipotenciais no plano e em 3D, bem como a animação das mesmas, de acordo com a figura a seguir. <http://www.unb.br/iq/kleber/EaD/Eletromagnetismo/LinhasDeForca/LinhasDeForca.html> Vamos lá, acesse o site e amplie ainda mais seus conhecimentos!

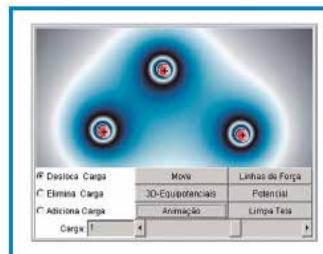


Figura 6 - Imagem de um Sistema com 3 Cargas Elétricas animando as Superfícies Equipotenciais em 3D. Fonte: Mundim (1999).

Você sabia?

O para-raios

Visto que uma descarga atmosférica se processa, preferencialmente, segundo o caminho mais curto entre a nuvem e a terra, pontos mais elevados em relação à superfície possuem maior probabilidade de receber a descarga. Assim, árvores, torres, colinas e prédios, por exemplo, são locais mais sujeitos à queda de um raio. Por essa razão, não é aconselhável se proteger debaixo de

uma árvore durante uma tempestade. Entretanto, ficar em campo aberto também é perigoso, pois o ponto mais alto, no caso, é a própria pessoa. Um lugar bastante seguro é no interior de um carro, que forma uma blindagem eletrostática. Uma construção de alvenaria, por causa da ferragem, também protege.

O para-raios foi inventado por Benjamim Franklin e se destina a proteger pessoas e edificações contra as descargas atmosféricas. Constitui-se de uma ponta metálica, que é colocada acima das construções que se pretende proteger, e um condutor metálico conecta essa ponta a uma haste metálica, que é solidamente aterrada (WOLSKI, 2007, p. 29).

Preparado para dar um mergulho no nosso próximo tema, potencial elétrico? Vamos lá, lembre-se sempre que estamos juntos nesta caminhada!

1.5 POTENCIAL ELÉTRICO

O potencial elétrico é uma grandeza escalar que está associada ao campo elétrico, e que, portanto, é também gerado por cargas elétricas, podendo assumir valores positivos e negativos.

$$V = K \cdot \frac{q}{d}$$

Sendo:

- V → potencial elétrico em volt (V);
- q → carga elétrica em coulomb (C);
- d → distância da carga ao ponto considerado em metros (m);
- K → constante eletrostática do meio (Nm^2/C^2).
Para o vácuo: $K = K_0 = 9 \cdot 10^9 \text{ Nm}^2/\text{C}^2$.

Podemos relacionar o campo elétrico e o potencial elétrico da seguinte maneira:

$$V = K \cdot \frac{q}{d^2} \rightarrow E \cdot d = K \cdot \frac{q}{d}$$

Mas,

$$V = K \cdot \frac{q}{d}, \text{ assim } \rightarrow V = E \cdot d$$

Vale ressaltar que essa equação apenas pode ser aplicada a um campo elétrico uniforme para a determinação da diferença de potencial ao longo de uma linha de força.

Exemplo

Determine o módulo e o sinal da carga que gera um potencial de -300V a uma distância de 10 cm, no vá-

cuo. Determine também a intensidade de campo elétrico nesse ponto.

$$V = K \cdot \frac{q}{d} \rightarrow q = \frac{V \cdot d}{K} \rightarrow q = \frac{-300 \cdot 10 \cdot 10^{-2}}{9 \cdot 10^9} \rightarrow q = -3,33 \cdot 10^{-9} C$$

$$V = E \cdot d \rightarrow E = \frac{V}{d} \rightarrow E = \frac{-300}{10 \cdot 10^{-2}} \rightarrow E = -3 \cdot 10^3 V/m$$

DIFERENÇA DE POTENCIAL

Como uma carga gera um potencial V_1 em um ponto distante d_1 , e um potencial V_2 em um ponto distante d_2 , então existe entre esses dois pontos uma diferença de potencial $V_1 - V_2$.

A diferença de potencial (ddp) entre dois corpos (ou dois pontos de um circuito elétrico) é também chamada de tensão elétrica.

Dependendo do valor da tensão elétrica, ela poderá ser reescrita utilizando-se prefixos do SI de acordo com a tabela a seguir:

Símbolos		Valor em relação à unidade	
Múltiplos	quilovolt	kv	$10^3 V$ ou $1000 V$
Submúltiplos	milivolt	mV	$10^{-3} V$ ou $0,001 V$
	microvolt	μV	$10^{-6} V$ ou $0,000001 V$
	nanovolt	ηV	$10^{-9} V$ ou $0,000000001 V$
	picovolt	ρV	$10^{-12} V$ ou $0,000000000001 V$

Tabela 2 - Múltiplos e Submúltiplos do Volt

Fonte: SENAI (2001, p. 29).

Comparando a um sistema hidráulico, diz-se que a tensão elétrica pode ser comparada ao desnível existente entre a caixa d'água e a torneira de onde a água sairá: quanto mais alta a caixa em relação à torneira, mais alta será a pressão que fará para sair. Pode-se dizer que a água é bombeada pela ação da gravidade, assim como os elétrons são bombeados pelo gerador (PARIZZI, 2003, p. 28).

Exemplo

Calcule a diferença de potencial entre dois pontos situados, respectivamente, a 25 e 30 cm de uma carga puntiforme de 40 nC.

$$V_1 = K \cdot \frac{q_1}{d_1} \rightarrow V_1 = \frac{9 \cdot 10^9 \cdot 40 \cdot 10^{-9}}{25 \cdot 10^{-2}} \rightarrow V_1 = 1440V$$

$$V_2 = K \cdot \frac{q_2}{d_2} \rightarrow V_2 = \frac{9 \cdot 10^9 \cdot 40 \cdot 10^{-9}}{30 \cdot 10^{-2}} \rightarrow V_2 = 1200V$$

$$V_{12} = V_1 - V_2 \rightarrow V_{12} = 1440 - 1200 \rightarrow V_{12} = 240V$$

1. **Halo:** Círculo ou arco luminoso, branco ou prismaticamente colorido, ao redor ou diante de um corpo luminoso

Você sabia?

Efeito Corona

Nas linhas de transmissão de alta tensão, o campo elétrico é tão intenso que a rigidez dielétrica do ar é rompida nas proximidades dos condutores. Como a tensão é alternada, ou seja, inverte e varia rapidamente o tempo todo, as moléculas de ar são rompidas e recombinações em seguida, à razão de 120 vezes por segundo. Isso produz um zumbido característico, que pode ser ouvido nas proximidades das linhas. Sob certas condições, a recombinação das moléculas do ar produz a emissão de luz, que forma um halo¹ azulado em torno dos fios. Esses fenômenos são chamados de efeito Corona e pode ser, portanto, audível e/ou visível. O efeito Corona representa uma parcela das perdas que ocorrem nas linhas de transmissão (WOLSKI, 2007, p. 33).

Que tal agora pegarmos uma carona rumo à capacitação e aos capacitores? Acompanhe!

1.6 CAPACITÂNCIA E CAPACITORES

Segundo Batista ([200-?]), um capacitor consiste de dois condutores separados por um isolante. A principal característica de um capacitor é a sua capacidade de armazenar carga elétrica (acumular eletricidade, isto é, acumular elétrons), com cargas negativas e positivas no dielétrico, junto às placas. Acompanhando essa carga está a energia que um capacitor pode liberar. Veja a seguir a figura de um capacitor.



Figura 7 - Capacitor

Ao submeter o capacitor a uma d.d.p., suas placas, que inicialmente estavam em equilíbrio eletrostático, adquirem cargas elétricas de sinais opostos, conforme a figura a seguir.

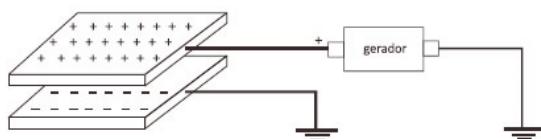


Figura 8 - Capacitor Plano de Placas Paralelas
Fonte: Parizzi (2003, p. 57).

Ao ligar a fonte de tensão nos terminais do capacitor, as placas, inicialmente neutras, começam a se carregar. Há um movimento dos elétrons da placa onde é ligado o terminal positivo (+) da fonte para a placa onde está ligado o negativo (-) da fonte. Dessa forma, uma placa ficará com cargas positivas e a outra com cargas negativas. Se a fonte for retirada, o capacitor continuará carregado, pois não há caminho para os elétrons retornarem. Esse processo é chamado de carga de capacitor. O capacitor nessas condições está com o mesmo potencial da fonte que o carregou.

CAPACITÂNCIA

Propriedade elétrica dos capacitores relacionada com a capacidade de armazenamento de cargas elétricas, cujo valor pode ser determinado pela equação:

$$C = \frac{q}{V}$$

Sendo:

C → capacidade em farads (F);
q → carga elétrica em coulomb (C);
V → tensão em volts (V).

Como um farad é uma unidade extremamente grande, comumente são usados os submúltiplos dessa unidade, veja:

Unidade	Submúltiplo	Notação
Farad	μF	10^{-6}F
	nF	10^{-9}F
	pF	10^{-12}F

Tabela 3 - Submúltiplos da Unidade Farad

Em um capacitor de placas paralelas, a sua capacidade é dada pela equação:

$$C = \epsilon \frac{A}{d}$$

Sendo:

- C → capacidade em farads (F);
- A → área de cada placa em metros cúbicos (m^2);
- d → distância entre as placas em metros (m);
- ϵ → permissividade do dielétrico, cujo valor no vácuo (ϵ_0) é, aproximadamente, $8,9 \cdot 10^{-12} \text{ F/m}$.

Exemplo

Qual é a capacidade de um condutor que, recebendo uma carga de $12 \mu\text{C}$, adquire potencial de 2.000 V?

$$C = \frac{q}{V} \rightarrow C = \frac{12 \cdot 10^{-6}}{2000} \rightarrow C = 6 \cdot 10^{-9} \text{ F} \rightarrow C = 6 \text{ nF}$$

Exemplo

Determine a capacidade de um capacitor constituído por duas placas paralelas cuja área é de $0,02 \text{ m}^2$, separadas por uma distância de 2 cm.

$$C = \epsilon_0 \frac{A}{d} \rightarrow C = 8,9 \cdot 10^{-12} \cdot \frac{2 \cdot 10^{-2}}{2 \cdot 10^{-2}} \rightarrow C = 8,9 \cdot 10^{-12} \text{ F} \rightarrow C = 8,9 \text{ pF}$$

TIPOS DE CAPACITORES QUANTO AO DIELÉTRICO

Dielétrico, como o próprio nome diz, é um isolante que faz a isolação entre as placas do capacitor. O tipo do dielétrico em geral é a principal característica construtiva de um capacitor. É o dielétrico quem define as características como tensão máxima de trabalho e tamanho físico de um capacitor, conforme você pode acompanhar na tabela a seguir.

Material	Rigidez dielétrica (kV/m)
Ar	3000
Porcelana	7000
Teflon	60000
Vidro	90000
Mica	200000

Tabela 4 - Tensão Máxima de Trabalho e tamanho Físico de um Capacitor

Fonte: Wolski (2007, p. 30).

Os capacitores, quanto ao seu dielétrico, podem ser de cinco tipos.

••**De cerâmica:** dielétricos de cerâmica geralmente são capacitores de pequena capacidade.



Figura 9 - Capacitor de CerâmicaFonte: Parizzi (2003, p. 59).

••De poliéster: dielétricos de poliéster são de capacâncias pequenas ou médias e para tensões médias ou elevadas.



Figura 10 - Capacitor de PoliésterFonte: Parizzi (2003, p. 59).

••A óleo: dielétricos de papel embebido em óleo isolante em geral são capacitores para altas tensões.



Figura 11 - Capacitor a ÓleoFonte: Parizzi (2003, p. 60).

••Capacitor eletrolítico: dielétricos de papel embebido em solução dielétrica isolante (evolução do capacitor a óleo) são capacitores polarizados, ou seja, não podem ser ligados de forma invertida. Sempre há uma indicação da polaridade em seu corpo.

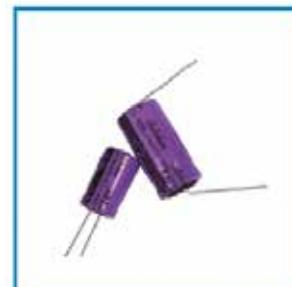


Figura 12 - Capacitor EletrolíticoFonte: Parizzi (2003, p. 60).

••Capacitor a ar: capacitores de sintonia de rádios antigos são placas rígidas e móveis presas a um eixo, que se encaixam em outras fixas sem tocá-las.



Figura 13 - Capacitor de Placas Paralelas Móveis (Ajustável Tipo Am – Fm)Fonte: Parizzi (2003, p. 60).

ASSOCIAÇÃO DE CAPACITORES EM SÉRIE

Na associação em série de capacitores, a capacância equivalente (C_{eq}) é sempre menor que o menor dos capacitores da associação, e pode ser calculada pela equação:

$$\frac{1}{C_{eq}} = \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} + \frac{1}{C_3} \dots C_{eq} = \frac{C_1 \cdot C_2 \cdot C_3}{C_1 + C_2 + C_3}$$

A diminuição se dá, pois, quando se associam capacitores em série. Há um aumento da distância que separa as placas positivas das negativas.

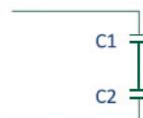


Figura 14 - Associação em Série de CapacitoresFonte: Parizzi (2003, p. 67).

ASSOCIAÇÃO DE CAPACITORES EM PARALELO

Na associação em paralelo de capacitores, a capacância equivalente é igual à soma das capacâncias de todos os capacitores em paralelo, pois, neste caso, as áreas das placas dos capacitores se somam, e pode ser calculada pela equação:

$$C_{eq} = C_1 + C_2 + C_3 \dots$$

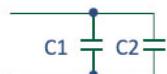


Figura 15 - Associação em Paralelo de CapacitoresFonte: Parizzi (2003, p. 65).

APLICAÇÃO DOS CAPACITORES

Os capacitores são utilizados para:

- isolas corrente contínua e conduzir corrente alternada (capacitor de bloqueio);
 - reduzir flutuação de tensão e de corrente (capacitor de filtro em uma fonte de alimentação);
 - eliminar interferências;
 - reduzir as defasagens entre tensão e corrente (aumentar o fator de potência);
 - partida de motores;
 - circuitos ressonantes na telecomunicação e outros.

Com este assunto concluímos aqui a primeira unidade de estudos desta Unidade Curricular. Percorremos agora pelo tema eletrodinâmica. E por falar nisso, você já ouviu falar em força eletromotriz, resistência elétrica, circuitos elétricos simples? Sim, não? Ficou curioso? Continue seus estudos e confira o que preparamos para você!

2. Eletrodinâmica

2.1 FORÇA ELETROMOTRIZ

Ao fazermos uma conexão elétrica entre dois corpos que apresentam uma diferença de potencial, ocorre naturalmente um fluxo de cargas, de modo que em um intervalo muito curto de tempo ocorre o equilíbrio dos potenciais.

Para que esse fluxo de cargas se mantenha por meio de um condutor a reposição das cargas elétricas que se deslocam de um corpo para outro é necessária. O mecanismo responsável por repor essas cargas é denominado força eletromotriz (fem).

Força eletromotriz é a energia que promove o deslocamento de cargas no interior da fonte, repondo as cargas em seus terminais e mantendo a diferença de potencial constante por um longo período (WOLSKI, 2007, p. 39).

A unidade da fem também é o volt (V), e o instrumento que mede a fem e a ddp é o voltímetro.

Na escolha do voltímetro para realizar uma medição, é necessário:

- saber se a tensão a ser medida é produzida por uma fonte de corrente contínua (pilha, bateria, fonte retificadora eletrônica, gerador) ou de corrente alternada (rede elétrica de residências, lojas, indústrias, etc.). Os voltímetros adequados para medir tensões em corrente contínua têm gravado, em local visível (normalmente próximo à escala), o símbolo  ou "DC". Os voltímetros adequados para medir tensões em corrente alternada têm gravado o símbolo  ou "AC".

Os voltímetros que servem para medir tensões tanto em corrente alternada como em corrente contínua têm gravado o símbolo "AC/DC";

- saber os valores mínimo e máximo que poderão ter a medida a ser feita, para definir a capacidade do instrumento a ser utilizado, ou seja, definir a sua escala de leitura.

Outro detalhe a ser observado é a posição de uso do instrumento, que também é indicada por meio de símbolos impressos:  quando o instrumento for para uso na posição vertical, ou  quando o instrumento for para uso na posição horizontal.

É importante ressaltar que existe um instrumento chamado multímetro, que além de medir a ddp, também é capaz de medir corrente elétrica, resistência elétrica, capacidade e outras mais, de acordo com o modelo.

Existem, basicamente, dois tipos de voltímetros:
Analógico - com ponteiro sobre a escala
Digital - os números aparecem em um visor eletrônico.

Conheça os dois modelos na figura a seguir.



Figura 16 - Multímetro Analógico e Multímetro Digital

Fonte: Minipa (2009).

E a corrente elétrica, o que é mesmo? Vamos conhecê-la juntos!

2.2 CORRENTE ELÉTRICA

A corrente elétrica nada mais é do que o movimento de forma ordenada de cargas elétricas em um condutor ocorrido devido à existência de uma ddp.

Para se estabelecer essa ddp entre dois pontos de um condutor, e fazer surgir a corrente elétrica, utilizar-se-á um gerador, como por exemplo, uma pilha ou bateria.

- Sentido real do movimento de cargas: os elétrons são as cargas que se movimentam, veja na figura a seguir.

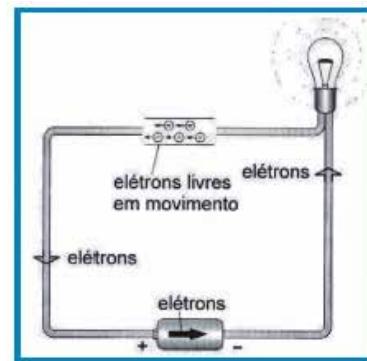


Figura 17 - Sentido Real do Movimento das Cargas

▪ Sentido convencional da corrente elétrica: sentido convencionado do movimento de cargas, ou seja, do ponto mais positivo (pólo positivo) para o ponto mais negativo (pólo negativo).

Figura 18 - Sentido da Corrente Elétrica
Fonte: Parizzi (2003, p. 30).

O instrumento utilizado para medir a corrente elétrica é o amperímetro, que pode ser do tipo digital ou analógico, podendo ter diversos formatos, variando de um fabricante para outro. O mais recomendado e utilizado é o do tipo alicate, pois não requer que o circuito seja aberto para se fazer a medição, basta envolver a fiação com o anel do alicate. Veja um modelo de alicate amperímetro na figura a seguir.

Figura 19 - Alicate Amperímetro
Fonte: Minipa (2009).

EFEITOS DA CORRENTE ELÉTRICA

Quando a corrente elétrica percorre um condutor elétrico, ela pode produzir os seguintes efeitos:

•efeito térmico ou efeito Joule – a passagem da corrente elétrica por um condutor produz neste um aquecimento. Esse fenômeno é chamado de efeito térmico ou efeito Joule e acontece porque durante o movimento dos elétrons no interior do condutor ocorrem constantes choques entre eles, transformando a maior parte da energia cinética em calor, provocando dessa forma o aumento de temperatura do condutor. Este efeito é a base de funcionamento de vários aparelhos: chuveiro elétrico, secador de cabelos, aquecedor de ambiente, ferro elétrico, etc.;

•efeito luminoso – em determinadas condições, a passagem da corrente elétrica por meio de um gás raro feito faz com que ele emita luz. As lâmpadas fluorescentes e os anúncios luminosos são aplicações deste efeito. Neles há a transformação direta de energia elétrica em energia luminosa;

•efeito magnético – um condutor percorrido por uma corrente elétrica cria um campo magnético na região próxima a ele. Este é um dos efeitos mais importan-

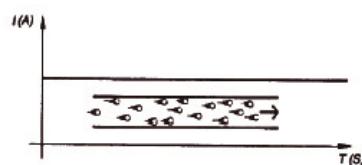
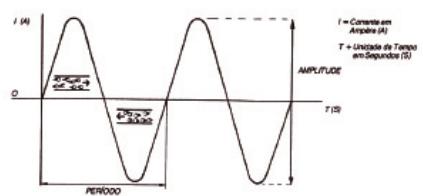
tes, constituindo a base do funcionamento dos motores, transformadores, relés, etc.;

•efeito químico – uma solução eletrolítica sofre decomposição quando é atravessada por uma corrente elétrica. É a eletrólise. Este efeito é utilizado, por exemplo, no revestimento de metais: cromagem, niquelação, etc.;

•efeito fisiológico – ao percorrer o corpo de um animal, a corrente elétrica provoca a contração dos músculos, causando a sensação de formigamento e dor, proporcional à intensidade da corrente, podendo chegar a provocar queimaduras, perda de consciência e parada cardíaca. Esse efeito é conhecido como choque elétrico.

TIPOS DE CORRENTE ELÉTRICA

Existem dois tipos de corrente elétrica: a corrente contínua (CC) (geralmente utilizada em circuitos eletrônicos), cuja intensidade é constante e sempre no mesmo sentido; e a corrente alternada (CA) (geralmente utilizada pelos sistemas residenciais, industriais), cuja intensidade varia senoidalmente no tempo e com sentido invertido periodicamente. Acompanhe nas figuras a seguir.

Gráfico 2 - Corrente Contínua ao Longo do Tempo
Fonte: Vieira Júnior (2004, p. 8).Gráfico 3 - Corrente Alternada ao Longo do Tempo
Fonte: Vieira Júnior (2004, p. 8).

INTENSIDADE DA CORRENTE ELÉTRICA

A intensidade da corrente elétrica nos indica a quantidade de carga elétrica que atravessa a seção transversal de um condutor a cada segundo, sendo determinada pela equação:

$$i = \frac{\Delta Q}{\Delta t}$$

Sendo:

- $i \rightarrow$ intensidade da corrente elétrica em ampère (A);
 $\Delta Q \rightarrow$ quantidade de cargas em coulomb (C);
 $\Delta t \rightarrow$ intervalo de tempo em segundos (s).

Exemplo

Determine a quantidade de elétrons que passam por uma seção transversal a cada segundo quando o condutor conduz uma corrente de 3 A.

$$i = \frac{\Delta Q}{\Delta t} \rightarrow \\ \rightarrow \Delta Q = i \cdot \Delta t \\ \rightarrow \Delta Q = 3 \cdot 1 \\ \rightarrow \Delta Q = 3C$$

Sendo $\Delta Q = n \cdot e$

$$\rightarrow n = \frac{\Delta Q}{e} \rightarrow n = \frac{3}{1,6 \cdot 10^{-19}} \rightarrow \\ n = 1,875 \cdot 10^{19} \text{ elétrons} \\ 1875000000000000000000000$$

Vamos para a próxima seção? Acompanhe!

Conheça a seguir a tabela de múltiplos e submúltiplos do ampère.

Símbolo		Valor em relação à Unidade	
Múltiplos	quiloampere	kA	10^3 A ou 100 A
Submúltiplos	miliampere	mA	10^{-3} A ou 0,001 A
	microampere	µA	10^{-6} A ou 0,000001 A
	nano ampère	nA	10^{-9} A ou 0,000000001 A
	picoampere	pA	10^{-12} A ou 0,000000000001 A

Tabela 5 - Múltiplos e Submúltiplos do Ampère

Fonte: SENAI (2001, P. 41).

Exemplo

Determine a intensidade da corrente elétrica em um condutor, sabendo que nele passam 300 μ C de carga em uma seção transversal, a cada 200 μ s.

$$i = \frac{\Delta Q}{\Delta t} \rightarrow i = \frac{300 \cdot 10^{-6}}{200 \cdot 10^{-6}} \rightarrow i = 1,5A$$

2.3 RESISTÊNCIA ELÉTRICA

Resistência elétrica é a dificuldade que os elétrons encontram para percorrer um circuito elétrico, ou

seja, é a oposição que um material apresenta ao fluxo de corrente elétrica. A resistência elétrica pode ser calculada e sua unidade de medida é o ohm, representada pela letra grega Ω (lê-se ômega). Assim como outras grandezas, também são muito utilizados os múltiplos e submúltiplos do ohm.

Conheça na figura a seguir o símbolo da resistência elétrica.

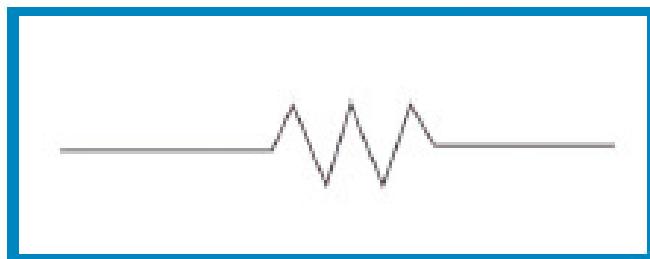


Figura 20 - Símbolo de Resistência Elétrica. Fonte: Parizzi (2003, p. 39).

A resistência elétrica depende do material que constitui o condutor, do comprimento desse condutor e da área da seção do condutor, e pode ser determinada pela equação:

$$R = \rho \frac{l}{A}$$

Sendo:

- R \rightarrow resistência elétrica do condutor em ohm (Ω);
- ρ \rightarrow resistividade do material que constitui o condutor ($\Omega \cdot m$);
- l \rightarrow comprimento do condutor em metros (m);
- A \rightarrow área da seção transversal do condutor em metros cúbicos (m^2).

Observando com atenção a equação podemos perceber que quanto maior for o comprimento do condutor, maior será a sua resistência, ao passo que quanto maior a área da seção transversal, menor será a sua resistência.

Pelo fato de cada material que existe na natureza ter um átomo diferente dos demais materiais, é fácil compreender que cada um se comporta de maneira única em relação à passagem da corrente elétrica devido à sua estrutura atômica. Isso implica em diferentes valores de resistência específica para diferentes materiais, confira na tabela a seguir.

Material		ρ (Ωm)	ρ ($\Omega\text{mm}^2/\text{m}$)	α ($^{\circ}\text{C}^{-1}$)
		Para $T = 20^{\circ}\text{C}$	Para $T = 20^{\circ}\text{C}$	
Metais	Alumínio	$2,8 \times 10^{-8}$	0,028	$3,2 \times 10^{-3}$
	Chumbo	21×10^{-8}	0,21	$4,2 \times 10^{-3}$
	Cobre	$1,72 \times 10^{-8}$	0,0172	$3,9 \times 10^{-3}$
	Ferro	$9 \text{ a } 15 \times 10^{-8}$	0,09 a 0,15	$5,0 \times 10^{-3}$
	Mercúrio	$95,8 \times 10^{-8}$	0,958	$0,92 \times 10^{-3}$
	Platina	$10,8 \times 10^{-8}$	0,108	$3,8 \times 10^{-4}$
	Prata	$1,6 \times 10^{-8}$	0,016	$4,0 \times 10^{-3}$
	Tungstênio	$5,2 \times 10^{-8}$	0,052	$4,5 \times 10^{-3}$
Ligas Metálicas	Constantan	50×10^{-8}	0,50	$(0,4 \text{ a } 0,1) \times 10^{-4}$
	Latão	8×10^{-8}	0,08	15×10^{-4}
	Manganina	42×10^{-8}	0,42	$(0 \text{ a } 0,3) \times 10^{-4}$
	Níquel-cromo	100×10^{-8}	1,00	$1,7 \times 10^{-4}$
	Niquelina	42×10^{-8}	0,42	$2,3 \times 10^{-4}$
Semicondutores	Fe_3O_4	0,01	10^4	
	Germânico	0,47	47×10^4	
	Grafite	0,004 a 0,007	$(0,4 \text{ a } 0,7) \times 10^{-4}$	
	Silicio	3000	3×10^9	
Isolantes	Ebonite	$10^{13} \text{ a } 10^{16}$		
	Marmore	$10^7 \text{ a } 10^9$		
	Mica	$10^{13} \text{ a } 10^{15}$		
	Vidro	$10^{10} \text{ a } 10^{11}$		

Tabela 6 - Resistividades e Coeficiente de Temperatura para Diferentes Tipos de Materiais

Fonte: SENAI (2004, P. 48).

Exemplo

Determine a resistência de um condutor de cobre com 30 m de comprimento e $0,5 \text{ mm}^2$ de seção transversal à temperatura de 20°C .

$$R = p \frac{I}{A} \rightarrow R = 0,0172 \cdot \frac{30}{5 \cdot 10^{-7}} \rightarrow R = 1,032 \cdot 10^6 \Omega \rightarrow R = 1,032 M\Omega$$

Exemplo

Determine o comprimento necessário para que um fio de níquel-cromo de seção 1 mm^2 apresente uma resistência de 10Ω .

$$R = p \frac{I}{A} \rightarrow I = \frac{RA}{p} \rightarrow I \cdot \frac{10 \cdot 1 \cdot 10^{-6}}{100 \cdot 10^{-8}} \rightarrow I = 1,0 \text{ m}$$

DICA

Realize uma pesquisa para verificar como a resistência é influenciada pela temperatura e como se calcula o valor de uma resistência em uma dada temperatura. Faça os registros de sua pesquisa em seu caderno.

A nossa caminhada em busca de novos conhecimentos continua! Que tal percorrermos agora os trilhos que nos levam aos resistores e associação de resistores? Vamos em frente!

2. 4 RESISTORES E ASSOCIAÇÕES DE RESISTORES

É um dispositivo que transforma toda a energia elétrica consumida integrante em calor, como por exemplo, os aquecedores, o ferro elétrico, o chuveiro elétrico, a lâmpada comum e os fios condutores em geral.

Classificamos os resistores em dois tipos: fixos e variáveis. Os resistores fixos são aqueles cujo valor da resistência não pode ser alterada, enquanto que os variáveis têm a sua resistência modificada dentro de uma faixa de valores por meio de um cursor móvel. Veja alguns exemplos na figura a seguir.



Figura 21 - Resistor Metálico de um Chuveiro e Resistor de Carbono
Fonte: SENAI (2004, p. 56). Identificação de resistores por código de cores

Você sabia que existe um código de cores para a leitura do valor de um resistor?

Sim, e ele está representado na tabela a seguir, sendo que a primeira faixa corresponde ao primeiro algarismo, a 2^a faixa ao segundo, a 3^a faixa ao número de zeros que segue os algarismos e a 4^a faixa à tolerância percentual máxima para o valor indicado no componente.

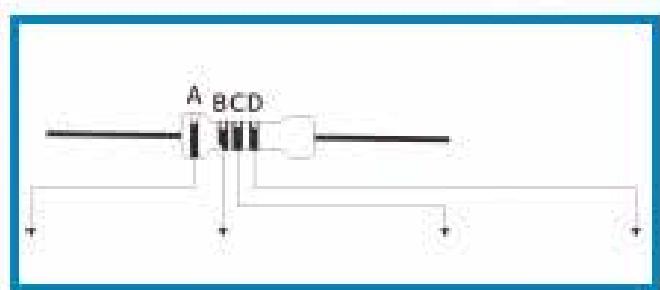


Figura 22 - Identificação de Resistores por Código de Cores

Fonte: Saturnino ([200-?], p. 32).

Cor	1º algarismo	2º algarismo	Fator multiplicativo	Tolerância
Preto	-----	0	x 1	-----
Marron	1	1	x 10 ¹	± 1%
Vermelho	2	2	x 10 ²	± 2%
Laranja	3	3	x 10 ³	-----
Amarelo	4	4	x 10 ⁴	-----
Verde	5	5	x 10 ⁵	-----
Azul	6	6	x 10 ⁶	-----
violeta	7	7	-----	-----
Cinza	8	8	-----	-----
Branco	9	9	-----	-----
Ouro	-----	-----	x 10 ⁻¹	± 5%
Prata	-----	-----	x 10 ⁻²	± 10%

Tabela 7 - Identificação de Resistores por Código de Cores

Fonte: Saturnino ([200-?], P. 32).

Para ler um resistor com cinco faixas:

- 1^a faixa – algarismo significativo;
- 2^a faixa – algarismo significativo;
- 3^a faixa – algarismo significativo;
- 4^a faixa – número de zeros;
- 5^a faixa – tolerância.

Para ler um resistor com seis faixas:

- 1^a faixa – algarismo significativo;
- 2^a faixa – algarismo significativo;
- 3^a faixa – algarismo significativo;
- 4^a faixa – número de zeros;
- 5^a faixa – tolerância;
- 6^a faixa – temperatura.

Exemplo

Um resistor com as cores abaixo:

1^a marrom – 1

2^a preto – 0

3^a amarelo – 4 → 10 x 10⁴ (ou quatro zeros)

4^a ouro – 5%

$$R = 100 \text{ K}\Omega \pm 5\% \text{ ou } R = 100000 \Omega \pm 5\%$$

Exemplo

Identificar o valor de cada um dos resistores, cujas faixas coloridas na sequência são:

a. vermelho, vermelho, laranja, dourado.

$$R = 22 \cdot 10^3 \Omega \pm 5\% \text{ } R = 22 \text{ k}\Omega \pm 5\%$$

b. marrom, cinza, verde.

$$R = 18 \cdot 10^5 \Omega \pm 20\% \text{ } R = 1,8 \text{ M}\Omega \pm 20\%$$

c. amarelo, violeta, dourado, prateado.

$$R = 47 \cdot 10^{-1} \Omega \pm 10\% \text{ } R = 4,7 \Omega \pm 10\%$$

DICA

Realize uma pesquisa para verificar como é o princípio de funcionamento dos reostatos e potenciômetros, e onde são utilizados, registrando os seus resultados em seu caderno.

ASSOCIAÇÃO DE RESISTORES

Os resistores entram na constituição da maioria dos circuitos elétricos, formando associações de resistores. Por isso, é importante que você conheça os tipos e as características elétricas dessas associações, pois elas são a base de qualquer atividade ligada à eletroeletrônica.

Na associação de resistores é preciso considerar duas coisas: os terminais e os nós. Os terminais são os pontos da associação conectados à fonte geradora. Os nós são os pontos em que ocorre a interligação de dois ou mais resistores. **Associação em série**

Neste tipo de associação os resistores são interligados de forma que exista apenas um caminho para a circulação da corrente elétrica entre os terminais.



Figura 23 - Circuito com quatro Lâmpadas associadas em Série e percorridas por uma mesma Corrente Elétrica

Fonte: SENAI (2004, p. 58). Nota: se uma lâmpada queimar, todas se apagam.

Características da associação em série:

■■a intensidade da corrente i é a mesma em todos os resistores, pois eles estão ligados um após o outro;

$$i_T = i_1 = i_2 = i_3 \dots$$

■■a tensão V na associação é igual à soma das tensões em cada resistor.

$$V_T = V_1 + V_2 + V_3 \dots$$

Você pode calcular a resistência do resistor equivalente da associação, da seguinte forma:

$$R_T = R_1 + R_2 + R_3 \dots$$

Exemplo

Determine a resistência equivalente do circuito.

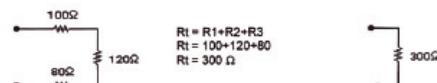


Figura 24 - Resolução de Resistência equivalente em Série

Fonte: Batista ([200-?], p. 48).

ASSOCIAÇÃO EM PARALELO

Uma associação de resistores é denominada de paralela quando os resistores que a compõem estão interligados de forma que exista mais de um caminho para a circulação da corrente elétrica entre seus terminais.

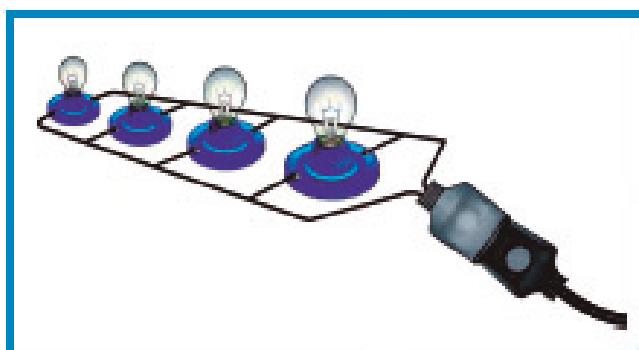


Figura 25 - Circuito com quatro Lâmpadas Associadas em Paralelo e Submetidas à mesma ddp

Fonte: SENAI (2004, p. 61). Nota: se uma lâmpada queimar, as outras permanecem acesas.

Características da associação em paralelo:

■■a tensão V é a mesma em todos os resistores, pois estão ligados aos mesmos terminais A e B;

$$V_T = V_1 = V_2 = V_3 \dots$$

■■a corrente i na associação é igual à soma das correntes em cada resistor.

$$i_T = i_1 + i_2 + i_3 \dots$$

Você pode calcular a resistência do resistor equivalente da associação, da seguinte forma:

$$\frac{1}{R_T} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3} \dots$$

Ou

$$R_T = \frac{R_1}{R_1} + \frac{R_2}{R_2} + \frac{3}{R_3}$$

Exemplo

Determine a resistência equivalente do circuito.

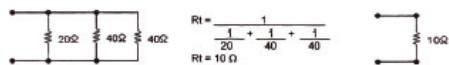


Figura 26 - Resolução de Resistência Equivalente em Paralelo

Fonte: Batista ([200-?], p. 49).

ASSOCIAÇÃO MISTA

É aquela na qual você encontra, ao mesmo tempo, resistores associados em série e em paralelo. A determinação do resistor equivalente final é feita a partir da substituição de cada uma das associações, em série ou em paralelo, que compõem o circuito pela sua respectiva resistência equivalente. Acompanhe a figura a seguir!

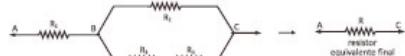


Figura 27 - Associação Mista de Resistências

Fonte: SENAI (2004, p. 64).

Exemplo

Determine a resistência equivalente do circuito a seguir:

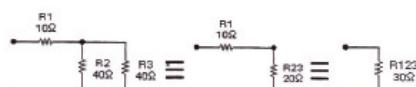


Figura 28 - Resolução de Associação Mista de Resistências

Fonte: Batista ([200-?], p. 50).

Vamos para a próxima seção? Acompanhe!

2.5 CIRCUITOS ELÉTRICOS SIMPLES (CC)

Um circuito elétrico consiste em um caminho para a corrente elétrica.

Você sabe o que é necessário para ser um circuito elétrico?

Para ser caracterizado como um circuito elétrico é necessário que o caminho para a corrente elétrica contenha no mínimo:

• uma fonte de força eletromotriz;

• uma carga, que pode ser uma resistência, uma lâmpada, um motor ou qualquer outro dispositivo que absorva energia;

• condutores que interliguem os componentes e que permitam a passagem da corrente;

• dispositivo de controle para interromper o circuito, que pode ser um interruptor, disjuntor, etc.

É importante destacar que por meio do dispositivo de controle, o circuito poderá estar fechado ou aberto.

Acompanhe no quadro a seguir os principais elementos dos circuitos elétricos e seus símbolos!

Elementos	Símbolos
Amperímetro	(A)
Chave interruptora	—/—
Condutor	—
Cruzamento com conexão	+
Cruzamento sem conexão	+
Fonte, gerador ou bateria	— —
Lâmpada	(○)
Resistor	—□—
Voltímetro	(V)

Quadro 1 - Principais elementos dos circuitos elétricos e seus símbolos correspondentes

Fonte: SENAI (2001, p. 73).

Veja na imagem a seguir o exemplo de um circuito simples simbolizando três lâmpadas em série.

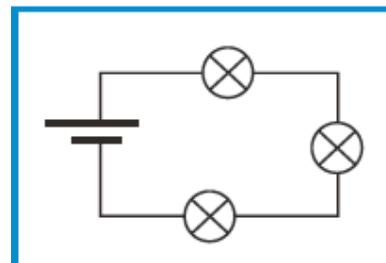


Figura 29 - Circuito Simples com 3 Lâmpadas em Série

Fonte: Batista ([200-?], p. 48).

LEI DE OHM

A **Lei de Ohm** é a lei básica da eletricidade e eletrônica e seu conhecimento é fundamental para o estudo e a compreensão dos circuitos elétricos.

Estudando a corrente elétrica que circula nos resistores, Georg Simom Ohm determinou experimentalmente a relação entre a diferença de potencial nos terminais de um resistor e a intensidade da corrente nesse resistor.

A intensidade da corrente que passa por um resistor é diretamente proporcional à diferença de potencial entre os terminais do resistor. A constante de proporcionalidade é a resistência do resistor.

Essa relação pode ser expressa pela equação:

$$R = \frac{V}{i}$$

Sendo:

- R → resistência elétrica do condutor em ohm (Ω);
- V → força eletromotriz aplicada à resistência, ou tensão elétrica em volt (V);
- i → corrente elétrica em ampère (A).

Você também pode analisar a Lei de Ohm por meio de gráficos, veja a seguir um exemplo.

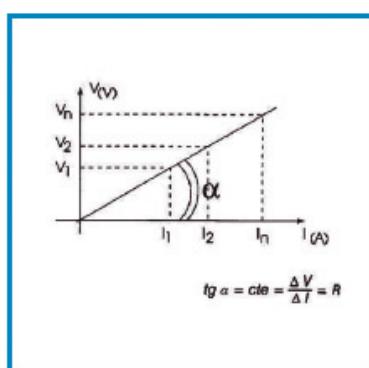


Gráfico 4 - Representativo da Lei de Ohm

Fonte: Parizzi (2003, p. 42).

Exemplo

Em uma lanterna, uma lâmpada utiliza uma alimentação de 6 V e tem 36 Ω de resistência. Qual é a corrente consumida pela lâmpada quando estiver ligada?

$$i = \frac{V}{R} \rightarrow i = \frac{6}{36} \rightarrow i = 0,166A$$

Exemplo

O motor de um carrinho de autorama atinge a rotação máxima quando recebe 9 V da fonte de alimentação. Nessa situação a corrente do motor é de 230 mA.

Qual é a resistência do motor?

$$i = \frac{V}{R} \rightarrow R = \frac{9}{0,23} \rightarrow R = 39,1\Omega$$

Exemplo

Dado o circuito a seguir, determine a corrente total que circula nele.

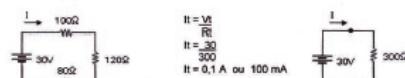


Figura 30 - Determinação de Corrente Total em Circuito

Fonte: Batista ([200-?], p. 48).

Exemplo

Dado o circuito a seguir, determine a corrente total que circula nele.

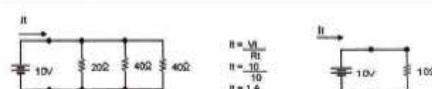


Figura 31 - Determinação de Corrente Total em Circuito

Fonte: Batista ([200-?], p. 49).

POTÊNCIA ELÉTRICA

A maior parte dos equipamentos, dispositivos e máquinas elétricas necessita que a potência seja especificada no projeto ou na aquisição, por isso a potência elétrica é uma grandeza muito importante na eletricidade.

Mas o que é potência elétrica?

Define-se a potência elétrica como sendo a grandeza que relaciona o trabalho elétrico realizado com o tempo necessário para sua realização. Enfim, potência elétrica é a capacidade de realizar um trabalho na unidade de tempo, a partir da energia elétrica.

A potência elétrica pode ser expressa pela equação:

$$P = \frac{W}{\Delta t}$$

Sendo:

- P → potência elétrica em joule por segundo (J/s);
- W → energia transformada no equipamento elétrico em joules (J);
- Δt → intervalo de tempo em segundos (s).

A unidade joule/segundo é conhecida também como watt (W) e corresponde à potência quando está sendo realizado um trabalho de 1 joule em cada segundo. Assim, se uma determinada máquina fizesse um trabalho de 30 joules em 10 segundos, seria gasto na razão de 3 joules por segundo, e, portanto, a potência seria de 3 watts.

Confira a seguir a tabela de múltiplos e submúltiplos do watt.

Símbolo	Valor em relação à unidade	
Múltiplo	quilowatt	kW
Unidade	watt	W
Submúltiplos	miliwatt	mW
	microwatt	μW
		10^{-3} W ou 0,001 W
		10^{-6} W ou 0,000001 W

Tabela 8 - Múltiplos e Submúltiplos do Watt

Fonte: SENAI (2001, p. 83).

Quando temos um aparelho sob uma tensão constante e consumindo uma corrente elétrica, podemos calcular a potência elétrica desse aparelho por meio da seguinte equação:

$$P = V \cdot i$$

Sendo:

- P → potência elétrica em watts (W);
- V → tensão elétrica em volt (V);
- i → corrente elétrica em ampère (A).

Conhecer a potência total instalada é muito útil para o projeto da instalação predial de uma residência, afinal, as tomadas, os fios e os disjuntores deverão suportar as correntes drenadas pelos aparelhos. Veja na tabela a seguir os dados de normalização de fios pela ABNT NBR 6148.

Bitola do fio (mm ²)	Corrente máxima (A)
1,5	15
2,5	21
4,0	28
6,0	36
10	50
16	68
25	89
35	111
50	134
70	171
90	205

Tabela 9 - Capacidade de Condução do Condutor em Função da Bitola

Fonte: Batista ([200-?], p. 73).

A partir da equação anterior e da Lei de Ohm podemos deduzir outras duas equações que relacionam a potência com a resistência, tensão ou corrente elétrica. Confira!

$P = V \cdot i$ e $V = R \cdot i$
substituindo obtemos:

$$p = V \cdot \frac{V}{R} \rightarrow p = \frac{V^2}{R}$$

Equivalências importantes:

$$1 \text{ CV} = 736 \text{ W}$$

$$\text{HP} = 745,7 \text{ W}$$

$$\text{BTU} = 0,293 \text{ W}$$

Veja o disco apresentado na figura a seguir e observe todas as variáveis da Lei de Ohm e da potência elétrica. Vamos lá!

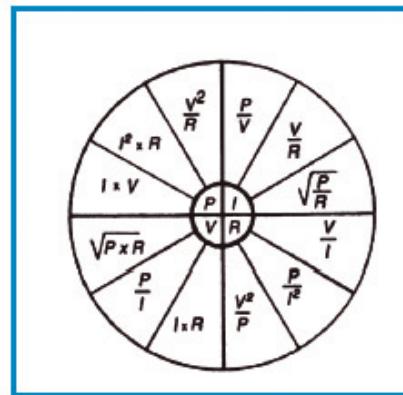


Figura 32 - Disco com todas as Variáveis da Lei de Ohm e da Potência Elétrica

Fonte: Vieira Júnior (2004, p. 31).

Exemplo

Uma lâmpada de lanterna de 6 V requer uma corrente de 0,5 A das pilhas. Qual é a potência da lâmpada?

$$P = V \cdot i \rightarrow P = 6 \cdot 0,5 \rightarrow P = 3 \text{ W}$$

Exemplo

Um aquecedor elétrico tem uma resistência de 8 Ω e solicita uma corrente de 10 A. Qual é a sua potência?

$$\begin{aligned} P &= R \cdot i^2 \\ &\rightarrow P = 8 \cdot 10^2 \\ &\rightarrow P = 800 \text{ W} \end{aligned}$$

Exemplo

Um isqueiro de automóvel funciona com 12 Vcc fornecidos pela bateria. Sabendo que sua resistência é de 30 Ω, calcule a potência dissipada.

$$p = \frac{V^2}{R} \rightarrow p \cdot \frac{12^2}{30} \rightarrow p = 4,8W$$

POTÊNCIA NOMINAL

Certos aparelhos elétricos, tais como chuveiros, lâmpadas e motores têm uma característica particular: seu funcionamento obedece a uma tensão previamente estabelecida. Assim, existem chuveiros para 127 V ou 220 V; lâmpadas para 6 V, 12 V, 127 V, 220 V e outras tensões; motores para 127 V, 220 V, 380 V, 760 V e outras. Por isso, os aparelhos que apresentam tais características devem sempre ser ligados na tensão correta (nominal), normalmente especificada no seu corpo.

Quando tais aparelhos são ligados corretamente, a quantidade de calor, luz ou movimento produzida é exatamente aquela para a qual foram projetados.

Por exemplo, uma lâmpada de 127V/100W, ligada corretamente (em 127 V), produz 100 W entre luz e calor. Diz-se, nesse caso, que a lâmpada está dissipando a sua potência nominal.

Portanto, potência nominal é a potência para qual um aparelho foi projetado.

Quando uma lâmpada, aquecedor ou motor trabalha “dissipando a sua potência nominal”, diz-se que o aparelho está na sua condição ideal de funcionamento.

LEIS DE KIRCHHOFF

A aplicação de Lei de Ohm se limita a determinar a intensidade da corrente elétrica que atravessa um circuito simples. Porém quando esse circuito toma a forma de uma rede elétrica, isto é, com circuitos complexos e correntes variadas, medir a intensidade de corrente requer conhecer as Leis de Kirchhoff, conhecidas como Lei das Malhas e Lei dos Nós. Esse conhecimento, bem como sua compreensão, é indispensável para a manutenção e o desenvolvimento de projetos de circuitos eletroeletrônicos.

Um circuito é composto por malhas, nós e ramos.

Definimos malha como sendo todo circuito fechado constituído por elementos elétricos. Denominamos de nó um ponto de interligação de três ou mais componentes, e ramo, o trecho compreendido entre dois nós consecutivos. 1ª Lei de Kirchhoff ou Lei dos Nós

A soma das correntes que chegam a um nó deve ser igual à soma das correntes que dele saem. Veja!

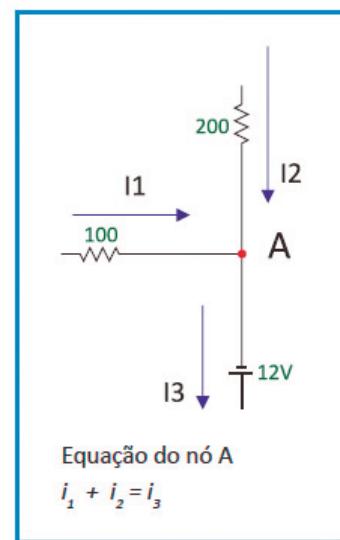


Figura 33 - Representação da 1ª Lei de Kirchhoff

Fonte: Batista ([200-?], p. 51).

Exemplo

Considerando a figura abaixo, se $i_1 = 1A$, $i_2 = 2A$, calcule i_3 .

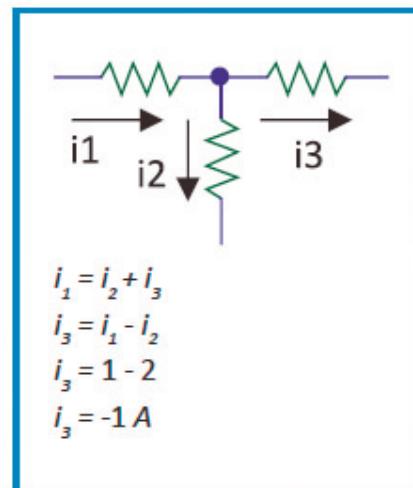


Figura 34 - Aplicação da 1ª Lei de Kirchhoff

Fonte: Batista ([200-?], p. 53).

Exemplo

Da mesma forma, se $i_2 = 1A$, $i_3 = -5A$, calcule i_1 .

$$\begin{aligned}
 i_1 &= i_2 + i_3 \\
 i_1 &= 1 - 5 \\
 i_1 &= -4
 \end{aligned}$$

A2ª LEI DE KIRCHHOFF OU LEI DAS TENSÕES

A soma das quedas de tensão nos componentes de uma associação série é igual à tensão aplicada nos seus terminais externos.

Esta lei se refere à forma como a tensão se distribui nos circuitos série e é utilizada com muita frequência como ferramenta para determinar quedas de tensão desconhecidas em circuitos eletrônicos.

Exemplo

Para a malha A, B, C e D, partindo-se do ponto A, no sentido horário, adotado, podemos escrever:

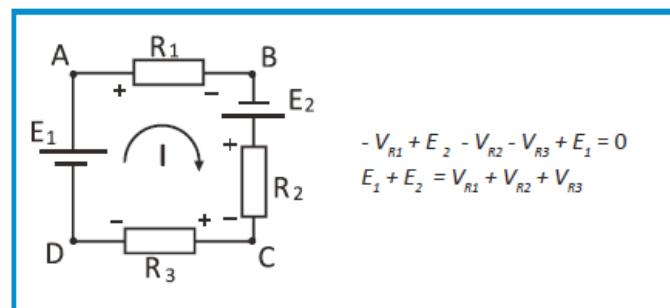


Figura 35 - Aplicação da 2^a Lei de Kirchhoff

Fonte: SENAI (2004, p. 67).

O sinal positivo representa um aumento de potencial e o sinal negativo uma perda de potencial, isto é, os resistores ao serem percorridos pela corrente do circuito (imposta pelas baterias) apresentam queda de tensão contrária em relação ao sentido da corrente.

Para que você possa aplicar as Leis de Kirchhoff, tome como exemplo o circuito da figura a seguir, e calcule as correntes nos três ramos.

Primeiramente, adote uma corrente para cada malha, sentido horário, conforme demonstra a imagem da direita; se o sentido estiver errado, você encontrará um resultado negativo, mas com valor numérico correto.

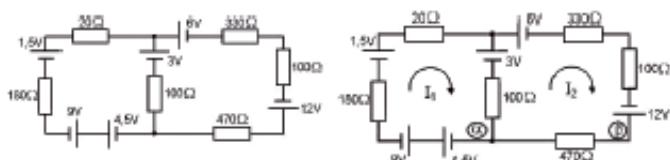


Figura 36 - Circuito Elétrico e Circuito Elétrico com as Correntes de cada Malha

Fonte: SENAI (2004, p. 67).

Utilizando a 2^a Lei de Kirchhoff você pode equacionar cada malha, veja!

$$\begin{aligned} \text{Malha } \alpha: +4,5 - 9 - 180I_1 + 1,5 - 20I_1 - 3 - 100(I_1 - I_2) &= 0 \\ 4,5 - 9 + 1,5 - 3 - 300I_1 + 100I_2 &= 0 \\ -300I_1 + 100I_2 &= 6 \text{ (I)} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Malha } \beta: -100(I_2 - I_1) + 3 - 6 - 330I_2 - 100I_2 + 12 - 470I_2 &= 0 \\ +3 - 6 + 12 - 1000I_2 + 100I_1 &= 0 \\ 100I_1 - 1000I_2 &= -9 \text{ (II)} \end{aligned}$$

Montando-se o sistema de equações temos:

$$-300I_1 + 100I_2 = 6 \text{ (I)} \quad 100I_1 - 1000I_2 = -9 \text{ (II)}$$

Multiplicando-se a equação (I) por 10, temos:

$$-3000I_1 + 1000I_2 = 60 \text{ (I)}$$

$$100I_1 - 1000I_2 = -9 \text{ (II)}$$

Somando-se as duas equações, temos:

$$-3000I_1 + 1000I_2 = 60$$

$$100I_1 - 1000I_2 = -9 +$$

$$-2900I_1 = 51$$

$$\text{onde: } I_1 = \frac{51}{-2900} \rightarrow I_1 = 17,6mA$$

O sinal negativo na resposta indica que o sentido correto da corrente I1 é contrário ao adotado, estando o seu valor numérico correto.

Para calcular a corrente I2, substitua o valor de I1 na equação (II), levando em consideração o sinal negativo, pois as equações foram montadas de acordo com os sentidos de correntes adotados.

$$100I_1 - 1000I_2 = -9 \text{ (II)}$$

$$100 \cdot (-17,6 \cdot 10^{-3}) - 1000I_2 = -9$$

$$-1,76 - 1000I_2 = -9$$

$$I_2 = \frac{9 - 1,76}{1000} \rightarrow I_2 = 7,24mA$$

Como I2 é um valor positivo, isto significa que o sentido adotado está correto.

Ainda falta você calcular a corrente no ramo central, para tanto, utilize a 1^a Lei de Kirchhoff no nó A, conforme mostra a imagem a seguir.

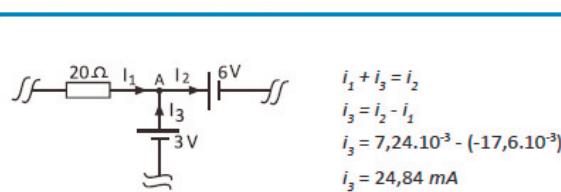


Figura 37 - Aplicação da 1^a Lei de Kirchhoff no Nô "A"

Fonte: SENAI (2004, p. 68).

Então, chegou ao resultado correto? Sim! Isto é sinal de que você está compreendendo bem o conteúdo estudado até este momento. Caso ainda não tenha conseguido chegar ao resultado, retorne e faça novamente a leitura desta unidade, com certeza essa ação só complementará ainda mais seu processo de aprendizagem.

Aproveite também para descansar um pouco, levante, dê uma caminhada, tome um café ou uma água e depois retorne aos estudos.

Ah! E por falar nos estudos, vamos juntos conhecer o conceito e os princípios do eletromagnetismo? Vamos lá, ainda temos muitas novidades para você!

3. Magnetismo e Eletromagnetismo

3.1 PRINCÍPIOS DO MAGNETISMO

As primeiras observações sobre os efeitos magnéticos foram feitas na Ásia Menor, onde foram encontradas algumas pedras que tinham a propriedade de atrair pedaços de ferro. Essas pedras foram chamadas de magnetita e hoje sabemos que são constituídas de óxido de ferro (Fe_3O_4).

A magnetita, por ser encontrada na natureza já em forma de ímã, é classificada como um ímã natural.

A maioria dos ímãs utilizados hoje é produzida artificialmente por meio de processos industriais.

Os ímãs artificiais podem ser temporários ou permanentes, sendo que os temporários são feitos de ferro doce, enquanto os permanentes são feitos de ligas de aço (geralmente contendo níquel ou cobalto).

Um ímã é composto de ímãs elementares que podem ser os átomos ou moléculas que compõem o mesmo. Assim, para obter um ímã basta orientarmos os ímãs elementares de um metal, processo esse que se chama imantação. No entanto, nem todos os metais podem ser imantados. Confira alguns exemplos na imagem a seguir.

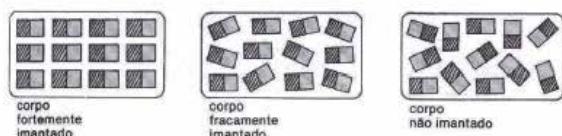


Figura 38 - Orientação dos Ímãs Elementares em Diferentes Corpos

Fonte: Parizzi (2003, p. 70).

Chama-se magnetismo a propriedade pela qual um ímã exerce sua influência. Não é ainda completamente conhecida a natureza das forças magnéticas de atração e repulsão, embora conheçamos as leis que orientam suas ações e como utilizá-las.

Experimentalmente podemos observar que as propriedades de um ímã se manifestam mais acentuadamente em seus extremos. A partir disso, os extremos do ímã passaram a ser chamados de polos magnéticos. Os polos são o norte e o sul.

Podemos dizer que polos são as duas regiões onde o ímã exerce maior influência. Acompanhe!

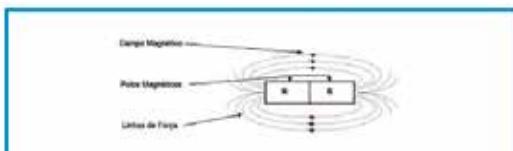


Figura 39 - Polos Magnéticos de um Ímã

Fonte: SENAI (2004, p. 74).

Para facilitar a representação de um campo magnético, utilizamos o conceito de linha de força. Geralmente as linhas de força de um campo magnético são definidas da seguinte forma: são trajetórias percorridas por uma massa magnética hipotética norte, concentrada em um ponto material, móvel no campo.

Por isso, diz-se que as linhas de força saem do polo norte e vão para o polo sul, como você pode observar na imagem anterior.

Espalhando-se limalhas de ferro no campo magnético de um ímã, nota-se de maneira bem clara que elas se dispõem segundo linhas bem definidas, que são as linhas de força do campo magnético. Veja!

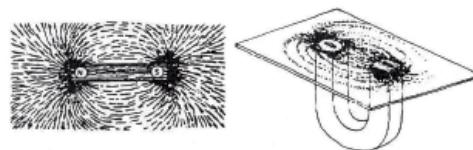


Figura 40 - Disposição das Limalhas de Ferro no Campo Magnético de um Ímã

Fonte: Batista ([200-?], p. 70).

Se um ímã for suspenso pelo seu centro, nota-se que as extremidades se orientam sempre na mesma direção: um dos polos sempre aponta para o norte e a outra extremidade aponta sempre para o sul.

DICA

A bússola nada mais é que um pequeno ímã suspenso pelo seu centro de gravidade, e é empregada para orientar os viajantes.

Se for aproximado um ímã de uma bússola, nota-se que o polo norte da bússola é repelido pelo polo norte do ímã. O mesmo acontece com os polos sul do ímã e da bússola. Entretanto, o polo norte do ímã atrai o polo sul da bússola, enquanto que o polo norte da bússola é atraído pelo polo sul do ímã.

A Terra deve ser considerada como um grande ímã. Veja na imagem a seguir, o campo magnético circundando-a. As polaridades geográficas e magnéticas estão indicadas. Vale ressaltar que o eixo magnético não coincide com o eixo geográfico.

No polo norte geográfico fica situado o polo sul magnético e no polo sul geográfico fica situado o polo norte magnético. Confira!

Outra propriedade importante dos ímãs é que polos de mesmo nome se repelem, ao passo que polos de nomes contrários se atraem. Intensidade do campo magnético

É preciso observar que o campo magnético não se manifesta somente em um plano: ele é uma região do espaço. Supondo-se, no interior do campo de um ímã uma superfície de 1cm^2 , o número de linhas de força que passam através dessa superfície permite avaliar a intensidade do campo magnético (H), uma grandeza expressa em oersted (Oe).

DICA

A intensidade do campo magnético não é igual em todos os seus pontos, pois à medida que as linhas de força se afastam do ímã, elas se tornam escassas.

O número total de linhas de força de um ímã é chamado fluxo de indução magnética, cujo símbolo é Φ (fi - letra grega) e é medido em weber (Wb). Outra unidade possível para expressar o fluxo de indução magnética é o maxwell (Mx). A relação entre as unidades weber e maxwell se dá por:

$$1\text{Wb} = 10^8 \text{ Mx}$$

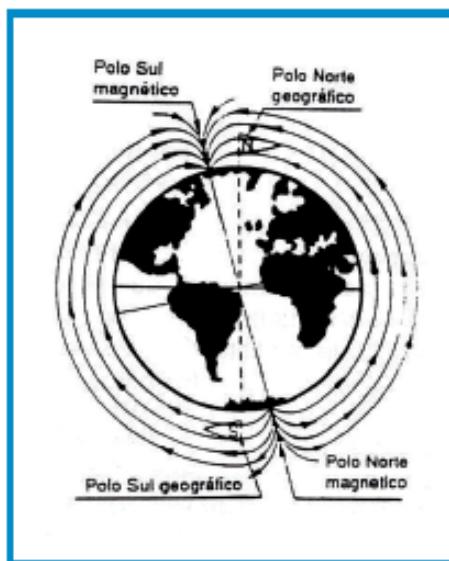


Figura 41 - O Planeta Terra como um Imenso Ímã

Fonte: Batista ([200-?], p. 70).

Se você partir um ímã ao meio, obterá dois novos ímãs com dois polos cada um. Da mesma forma, dividindo ao meio cada um dos novos ímãs você obterá mais ímãs, porém com dois polos. Portanto, é impossível separar os polos de um ímã, pois por mais que você os divida, eles sempre terão dois polos.

Observe na imagem a seguir que na região A do espaço haverá uma intensidade de campo magnético de maior valor do que a correspondente na região B, uma vez que na região A existe um número maior de linhas de força.

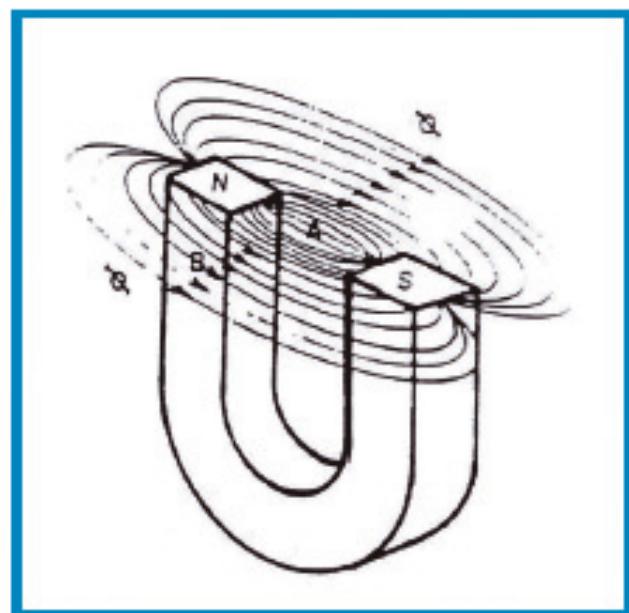


Figura 42 - Região Indicando o Fluxo Magnético em um Ímã
Fonte: Batista ([200-?], p. 71).

Podemos determinar a intensidade do campo magnético por meio da seguinte equação:

$$H = \frac{\Phi}{A}$$

Sendo:

- H → intensidade do campo magnético em oersted (Oe);
- Φ → fluxo magnético em weber (Wb);
- A → área de uma determinada região onde passam linhas de fluxo magnético expressa em centímetros cúbicos (cm^2).

Nossa caminhada ainda não terminou! Vamos conhecer agora os princípios do eletromagnetismo. Continue nesta viagem pelo mundo do conhecimento!

3.2 PRINCÍPIOS DO ELETROMAGNETISMO

CAMPO MAGNÉTICO EM UM CONDUTOR RETO

A corrente elétrica, passando por um condutor, faz com que ele adquira propriedades magnéticas, como o surgimento de linhas de campo magnético. Essas, entretanto, são muito fracas e imperceptíveis para pequenos valores da corrente elétrica. O sentido das linhas de campo magnético é dado pela regra da mão direita. Confira a seguir!

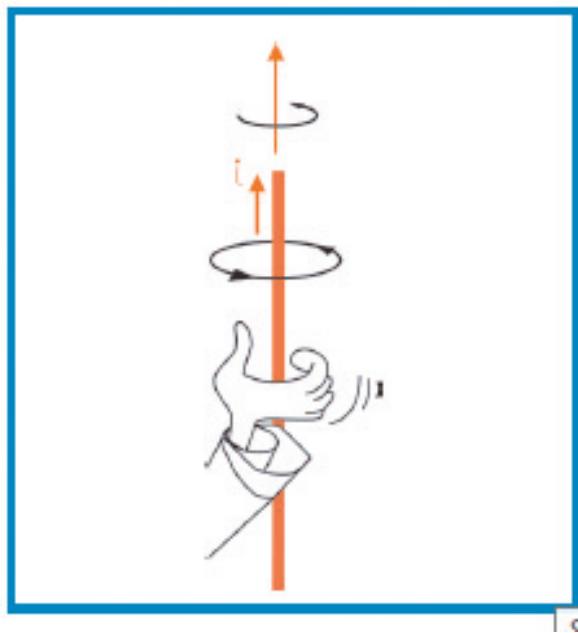


Figura 43 - Regra da Mão Direita

Fonte: Parizzi (2003, p. 71).

Com o polegar na direção da corrente, o movimento dos dedos para pegar os fios indica o sentido do campo.

Quando observamos ao longo do condutor, a representação das linhas de campo magnético é dada de acordo com a imagem a seguir, respeitando as seguintes convenções:

- “•” → indica corrente elétrica ou campo magnético saindo do plano;
- “x” → indica corrente elétrica ou campo magnético entrando no plano.

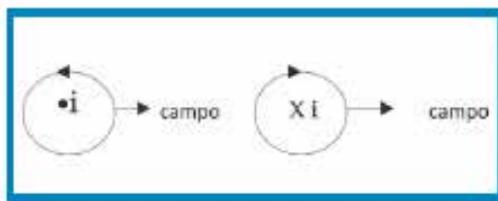


Figura 44 - Sentido do Campo Magnético, com Corrente saindo do Plano da Folha (Direita) e entrando no Plano da Folha (Esquerda)

Fonte: Parizzi (2003, p. 72).

O vetor B representativo da intensidade de campo em um ponto é tangente ao campo no ponto considerado.

A intensidade de campo no ponto considerado é diretamente proporcional à corrente no condutor e inversamente proporcional à distância do centro do condutor ao ponto, podendo ser determinado pela equação:

$$B = \frac{\mu_0 \cdot i}{2\pi \cdot r}$$

Sendo:

- B → intensidade do campo magnético em tesla (T);
- i → corrente elétrica que percorre o condutor em ampère (A);
- r → distância do centro de um condutor ao ponto que se deseja calcular a intensidade do campo magnético em metros (m);
- μ_0 → constante de permeabilidade magnética do meio $\frac{(T \cdot m)}{A}$. Para o vácuo, $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \frac{T \cdot m}{A}$.

Exemplo

Um fio de cobre reto e extenso é percorrido por uma corrente elétrica de intensidade $i = 1,5$ A. Sabe-se que $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \text{ T.m/A}$, calcule a intensidade do vetor campo magnético originado num ponto com distância $r = 0,25$ m do fio.

$$B = \frac{4\pi \cdot 10^{-7}}{2\pi \cdot 0,25} \cdot 1,5 \rightarrow$$

$$B = 1,2 \cdot 10^{-6} T$$

CAMPO MAGNÉTICO NO CENTRO DE UMA ESPIRA

Para determinação do sentido do campo magnético no centro da espira, continue utilizando a regra da mão direita, com o polegar indicando a direção da corrente e o movimento dos dedos indicando o sentido das linhas de campo.

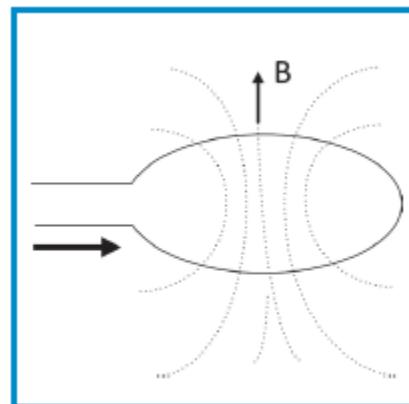


Figura 45 - Representação das Linhas de Campo Magnético no Centro de Espira Circular

Fonte: SENAI (2004, p. 78).

A intensidade de campo magnético no centro da espira pode ser determinada pela equação:

$$B = \frac{\mu_0 \cdot i}{2 \cdot r}$$

Sendo:

- B → intensidade do campo magnético em tesla (T);
- i → corrente elétrica que percorre o condutor em ampère (A);
- r → distância do centro de um condutor ao ponto que se deseja calcular a intensidade do campo magnético em metros (m);
- μ_0 → constante de permeabilidade magnética do meio ($T \cdot m$). A Para o vácuo, $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \frac{T \cdot m}{A}$.

Exemplo

Uma corrente elétrica de intensidade $i = 8,0$ A percorre uma espiral circular de raio $r = 2,5 \pi$ cm. Determine a intensidade do vetor campo magnético no centro da espira, sabendo que $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \frac{T \cdot m}{A}$.

$$B = \frac{4\pi \cdot 10^{-7} \cdot 8,0}{2,25\pi \cdot 10^{-2}} \\ \rightarrow B = 6,4 \cdot 10^{-5} T$$

CAMPO MAGNÉTICO NO CENTRO DE UM SOLENÓIDE

Os campos criados em cada condutor que forma o solenóide se somam e o resultado final é um campo magnético idêntico ao de um ímã permanente em forma de barra, como você pode observar na figura a seguir.

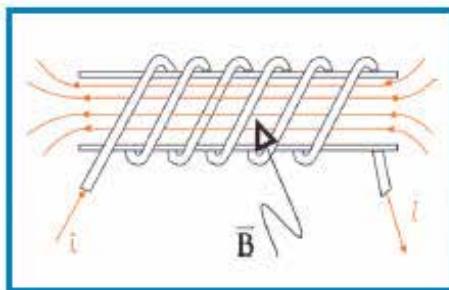


Figura 46 - Configuração das Linhas de Campo Magnético no Interior de um Solenóide

Fonte: Parizzi (2003, p. 72).

A intensidade de campo magnético no centro do solenóide pode ser determinada pela equação:

$$B = \frac{\mu_0 \cdot N \cdot i}{1}$$

Sendo:

- B → intensidade do campo magnético em tesla (T);
- i → corrente elétrica que percorre o condutor em ampère (A);
- l → comprimento do solenóide em metros (m);
- N → número de espiras do solenóide;
- μ_0 → constante de permeabilidade magnética do meio $\frac{(T \cdot m)}{A}$. Para o vácuo, $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \frac{T \cdot m}{A}$.

Exemplo

O campo magnético no interior de um solenóide tem intensidade $B = 8 \cdot 10^{-2}$ T, o comprimento do solenóide é $l = 0,5 \pi$ m e a corrente que o atravessa tem intensidade $i = 4,0$ A. Sendo $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \frac{T \cdot m}{A}$, determine o número de espiras.

$$B = \frac{\mu_0 \cdot N \cdot i}{1} \rightarrow N = \frac{B \cdot 1}{\mu_0 \cdot i} \rightarrow \frac{8 \cdot 10^{-2} \cdot 0,5\pi}{4\pi \cdot 10^{-7} \cdot 4,0} \rightarrow N = 25000 \text{ espiras}$$

ELETROÍMÃS

Ao enrolar um condutor em forma de espiras, constitui-se uma bobina, onde o campo magnético resultante é a soma do campo em cada condutor. Portanto, a intensidade campo magnético em uma bobina depende diretamente da corrente e do número de espiras.

Se você desejar aumentar ainda mais as propriedades magnéticas, deverá introduzir, no solenóide, um núcleo de ferro, com isso terá construído um eletroímã, apresentando polaridade conforme ilustra a figura a seguir.

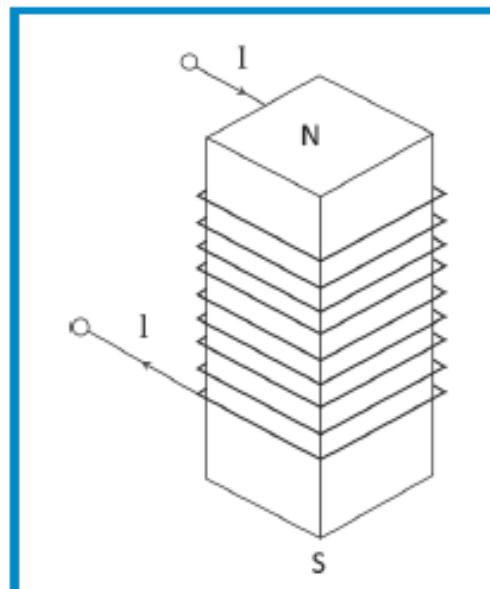


Figura 47 - Eletroímã com Núcleo de Seção quadrada

Fonte: Batista ([200-?], p. 73).

Os fatores que aumentam a força magnética de um eletroímã são:

- maior número de espiras;
 - maior intensidade da corrente elétrica;
 - material de que é constituído o núcleo;
 - maior seção do núcleo;
 - menor distância entre os polos.
- O eletroímã é usado sob diversas formas:
- imãs temporários;
 - reatores; e
 - transformadores.

Nas chaves magnéticas, desejando-se produzir atração magnética de certas peças de aço que acionam os contatos durante determinado tempo, usa-se um eletroímã, que só possui propriedades magnéticas quando a corrente passa através dele.

E por falar em propriedades magnéticas, você já ouviu falar em indução eletromagnética? Esse é o nosso próximo assunto. Vamos em frente!

3.3 INDUÇÃO ELETROMAGNÉTICA

Depois que Oersted demonstrou em 1820 que a corrente elétrica afetava a agulha de uma bússola, Faraday manifestou sua convicção de que o campo magnético seria capaz de produzir corrente elétrica.

Durante dez anos Faraday trabalhou no caso até conseguir sucesso em 1831. Ele observou que num circuito, como o demonstrado a seguir, o galvanômetro defletia no instante de ligar e desligar a chave, mas permanecia imóvel quando a chave ficava ligada. Confira!

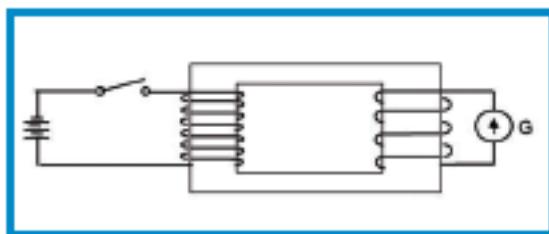


Figura 48 - Circuito Elétrico com Núcleo

Fonte: SENAI (2004, P. 87).

Com isso ele concluiu que o fluxo magnético variável era o responsável pelo aparecimento da força electromotriz (fem) no enrolamento, onde estava conectado o galvanômetro.

Quando ligamos a chave, a corrente não atinge seu valor de regime instantaneamente, levando certo tempo para que isso ocorra. O mesmo acontece quando desligamos. Por isso é que o fluxo nesses instantes é variável.

Dessa forma, se um condutor for submetido a um

campo magnético variável, entre os seus extremos aparecerá uma diferença de potencial que é conhecida como fem induzida. O fenômeno em questão é denominado indução eletromagnética.

Poderia ser produzida uma fem induzida num condutor se o mesmo fosse aproximado ou afastado de um imã (dentro de seu campo magnético). O mesmo efeito seria obtido se o condutor fosse mantido em repouso e o imã se aproximasse dele ou se afastasse.

Os três casos citados apresentam um ponto em comum: para o condutor, está sempre havendo uma variação de fluxo. Essa é a condição para que se produza uma fem induzida.

LEI DE FARADAY

Toda vez que um condutor estiver sujeito a uma variação de fluxo, nele se estabelecerá uma fem induzida enquanto o fluxo estiver variando.

Essa fem é diretamente proporcional à taxa de variação do fluxo no tempo e pode ser determinada pela equação:

$$\varepsilon = \frac{-\Delta\phi}{\Delta t}$$

Sendo:

ε → fem induzida em volt (V);

$\Delta\phi$ → variação de fluxo magnético em weber (Wb);

Δt → intervalo de tempo durante o qual houve variação de fluxo em segundos (s).

A justificativa do sinal negativo é explicada pela Lei de Lenz que você verá mais adiante.

Um fluxo variável no tempo pode ser obtido de três formas, confira!

- Condutor imerso em um fluxo variável (por exemplo, o fluxo produzido por uma CA).

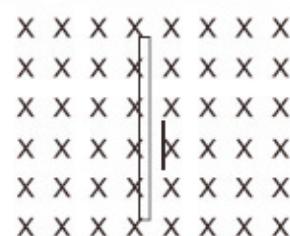


Figura 49 - Condutor Fixo Imerso em um Campo Magnético Variável

Fonte: SENAI (2004, p. 88).

- Movimento relativo entre um fluxo constante e um condutor.

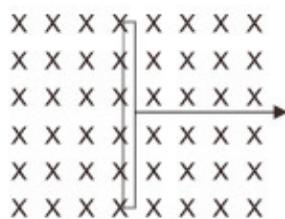


Figura 50 - Condutor Móvel em Campo Magnético Constante

Fonte: SENAI (2004, P. 88).

- Combinação dos dois anteriores, ou seja, movimento relativo entre um condutor e um fluxo magnético variável.

Exemplo

Uma espira retangular, de dimensões 6 cm e 10 cm, é colocada perpendicularmente às linhas de indução de um campo magnético uniforme de intensidade 10^{-3} T. A intensidade do campo magnético é reduzida a zero em 3 segundos. Determine a fem induzida média nesse intervalo de tempo.

$$\begin{aligned} \text{Área} \rightarrow A &= 6 \cdot 10 \rightarrow A = 60 \text{ cm}^2 \rightarrow A = 6 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2 \\ \Delta B &= B_{\text{final}} - B_{\text{inicial}} \rightarrow \Delta B = -10^{-3} \text{ T} \\ \Delta\Phi &= \Delta B \cdot A \rightarrow \Delta\Phi = (-10^{-3}) \cdot 6 \cdot 10^{-3} \rightarrow \Delta\Phi = -6 \cdot 10^{-6} \text{ Wb} \\ \varepsilon &= -\frac{\Delta\Phi}{\Delta t} \rightarrow \varepsilon = \frac{-6(-6 \cdot 10^{-6})}{3} \rightarrow \varepsilon = 2 \cdot 10^{-6} \text{ V} \end{aligned}$$

LEI DE LENZ

Faraday foi o primeiro homem a produzir uma força eletromotriz induzida e a determinar o seu valor. Porém a determinação do seu sentido é devida a Lenz, que apresentou a seguinte proposição, conhecida como Lei de Lenz:

“O sentido de uma força eletromotriz induzida é tal que ela se opõe, pelos seus efeitos, à causa que a produziu”. (BATISTA, [200-?], p. 79).

No caso de um condutor imerso em um campo magnético variável, a polaridade da fem será tal que se o circuito for fechado, circulará uma corrente, criando um fluxo que irá se opor à variação do fluxo inicial. Veja!

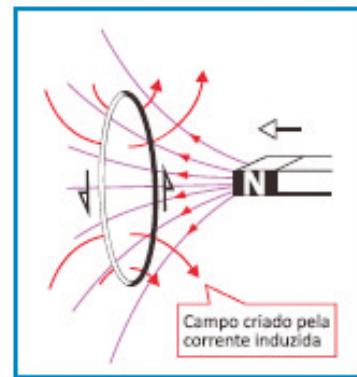


Figura 51 - Variação de Fluxo Magnético e Surgimento de Corrente Elétrica Induzida

Fonte: Parizzi (2003, p. 76).

Observe na imagem anterior que a corrente elétrica induzida gera um campo magnético que se opõe à variação do campo magnético do ímã. Isso justifica a existência do sinal “negativo” na Lei de Faraday.

TENSÃO INDUZIDA EM CONDUTORES QUE CORTAM UM CAMPO MAGNÉTICO

Com base na Lei da Faraday é possível encontrar uma fórmula particular para calcular a tensão induzida em condutores que se movimentam no interior de um campo magnético.

No esquema a seguir, vamos supor que o condutor se desloca do ponto A ao ponto B com velocidade constante v , no interior de um campo B , percorrendo assim uma distância Δx .

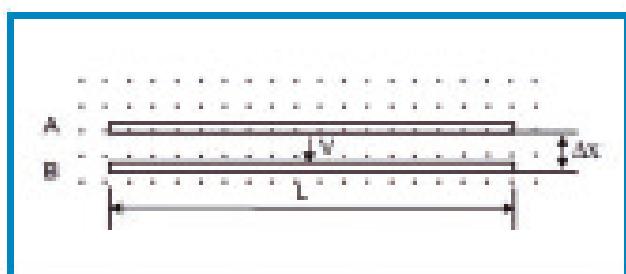


Figura 52 - Condutor se deslocando em um Campo Magnético

Fonte: SENAI (2004, P. 90).

$$\begin{aligned} \varepsilon &= -\frac{\Delta\Phi}{\Delta t} \rightarrow \text{O fluxo é dado por } \Delta\Phi = B \cdot A \\ \varepsilon &= -\frac{B \cdot A}{\Delta t} \rightarrow \text{A área } A \text{ é função de } \Delta x \text{ e } I \rightarrow A = \Delta x \cdot I \\ \varepsilon &= -\frac{B \cdot \Delta x \cdot I}{\Delta t} \rightarrow \text{sabemos que } v = -\frac{\Delta x}{\Delta t} \\ \text{Logo obtemos: } \varepsilon &= B \cdot v \cdot I \end{aligned}$$

Sendo:

ϵ → fem induzida em volt (V);

B → intensidade do campo magnético em tesla (T);

v → velocidade do condutor, perpendicular ao campo em metros por segundo (m/s);

I → comprimento do condutor em metros (m).

Exemplo

Um avião se desloca a 1080 km/h, perpendicularmente ao campo magnético vertical da Terra, cuja intensidade no local é $B = 3 \cdot 10^{-5}$ T. O comprimento total das asas do avião é $I = 40$ m. Determine a fem induzida entre os pontos extremos das asas desse avião.

$$1080 \text{ km/h: } 3,6 = 300 \text{ m/s}$$

$$\epsilon = -B \cdot v \cdot I \rightarrow$$

$$\epsilon = -3 \cdot 10^{-5} \cdot 300 \cdot 40 \rightarrow$$

$$\epsilon = -0,36 \text{ V}$$

HISTERESE MAGNÉTICA

Até agora você estudou sobre ímãs elementares de um determinado material sem, no entanto, entrar em detalhes.

Um ímã elementar nada mais é do que um átomo de um determinado material que exibe as características de um ímã. Todo átomo que se comporta dessa forma é chamado de dipolo magnético.

As propriedades magnéticas dos dipolos são devidas a três causas, acompanhe.

••A primeira é devido à circulação dos elétrons em torno do átomo (análogo a uma espiral percorrida por corrente).

••A segunda é devido ao spin do elétron (SPIN é o movimento de rotação do elétron em torno de seu próprio eixo).

••A terceira é devido ao SPIN do núcleo. No entanto, as duas últimas contribuições são desprezíveis se comparadas à primeira.

Desse modo, os átomos em que pequenos campos magnéticos produzidos pela movimentação dos elétrons em suas órbitas e pelos SPINS se combinam para produzir um determinado campo resultante são os dipolos característicos de um material ferromagnético. Poderá também acontecer que a combinação desses campos em um átomo resulte num campo nulo. Se assim o for, o material será dito diamagnético.

Veja na imagem a seguir um campo resultante diferente de zero (material ferromagnético).

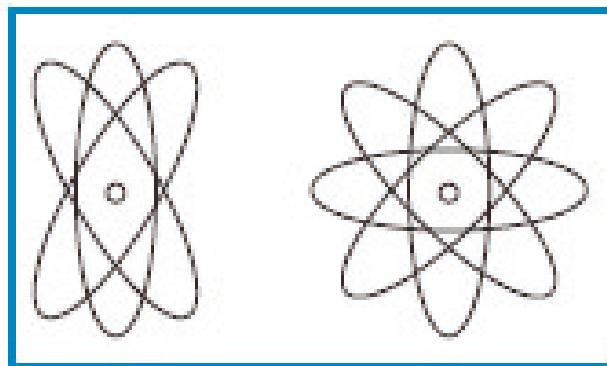


Figura 53 - Campo Resultante Diferente de Zero em um Material Ferromagnético (Esquerda) e Campo Resultante Nulo em um Material Diamagnético (Direita)

Fonte: SENAI (2004, p. 84).

Consideremos um material ferromagnético inicialmente desmagnetizado que constitui o núcleo de um solenóide. Enquanto não houver corrente elétrica no solenóide, os campos magnéticos H, gerado pela corrente, e B, induzido no material ferromagnético, são nulos. Quando injetamos uma corrente i, cria-se um campo H e esse campo, orientando alguns dos domínios do material, faz com que apareça um campo B. Conforme vamos aumentando H, B vai aumentando até que todos os domínios sejam orientados, quando o material estará então saturado (ponto P_i).

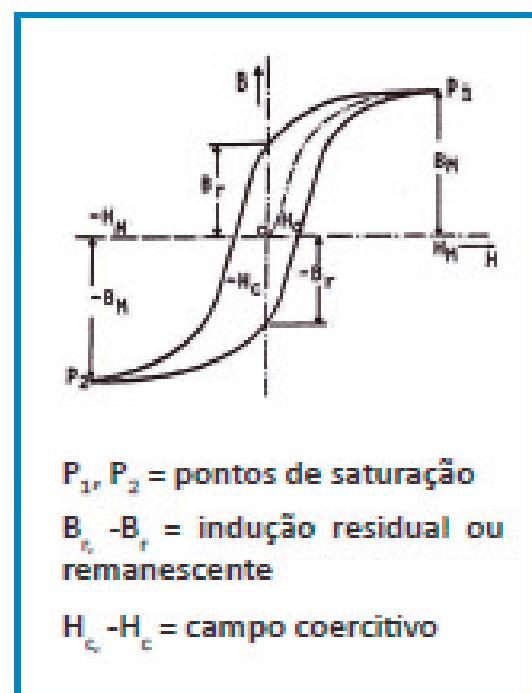


Figura 54 - Curva de Imantação de uma Substância Ferromagnética

Fonte: SENAI (2004, p. 85).

A partir daí, se começarmos a diminuir o campo H (diminuindo o valor da corrente), a indução também irá diminuir. No entanto, quando H chega a zero, existirá ainda certo valor de indução chamado de indução residual (B_r). Essa indução residual se deve ao fato de que depois de cessado o efeito de H , alguns domínios permanecem orientados.

Para eliminar a indução residual, é necessário aplicar um campo em sentido contrário (invertendo o sentido da corrente). A esse valor de campo necessário para eliminar a indução residual chamamos de campo coercitivo.

Estamos agora novamente com $B=0$, mas às custas de um campo $-H_c$. Se continuarmos a aumentar o campo H (negativamente), a indução aumentará, porém em sentido contrário, até o material saturar novamente. Trazendo o campo H a zero novamente, teremos então um valor de indução residual $-B_r$.

Novamente é necessário aplicar um campo em sentido contrário (agora positivo) para levar B_r até zero. Aumentando H , o material chega de novo ao ponto de saturação P_1 , completando o chamado ciclo de Histerese. Os fenômenos da histerese magnética devem ser interpretados como consequência da inércia e dos atritos a que os domínios estão sujeitos. Isso justifica o fato de um núcleo submetido a diversos ciclos da histerese sofrer um aquecimento.

Tal aquecimento representa para um equipamento uma perda de energia, que depende, por sua vez, da metalurgia do material de que é feito o núcleo, (particularmente da percentagem de silício), da frequência, da espessura do material em um plano normal ao campo e da indução magnética máxima.

Resumindo, podemos dizer que a perda por histerese é proporcional à área do ciclo de histerese.

Do exposto, subentende-se que os aparelhos elétricos de corrente alternada, cujos núcleos ficam sujeitos a variações de campo magnético, ficam expostos a um número de ciclos de histerese por segundo igual à frequência da tensão aplicada.

Por esse motivo, seus núcleos devem ser feitos com material de estreito ciclo de histerese para que as perdas sejam as menores possíveis.

Por outro lado, os materiais com largo ciclo de histerese têm grande aplicação na confecção de ímãs permanentes por apresentarem alta indução residual.

CORRENTES DE FOUCault

chamadas de correntes parasitas. São correntes que circulam em núcleos metálicos sujeitos a um campo

magnético variável. Veja a imagem a seguir.

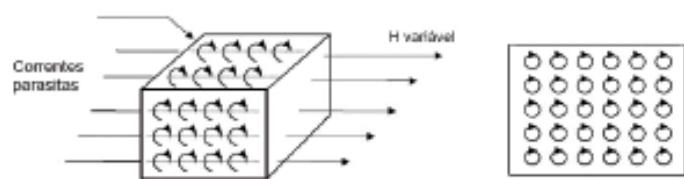


Figura 55 - Representação das Correntes de Foucault em Núcleo Metálico (Esquerda) e Vista de Corte Frontal (Direita)

Fonte: SENAI (2004, p. 88).

Pode-se perceber que em cada ponto no interior do núcleo a corrente é nula, pois o efeito de uma corrente é anulado por outra. No entanto, isso não acontece na periferia. Aí as correntes, todas com mesmo sentido, somam-se e circulam pela periferia do núcleo. Isso faz com que o núcleo se aqueça por efeito Joule, exigindo uma energia adicional da fonte.

É por essa razão que essas correntes são chamadas parasitas.

Para reduzir o efeito das correntes parasitas, deve-se laminar o núcleo na direção do campo, isolando-se as chapas entre si. Isso impede que as correntes se somem e as perdas por efeito Joule serão pequenas. Confira na imagem a seguir o exemplo de um núcleo metálico laminado.

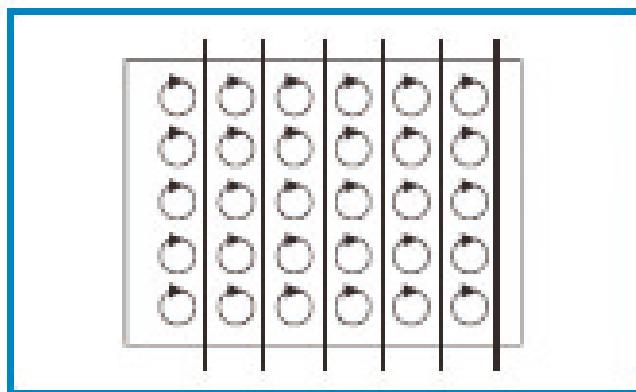


Figura 56 - Representação de Núcleo Metálico Laminado

Fonte: SENAI (2004, p. 89).

Pode-se, também, reduzir os efeitos das correntes de Foucault pela adição de elementos que aumentam a resistividade do núcleo (como o carbono) sem no entanto comprometer as propriedades magnéticas do núcleo.

Apesar de serem na maioria dos casos indesejáveis, as correntes de Foucault têm sua aplicação prática na confecção de medidores a disco de indução, relês e freios eletromagnéticos.

Uma situação aplicada onde é desejável a exis-

tênciam das correntes de Foucault é na construção dos fornos de indução, em que uma peça metálica se funde, devido ao efeito Joule originado.

Bem, estamos caminhando para a reta final desta nossa viagem. Na próxima e última unidade de estudos conversaremos um pouco sobre circuitos elétricos CA. Vamos lá, embarque em mais esta aventura pelo mundo do conhecimento!

4. Circuitos Elétricos (CA)

4.1 CORRENTE ALTERNADA

A tensão alternada muda constantemente de polaridade. Isso provoca nos circuitos um fluxo de corrente ora em um sentido, ora em outro. Acompanhe!

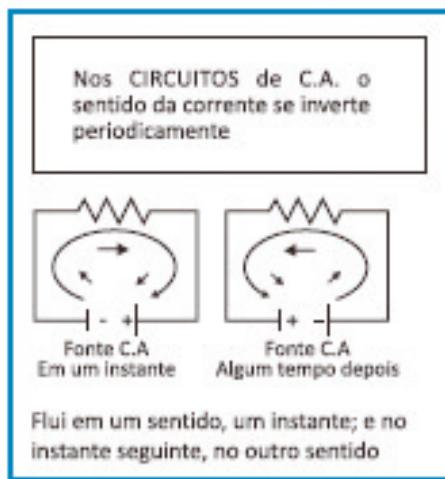


Figura 57 - Representação da Corrente Alternada em Circuito

Para você entender como se processa a geração de corrente alternada, é necessário saber como funciona um gerador elementar que consiste de uma espira disposta de tal forma que pode ser girada em um campo magnético estacionário.

Assim, o condutor da espira corta as linhas do campo eletromagnético, produzindo a força eletromotriz (ou fem).

Veja na imagem a seguir o exemplo de uma representação esquemática de um gerador.

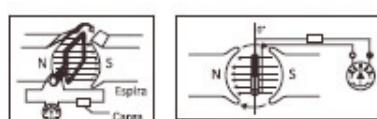


Figura 58 - Representação Esquemática de um Gerador

Fonte: SENAI (2004, p. 89).

Funcionamento do gerador

Representaremos aqui o funcionamento de um gerador analisando a posição das espiras em relação às linhas de campo magnético.

Inicialmente o plano da espira se encontra paralelo às linhas de força do campo, não havendo variação de fluxo de campo magnético no interior da espira, e des-

sa forma não é gerada a fem induzida.

Em seguida a espira se movimenta rotacionando de 45°. Nesse momento já existe variação de fluxo magnético no interior da espira, fazendo surgir uma fem induzida, como representado na imagem a seguir.

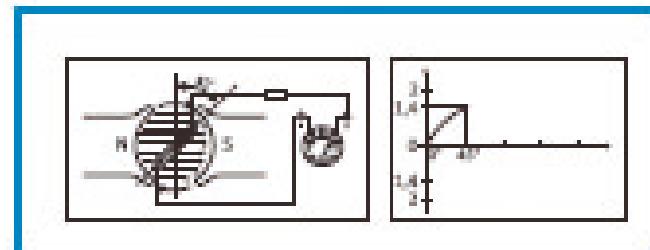


Gráfico 5 - Fem Induzida para a Posição de 45° da Espira em Relação às Linhas de Força do Campo

Fonte: SENAI (2004, p. 92).

Perceba que conforme a espira gira, aumentando o seu ângulo em relação às linhas de força do campo, maior é o fluxo de campo magnético no seu interior, atingindo o valor máximo quando a espira estiver a 90°, onde ocorrerá a geração máxima da fem induzida, conforme você pode visualizar na imagem a seguir.

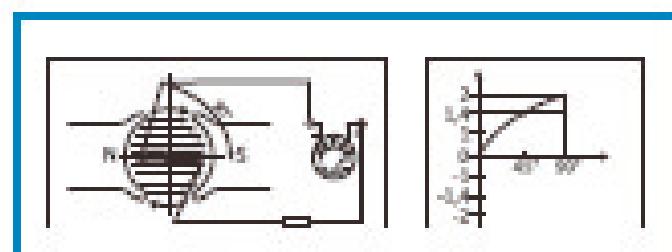


Gráfico 6 - Fem Induzida para a Posição de 90° da Espira em Relação às Linhas de Força do Campo

Fonte: SENAI (2004, p. 92).

Ao se girar a espira até a posição de 135°, diminuirá o fluxo de campo magnético, diminuindo também a fem induzida. Quando a espira chegar à posição de 180°, ela estará novamente paralela às linhas de força do campo e, portanto, não haverá fluxo algum de campo magnético atravessando por ela, logo a fem induzida será nula. Veja as imagens a seguir.

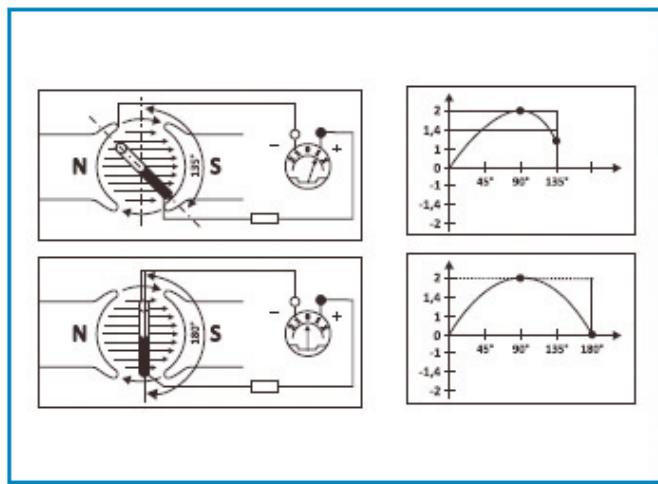


Gráfico 7 - Fem Induzida para a Posição de 135° e de 180° da Espira em relação às Linhas de Força do Campo

Fonte: SENAI (2004, p. 93).

Quando a espira ultrapassa a posição de 180°, a fem induzida que nela surgirá terá o seu sentido invertido, respeitando a Lei de Lenz.

Ao variarmos o ângulo da espira de 180° a 360°, a fem induzida que surgirá será a mesma que de 0° a 180°, porém como seu sentido é invertido, assumirá valores negativos, como você pode observar na imagem a seguir.

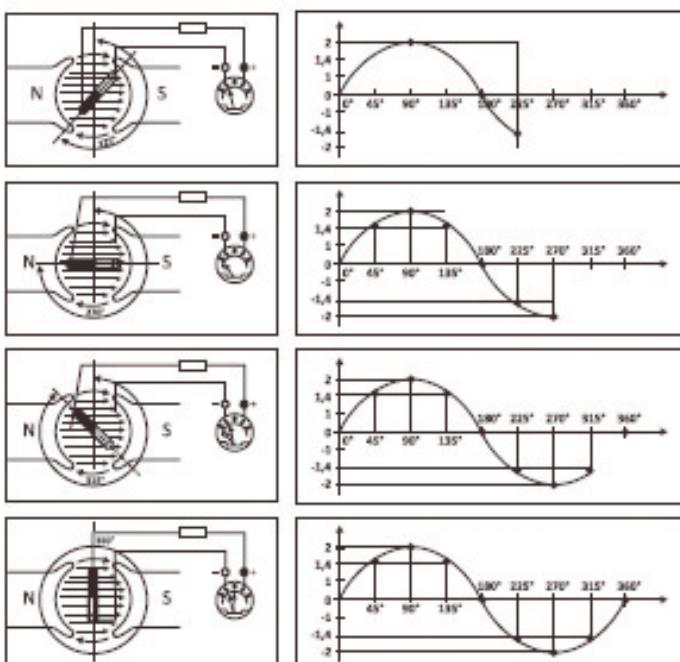


Gráfico 8 - Fem Induzida para as Posições de 225° A 360° da Espira em Relação as Linhas de Força do Campo

Fonte: adaptado de SENAI (2004).

Observe que o gráfico da fem induzida para uma rotação completa da espira resulta em uma curva senoidal (ou senóide), que representa a forma de onda da corrente de saída do gerador.

FREQUÊNCIA E PERÍODO

Um ciclo corresponde ao conjunto dos valores positivos e negativos de uma senóide completa. Dessa forma podemos considerar que meia senóide corresponde a um semiciclo.

Ao número de ciclos que ocorrem em um segundo damos o nome de frequência, representada por f . A unidade de frequência é o hertz (Hz). O tempo necessário para a ocorrência de um ciclo completo corresponde ao período, representado por T , e sua unidade é o segundo (s).

Existe uma relação matemática entre a frequência e o período, na qual o aumento no valor de um resulta em uma redução no valor de outro. Assim, quando temos uma senóide com grande frequência, essa terá um período pequeno. A relação matemática é:

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

No Brasil e na maior parte dos países do mundo, a corrente alternada é gerada na frequência de 60 Hz. Em alguns países, como o Paraguai, por exemplo, a frequência utilizada é de 50 Hz.

Exemplo

Uma corrente CA varia ao longo de um ciclo completo em 1/100 s. Qual é o período e qual é a frequência?

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

$$f = \frac{1}{1/100} \rightarrow$$

$$f = 100 \text{ Hz}$$

VALOR DE PICO

Chama-se valor de pico o valor máximo atingido por uma onda senoidal, podendo ser esse valor positivo ou negativo. Analisando o gráfico a seguir, você poderá observar que a onda senoidal parte de zero, vai até o valor máximo positivo, retorna a zero, vai até o valor máximo negativo e retorna a zero novamente. Confira!

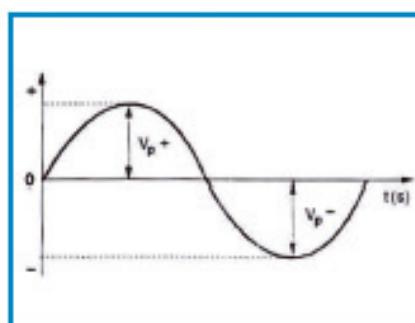


Gráfico 9 - Valor de Pico da Ca

Fonte: Batista ([200-?], p. 67).

Tem-se, então, em destaque o valor máximo positivo (representado pela sigla V_p^+) e o valor máximo negativo (representado pela sigla V_p^-).

Conclui-se, portanto, que o valor de pico é sempre a metade do valor total da tensão, pois se considera apenas a tensão de um semicírculo.

A tensão de pico a pico da CA senoidal é o valor medido entre os picos positivo e negativo de um ciclo. A tensão de pico a pico é representada pela notação V_{pp} .

Considerando-se que os dois semicírculos da CA são iguais, pode-se afirmar que:

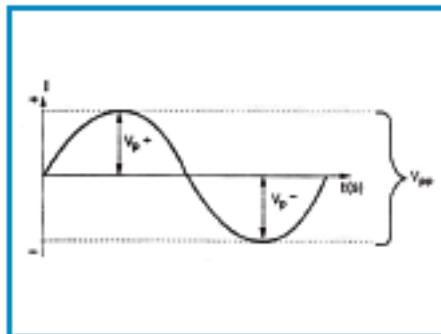


Gráfico 10 - Valores Pico a Pico da Ca
Fonte: Batista ([200-?], p.67).

Essas medições e, consequentemente, a visualização da forma de onda da tensão CA são feitas com um instrumento de medição denominado de osciloscópio.

Da mesma forma que as medidas de pico e de pico a pico se aplicam à tensão alternada senoidal, aplicam-se também à corrente alternada senoidal.

VALOR EFICAZ

Valor eficaz da corrente alternada é o valor da corrente alternada que efetivamente corresponde ao da corrente contínua.

Existe uma relação constante entre o valor eficaz (ou valor RMS) de uma CA senoidal e seu valor de pico. Essa relação auxilia no cálculo da tensão/corrente eficazes e é expressa de acordo com as seguintes equações:

$$\text{Tensão eficaz } f = \frac{V_p}{\sqrt{2}}$$

$$\text{Tensão eficaz } I_{ef} = \frac{I_p}{\sqrt{2}}$$

Exemplo

Para um valor de pico de 14,14 V, a tensão eficaz será de quanto?

$$V_{ef} = \frac{V_p}{\sqrt{2}} = \frac{14,14}{\sqrt{2}} = 10V$$

Assim, para um valor de pico de 14,14 V, teremos uma tensão eficaz de 10 V.

DICA

A tensão/corrente eficaz é o dado obtido ao se utilizar, por exemplo, um multímetro.

Também podemos determinar o valor da tensão/corrente média por meio das seguintes expressões:

$$\text{Tensão eficaz } V_{med} = \frac{2 \cdot V_p}{\pi}$$

$$\text{Corrente eficaz } I_{med} = \frac{2 \cdot I_p}{\pi}$$

Vamos continuar nossa aventura? Pegue carona na próxima seção e embarque nos temas indutância, capacitação e impedância. Vamos em frente!

4.2 INDUTÂNCIA, CAPACITÂNCIA E IMPEDÂNCIA

DEFASAGEM ENTRE CORRENTE E TENSÃO

Sabe-se que a corrente alternada e a tensão variam em ambos os sentidos, durante um determinado intervalo de tempo, descrevendo um ciclo.

Representando graficamente essa variação, obtém-se uma onda para a corrente e outra para a tensão.

DICA

Os valores máximos da corrente e da tensão durante um ciclo podem ou não coincidir. Quando coincidem, diz-se que ambas estão em fase, se não coincidem, estão defasadas.

A diferença em graus entre os instantes em que ocorrem os valores máximos da corrente e da tensão é chamada ângulo de fase (ϕ - ϕ_i , letra grega). Quando a corrente e a tensão estão defasadas, pode ocorrer que a corrente esteja adiantada ou atrasada em relação à tensão, como você pode observar nos gráficos a seguir.

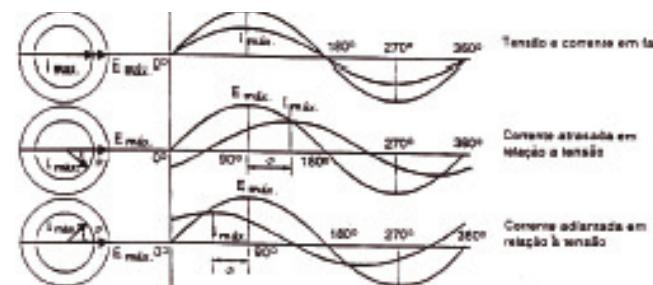


Gráfico 11 - Defasagem entre Tensão e Corrente.

Fonte: Batista ([200-?], p.102).

A corrente alternada, passando através de um resistor, estará em fase com a tensão, isto é, o ângulo da fase é nulo ($\phi = 0^\circ$). A esse fato se dá o nome de efeito resistivo ou ôhmico puro.

Passa-se por um indutor – devido ao fenômeno de autoindução da bobina –, a corrente estará atrasada em relação à tensão de ângulo de 90° ($\phi = 90^\circ$). Tem-se, então, um efeito indutivo. Num capacitor, a corrente se adianta da tensão de 90° . O efeito é capacitivo.

INDUTÂNCIA

É a propriedade que tem um corpo condutor de fazer aparecer, em si mesmo ou em outro condutor, uma força eletromotriz induzida. Sabe-se que só existe tensão induzida num corpo quando o mesmo está submetido a um campo magnético variável. Nesse caso, a indutância de um corpo é uma propriedade que só se manifesta quando a corrente que passa pelo corpo varia de valor no tempo.

A unidade de medida da indutância é o henry (H).

A indutância de uma bobina depende de diversos fatores:

- material, seção transversal, formato e tipo do núcleo;
- número de espiras;
- espaçamento entre as espiras;
- tipo e seção transversal do condutor.

Como as bobinas apresentam indutância, elas também são chamadas de indutores. Estes podem ter as mais diversas formas e podem inclusive ser parecidos com um transformador.

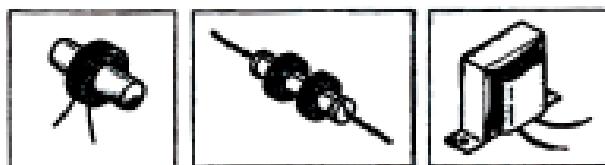


Figura 59 - Formas de IndutoresFonte: SENAI (2004, p.104).

Quando o corpo induz em si mesmo uma força eletromotriz, o fenômeno é chamado autoindução e se diz que o corpo apresenta autoindutância denominada força eletromotriz de autoindução.

Outro caso de indutância é conhecido como indução-mútua. Quando dois condutores (bobinas) são colocados um próximo do outro (sem ligação entre si), há o

aparecimento de uma tensão induzida num deles quando a corrente que passa pelo outro é variável. Esse é o princípio de funcionamento do transformador.

O símbolo do indutor (L) está representado na figura a seguir, confira!

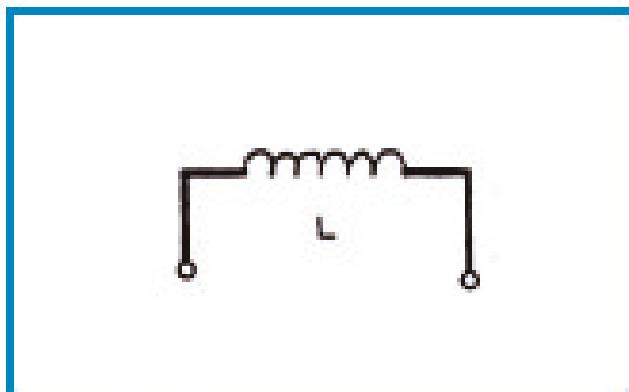


Figura 60 - Símbolo do IndutorFonte: Batista ([200-?], p. 105).Associação em série e em paralelo de indutores

Na associação em série de indutores, a indutância total é igual à soma das indutâncias individuais, veja:

$$L_T = L_1 + L_2 + L_3 + L_4 + \dots$$

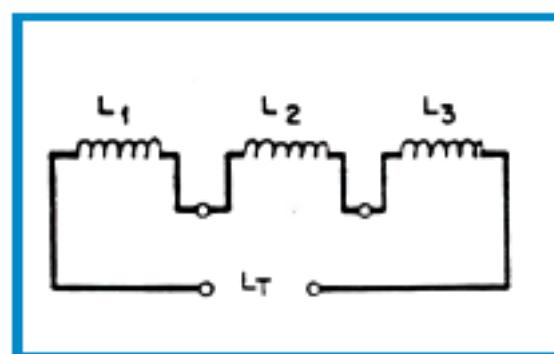


Figura 61 - Associação em Série de IndutoresFonte: Batista ([200-?], p. 106).

Na associação em paralelo de indutores, o inverso da indutância total é igual à soma dos inversos das indutâncias individuais, confira:

$$\frac{1}{L_T} = \frac{1}{L_1} + \frac{1}{L_2} + \frac{1}{L_3} + \dots$$

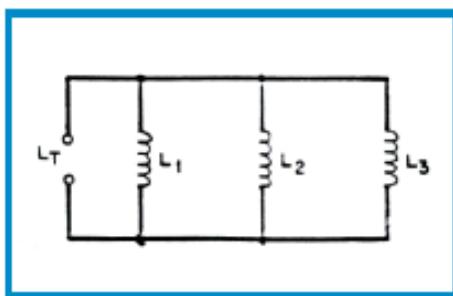


Figura 62 - Associação em Paralelo de Indutores
Fonte: Batista ([200-?], p. 106).

A associação paralela pode ser usada como forma de obter indutâncias menores ou como forma de dividir uma corrente entre diversos indutores.

TENSÃO INDUZIDA NO INDUTOR

A tensão induzida no indutor pode ser determinada pela equação:

$$\varepsilon = L \cdot \frac{\Delta i}{\Delta t}$$

Sendo:

- ε → fem induzida em volt (V);
- L → indutor dado em henry (H);
- Δi → variação da corrente em ampères (A);
- Δt → tempo decorrido durante a variação da corrente em segundos (s).

REATÂNCIA INDUTIVA

Em CA, como os valores de tensão e corrente estão em constante modificação, o efeito da indutância se manifesta permanentemente. Esse fenômeno de oposição permanente à circulação de uma corrente variável é denominado de reatância indutiva.

A reatância indutiva pode ser determinada pela equação:

$$X_L = 2 \pi \cdot f \cdot L$$

Sendo:

- X_L → reatância indutiva em ohms (Ω);
- f → frequência da corrente alternada em hertz (Hz);
- L → indutância do indutor em henry (H).

Exemplo

Em um circuito, qual é a reatância de um indutor de 600mH aplicado a uma rede de CA de 220 V, 60 Hz?

$$\begin{aligned} X_L &= 2 \pi \cdot f \cdot L \rightarrow \\ X_L &= 2 \pi \cdot 60 \cdot 0,6 \rightarrow \\ X_L &= 226,2 \Omega \end{aligned}$$

Exemplo

Determine a corrente que circula em uma bobina de 400 mH, quando ligada a uma fonte de 380 V, cuja frequência é de 60 Hz.

$$\begin{aligned} X_L &= 2 \pi \cdot f \cdot L \rightarrow \\ X_L &= 2 \pi \cdot 60 \cdot 0,4 \rightarrow \\ X_L &= 150,8 \Omega \\ i &= \frac{V}{X_L} \rightarrow \\ i &= \frac{380}{150,8} \rightarrow \\ i &= 2,52 \text{ A} \end{aligned}$$

REATÂNCIA CAPACITIVA

Quando um capacitor é alimentado com tensão CA, a corrente que circula por esse capacitor será limitada pela reatância capacitativa (X_C).

Sendo assim, a reatância capacitativa é a grandeza que se opõe à passagem de corrente CA por um capacitor, e é medida em ohms. A reatância capacitativa pode ser determinada pela equação:

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

Sendo:

- X_C → reatância capacitativa em ohms (Ω);
- f → frequência da corrente alternada em hertz (Hz);
- C → capacidade do capacitor em faraday (F).

Exemplo

Calcule a corrente absorvida por um capacitor de 16 μF quando ligado a uma fonte de 120 V, 60 Hz.

$$\begin{aligned} X_C &= \frac{1}{2\pi \cdot f \cdot C} \rightarrow \\ X_C &= \frac{1}{2\pi \cdot 60 \cdot 16 \cdot 10^{-6}} \rightarrow \\ X_C &= 165,7 \Omega \\ i &= \frac{V}{X_C} \rightarrow \\ i &= \frac{120}{165,7} \rightarrow \\ i &= 0,72 \text{ A} \end{aligned}$$

IMPEDÂNCIA

Impedância é a combinação de duas oposições:

--resistência ôhmica (pura);

--reatância capacitiva ou indutiva, ou ainda a soma vetorial da reatância capacitativa e indutiva.

Em resumo, têm-se:

--resistência, como sendo a oposição total à corrente contínua;

--impedância, como sendo a oposição total à corrente alternada.

A existência de componentes reativos, que defasam correntes ou tensões, torna necessário o uso de formas particulares para o cálculo da impedância de cada tipo de circuito em CA. Confira a seguir os tipos de impedância.

Em circuitos alimentados por CA, com cargas resistivas-indutivas ou resistivas-capacitivas, a resistência total do circuito será a soma quadrática da resistência pura (R) com as reatâncias indutivas (X_L) ou capacitivas (X_C).

Esse somatório quadrático é denominado de impedância, representada pela letra Z e expressa em ohms (Ω), podendo ser determinada pela equação:

$$Z^2 = R^2 + X_L^2 \text{ ou}$$

$$Z^2 = R^2 + X_C^2$$

Para o cálculo da impedância de um circuito, não se pode simplesmente somar valores de resistência com reatâncias, pois tais valores não estão em fase.

De acordo com o tipo de circuito, são usadas equações distintas para os circuitos: em série e em paralelo. Acompanhe!

Tipo de circuito	Grandeza	Símbolo	Unidade	Representação	Fórmula	Causa por oposição
Resistivo	Resistência	R	Ohm	Ω	$R = \frac{V}{I}$	Resistência do material usado
Indutivo	Reatância indutiva	X_L	Ohm	Ω	$2 \cdot \pi \cdot f \cdot L$	Corrente de autoindução e quadrática
Capacitivo	Reatância capacitiva	X_C	Ohm	Ω	$\frac{1}{2 \cdot \pi \cdot f \cdot C}$	Variação constante de polaridade da tensão da rede

Tabela 10 - Tipos de Impedância

Fonte: SENAI (2004, p. 108).

CIRCUITOS EM SÉRIE

Nos circuitos em série, podemos ter três situações distintas:

--resistor e indutor;

--resistor e capacitor; ou

--resistor, indutor e capacitor simultaneamente.

Resistor e indutor (círculo RL – série)

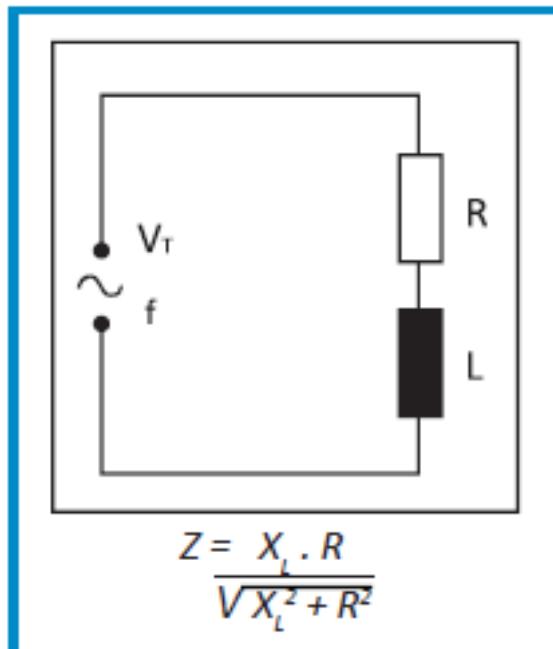


Figura 63 - Circuito RL em Série

Fonte: SENAI (2004, p. 109)

Resistor e capacitor (círculo RC – série)

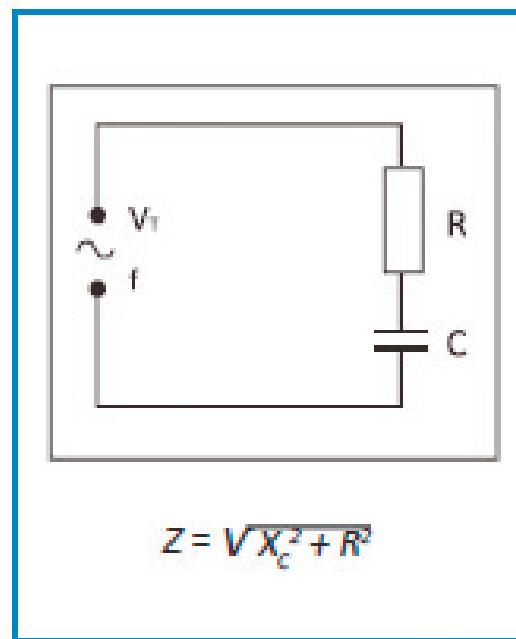


Figura 64 - Circuito RC em Série

Fonte: SENAI (2004, p. 109).

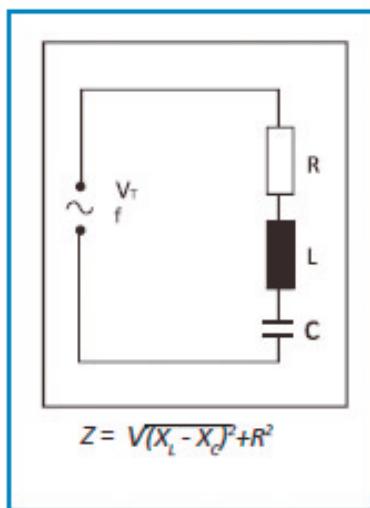


Figura 65 - Circuito RLC em Série
Fonte: SENAI (2004, p. 109)

Nos circuitos em paralelo, também podem ocorrer três situações distintas:

- resistor e indutor;
- resistor e capacitor; ou
- resistor, indutor e capacitor simultaneamente.

Resistor e indutor (circuito RL – paralelo)

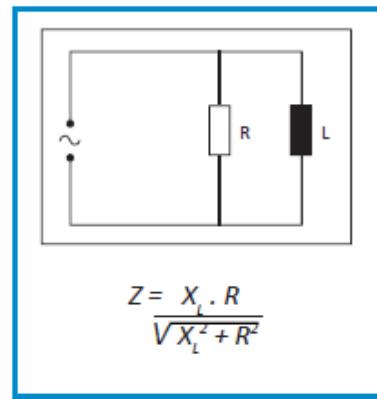


Figura 66 - Circuito RI em Paralelo
Fonte: SENAI (2004, p. 110)

Resistor e capacitor (circuito RC – paralelo)

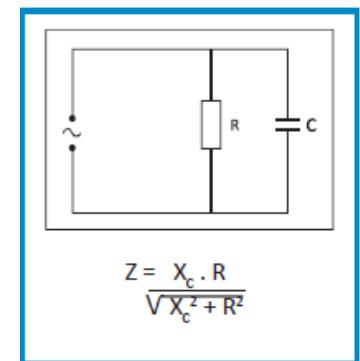


Figura 67 - Circuito RC em Paralelo
Fonte: SENAI (2004, p. 110)

Resistor indutor e capacitor (circuito RLC – paralelo)

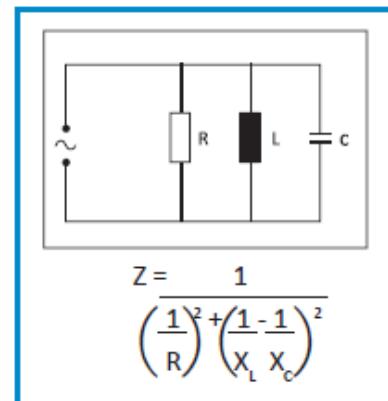


Figura 68 - Circuito RC em Paralelo
Fonte: SENAI (2004, p. 110)

Diagrama fasorial

Outra forma muito importante de se analisar a impedância em circuitos é por meio do diagrama fasorial, seja ele constituído pelos fasores que representam a tensão ou a corrente nos elementos que constituem o circuito.

Analise a seguir como fica a representação do diagrama fasorial de um circuito RL em série:

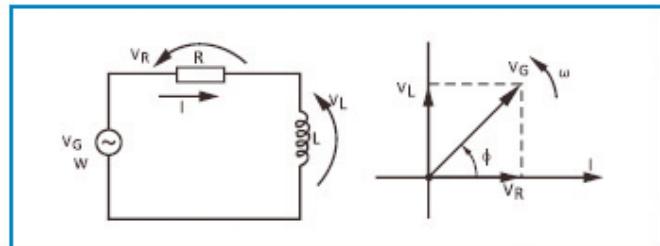


Figura 69 - Diagrama Fasorial Circuito RL em Série
Fonte: Batista ([200-?], p. 116).

Como você pode observar, no indutor a corrente está atrasada em 90° com relação à tensão (V_L). Como a corrente na resistência está em fase com a tensão V_R , ambas são representadas no mesmo eixo.

A tensão do gerador é obtida por meio de uma soma vetorial entre V_R e V_L , facilmente resolvida aplicando o teorema de Pitágoras.

A seguir visualize um diagrama fasorial de um circuito RC em série:

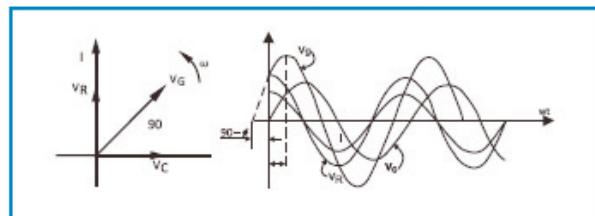


Gráfico 12 - Diagrama Fasorial Circuito RC em Série
Fonte: Batista ([200-?], p. 120).

Nesse diagrama é possível observar que a tensão no gerador está atrasada em relação à tensão no capacitor, mas está adiantada em relação à tensão no resistor. Também é possível observar que a tensão no gerador está em fase com a corrente no circuito e que o ângulo ϕ representa a defasagem entre a tensão no gerador e a tensão no resistor.

A seguir observe o diagrama fasorial de um circuito RC em paralelo:

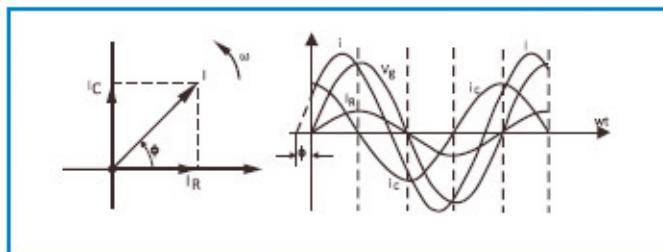


Gráfico 13 - Diagrama Fasorial Circuito RC em Paralelo

Fonte: Batista ([200-?], p. 122).

Observe no diagrama anterior que a corrente i do circuito está adiantada em relação à corrente i_C no capacitor, mas está atrasada em relação à corrente i_R no resistor. Observe também que a tensão no gerador está em fase com a corrente no resistor e que o ângulo ϕ representará a defasagem entre a tensão no gerador e a tensão no circuito.

Ao analisar um circuito RLC e construir o diagrama fasorial (imagem a seguir) para o circuito, deve-se observar que a tensão no resistor está em fase com a corrente. Já a tensão no indutor está adiantada de 90° em relação à corrente, e a tensão no capacitor está atrasada de 90° em relação à corrente.

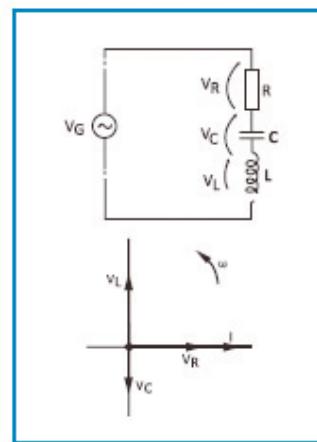


Figura 70 - Circuito RIC em Série

Fonte: Batista ([200-?], p. 123).

Pode-se observar que a tensão no indutor V_L está defasada de 180° em relação à tensão no capacitor V_C . Para obter a tensão resultante da soma das três tensões,

primeiramente, deve-se somar vetorialmente V_L com V_C , cujo resultado será simplesmente a subtração $V_L - V_C$, já que estão defasados de 180°.

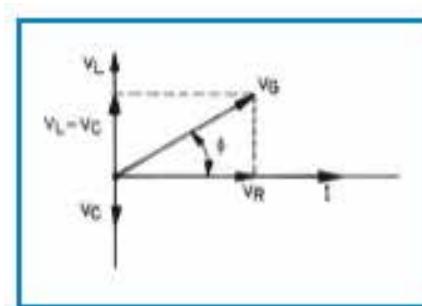


Gráfico 14 - Diagrama Fasorial Circuito RIC em Série

Fonte: Batista ([200-?], p. 124).

Uma vez realizada a subtração vetorial de $V_L - V_C$, pode-se determinar a tensão do gerador V_G realizando a soma vetorial do resultado anterior com a tensão no resistor V_R . Novamente, o ângulo ϕ representará a diferença de fase entre a tensão no gerador e a tensão no resistor.

Exemplo

Calcule a corrente, as quedas de tensão e o ângulo de fase em um circuito RL série, em que $R = 100 \Omega$ e $L = 0,4 \text{ H}$. A tensão da fonte é igual a 120 V, na frequência de 60 Hz. Em seguida, construa também o diagrama fasorial.

$$X_L = 2\pi f L \rightarrow X_L = 2\pi \cdot 60 \cdot 0,4 \rightarrow X_L = 150,8 \Omega$$

$$Z = \sqrt{R^2 + X_L^2} \rightarrow Z = \sqrt{100^2 + 150,8^2} \rightarrow Z = 80,94 \Omega$$

$$i = \frac{V}{Z} \rightarrow i = \frac{120}{180,94} \rightarrow i = 0,66 A$$

$$V_R = R \cdot i \rightarrow V_R = 100 \cdot 0,66 \rightarrow V_R = 66 V$$

$$\tan \phi = \frac{X_L}{R} \rightarrow \tan \phi = \frac{150,8}{100} \rightarrow \phi = \arctan 1,508 \rightarrow \phi = 56,5^\circ$$

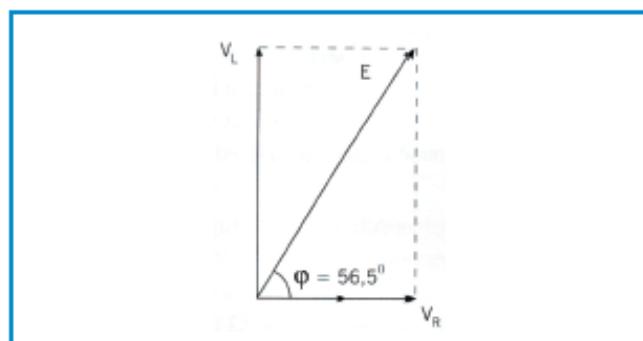


Gráfico 15 - Diagrama Fasorial

Fonte: Wolski (2007, p. 139).

Exemplo

Um circuito RC série, composto de uma capacidade de $20 \mu\text{F}$ e uma resistência de 70Ω , é submetido a uma tensão de 100 V na frequência de 60 Hz . Determine a corrente, as quedas de tensão, o ângulo de fase e construa o diagrama fasorial.

$$X_C = \frac{1}{2\pi f L} \rightarrow X_C = \frac{1}{2\pi \cdot 60 \cdot 20 \cdot 10^{-6}} \rightarrow X_C = 132,6 \Omega$$

$$Z = \sqrt{R^2 + X_C^2} \rightarrow Z = \sqrt{70^2 + 132,6^2} \rightarrow Z = 149,9 \Omega$$

$$i = \frac{V}{Z} \rightarrow i = \frac{120}{149,9} \rightarrow i = 0,67 \text{ A}$$

$$V_R = R \cdot i \rightarrow V_R = 70 \cdot 0,67 \rightarrow V_R = 46,9 \text{ V}$$

$$V_C = -X_C \cdot i \rightarrow V_C = -132,6 \cdot 0,67 \rightarrow V_C = -88,8 \text{ V}$$

$$\text{sen}\varphi = \frac{X_C}{R} \rightarrow \text{sen}\varphi = \frac{132,6}{149,9} \rightarrow \varphi = \arcsen = 0,8846 \rightarrow \varphi = 62,2^\circ$$

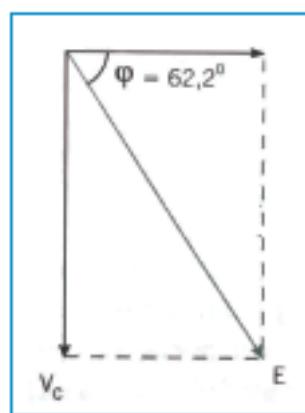


Gráfico 16 - Diagrama FasorialFonte: Wolski (2007, p. 142).

Exemplo

Um circuito RLC série é composto de uma resistência de 250Ω , uma reatância indutiva de 300Ω e uma reatância capacitiva igual a 150Ω ligadas a uma fonte CA de 220 V . Determine a corrente, as quedas de tensão, o ângulo de fase e construa o diagrama fasorial.

$$Z = \sqrt{R^2 + (X_L - X_C)^2} \rightarrow Z = \sqrt{250^2 + (300 - 150)^2} \rightarrow Z = 291,5 \Omega$$

$$i = \frac{V}{Z} \rightarrow i = \frac{220}{291,5} \rightarrow i = 0,75 \text{ A}$$

$$V_R = R \cdot i \rightarrow V_R = 250 \cdot 0,75 \rightarrow V_R = 187,5 \text{ V}$$

$$V_C = X_C \cdot i \rightarrow V_C = -300 \cdot 0,75 \rightarrow V_C = -225 \text{ V}$$

$$V_C = -X_C \cdot i \rightarrow V_C = -150 \cdot 0,75 \rightarrow V_C = -112,5 \text{ V}$$

$$\cos\varphi = \frac{R}{Z} \rightarrow \cos\varphi = \frac{250}{291,5} \rightarrow \varphi = \arccos = 0,8576 \rightarrow \varphi = 30,9^\circ$$

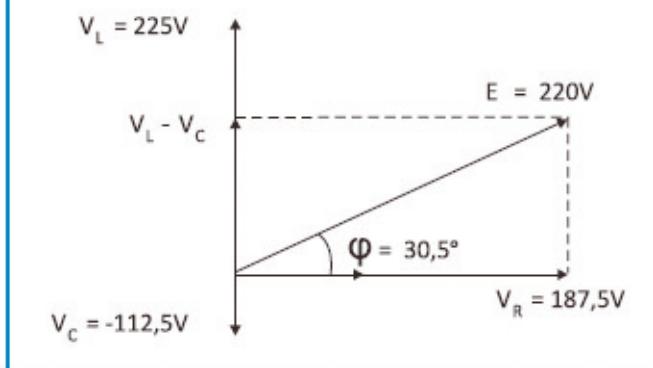


Gráfico 17 - Diagrama FasorialFonte: Wolski (2007, p. 144).

4.3 POTÊNCIA EM CORRENTE ALTERNADA

Na maioria das instalações elétricas ocorrem perdas nos circuitos elétricos, e as principais são:

• **perdas por efeito joule** – são provocadas pela passagem de corrente elétrica por meio de condutores, ocasionando seu aquecimento. Aparecem em todos os componentes do circuito: transformadores, condutores, motores, lâmpadas, etc. Estas perdas são, sem dúvida, as mais significativas, variando com o quadrado da corrente elétrica;

• **perdas por histerese** – são provocadas pela imantação remanescente do ferro, manifestando-se em todos os circuitos magnéticos submetidos a campos alternados: trafos, motores, reatores, etc.;

• **perdas por correntes de Foucault** – são originadas pelas correntes parasitas induzidas. Tornam-se mais significativas nos circuitos magnéticos de maior porte e nos condutores de maior seção.

Quando se fala em instalações elétricas em CA, deve-se saber que todos os equipamentos que possuem um circuito magnético (motores, trafo, etc.) absorvem dois tipos de energia: a ativa e a reativa:

• **potência ativa (efetiva)** – é aquela que efetivamente produz trabalho. Exemplo: a rotação do eixo do motor;

• **potência reativa** – é aquela que, apesar de não possuir trabalho efetivo, é indispensável para produzir o fluxo magnético necessário ao funcionamento dos motores, transformadores, etc.;

• **potência aparente** – cada uma dessas potências corresponde a uma corrente, também denominada ativa e reativa. Essas duas correntes se somam vetorialmente para formar uma potência aparente. Esta, embora chamada aparente, é bastante real, percorrendo os diversos condutores do circuito, provocando seu aquecimento, e, portanto, gerando perdas por efeito joule.

As equações que permitem determinar as potênc-

cias podem ser obtidas a partir do diagrama fasorial de tensões e corrente de um circuito RLC série, formando assim o chamado diagrama de potências. O diagrama de potências costuma ser representado em forma de triângulo, obtendo-se assim o chamado triângulo de potências, como você pode observar na imagem a seguir.

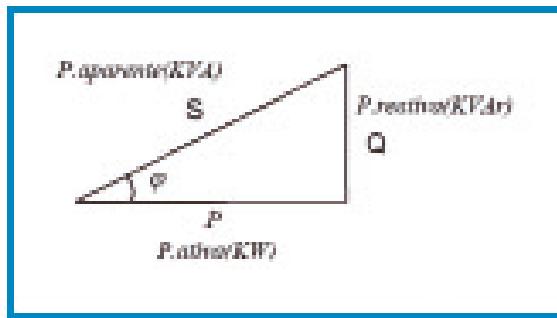


Figura 71 - Triângulo de Potências Fonte: SENAI (2004, p. 116).

Observe que a potência reativa (Q) corresponde à diferença entre a potência reativa indutiva e a potência capacitiva. Portanto, dependendo dos valores de capacidade e de indutância do circuito, pode-se ter a potência reativa capacitativa maior que a indutiva. Nesse caso, o triângulo de potências fica voltado para baixo. Veja!

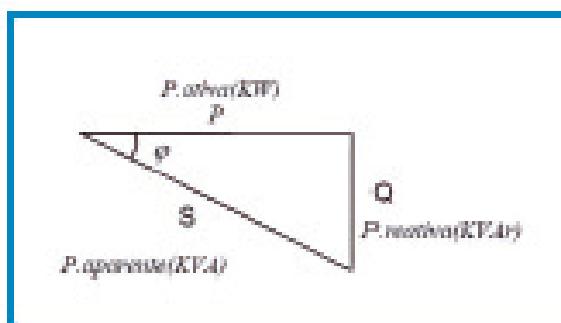


Figura 72 - Triângulo de Potências Fonte: adaptado de SENAI (2004).

É importante salientar aqui as unidades correspondentes a cada tipo de potência, confira:

P (potência ativa) → W;
Q (potência reativa) → VAr;
S (potência aparente) → VA.

Veja que é possível obter várias relações entre os três tipos de potência aplicando o teorema de Pitágoras e as relações trigonométricas:

$$S^2 = P^2 + Q^2 \rightarrow S = \sqrt{P^2 + Q^2} \quad Q = i^2(X_L - X_C) \quad P = \frac{V_R^2}{R}$$

$$\text{sen } \varphi = \frac{Q}{S} \rightarrow Q = S \cdot \text{sen } \varphi \quad P = i^2 \cdot R \quad S = \frac{V^2}{Z}$$

$$\cos \varphi = \frac{P}{S} \rightarrow P = S \cdot \cos \varphi \quad S = i^2 \cdot Z \quad \text{Digite a equação aqui.}$$

$$\tan \varphi = \frac{Q}{P} \rightarrow Q = P \cdot \tan \varphi \quad Q = \frac{(V_L - V_C)^2}{X_L - X_C}$$

Exemplo

Calcule a potência ativa, reativa e aparente de um circuito RC série, em que $R = 150 \Omega$ e $X_C = 300 \Omega$, ligados a uma fonte CA de 200 V. Construa também o triângulo de potências.

$$X_C = \frac{1}{2\pi \cdot f \cdot L} \rightarrow X_C = \frac{1}{2\pi \cdot 60 \cdot 20 \cdot 10^{-6}} \rightarrow X_C = 132,6\Omega$$

$$Z = \sqrt{R^2 + X_C^2} \rightarrow Z = \sqrt{70^2 + 132,6^2} \rightarrow Z = 149,9\Omega$$

$$\tan \varphi = \frac{X_C}{R} \rightarrow \tan \varphi = \frac{300}{150} \rightarrow \varphi = 63,43^\circ$$

$$S = V \cdot I \rightarrow S = 200 \cdot 0,6 \rightarrow S = 120 \text{VA}$$

$$P = S \cdot \cos \varphi \rightarrow P = 120 \cdot \cos(-63,43^\circ) \rightarrow P = 53,67 \text{W}$$

$$Q = S \cdot \text{sen } \varphi \rightarrow Q = 120 \cdot \text{sen}(-63,43^\circ) \rightarrow Q = -107,33 \text{VAr}$$

$P = 53,67 \text{ W}$
 $S = 120 \text{ VA}$
 $Q = -107,33 \text{ VAr}$

Figura 73 - Triângulo de Potências

Fonte: Wolski (2007, p. 153).

FATOR DE POTÊNCIA

Fator de potência é o cosseno do ângulo de defasagem entre a corrente e a tensão. Se o circuito for indutivo (consumidor de energia reativa), o fator de potência é dito em atraso. Se o circuito for capacitivo (fornecedor de energia reativa), é dito em avanço.

$$P = V \times I \times \cos \varphi \text{ (W)}$$

$$Q = V \times I \times \text{sen } \varphi \text{ (VAr)}$$

Outra forma de se determinar o fator potência é fazendo a razão entre a potência ativa (P) e a potência aparente (S):

$$\frac{P}{S} = \text{fator de potência}$$

Como o valor do fator de potência corresponde ao cosseno do ângulo de defasagem entre corrente e tensão, é possível determinar o valor desse ângulo fazendo a função inversa do cosseno:

$$\arccos\left(\frac{P}{S}\right) = \text{ângulo de desasagem entre } i \text{ e } V$$

Quando o fator de potência é inferior a uma unidade, existe um consumo de energia aplicada na produção da indução magnética.

Em uma instalação com baixo fator de potência para produzir uma potência ativa P é preciso uma potência aparente S maior, o que onera essa instalação com o custo mais elevado de cabos e equipamentos. Dessa forma, quanto mais baixo for o fator de potência, maiores deverão ser, portanto, as seções dos condutores e as capacidades dos transformadores e dos disjuntores.

Quando um circuito possui baixo fator de potência, tem-se alto valor de potência reativa (Q), obrigando assim a fonte geradora a fornecer mais potência aparente (S) do que realmente seria necessário.

DICA

Por isso as concessionárias de energia não permitem instalações industriais com fator de potência inferior a 0,92 (Portaria nº. 1.569-93 do DNAEE), cobrando, inclusive, multas daquelas indústrias cujas instalações possuem um fator de potência abaixo de 0,92.

Observe a seguir uma tabela com equações para determinação de algumas grandezas.

Para obter	Corrente contínua	Corrente monofásico	Alternada trifásico
I (ampéres), P (CV)	$\frac{P \times 736}{V \times n}$	$\frac{P \times 736}{V \times n \times \cos\phi}$	$\frac{P \times 736}{V \times \sqrt{3} \times n \times \cos\phi}$
I (ampère), P (KW)	—	$\frac{KW \times 1000}{V \times n \times \cos\phi}$	$\frac{KW \times 1000}{V \times \sqrt{3} \times n \times \cos\phi}$
KW	$\frac{I \times U}{1000}$	$\frac{I \times V \cos\phi \times n}{1000}$	$\frac{I \times V \times \sqrt{3} \cos\phi \times n}{1000}$
KVA	—	$\frac{I \times V}{1000}$	$\frac{I \times V \times \sqrt{3}}{1000}$

Tabela 11 - Fórmulas para Determinação De I (A), P (Cv),
Fonte: SENAI (2004, p. 117).

Exemplo

Em uma indústria a potência ativa ou efetiva é de 150 KW. O fator de potência é igual a 0,65 em atra-

so. Qual é a corrente que está sendo demandada à rede trifásica de 220 V, e qual seria a corrente se o fator de potência fosse igual a 0,92?

$$\phi_1 = \arccos 0,65 = 49,46^\circ$$

$$\phi_2 = \arccos 0,92 = 23,07^\circ$$

1º caso: $KVA = 150/0,65 = 231$ KVA, para $\phi_1 = 0,65$

2º caso: $KVA = 150/0,92 = 163$ KVA, para $\phi_2 = 0,92$

$$i_1 = \frac{231 \cdot 1000}{220 \cdot \sqrt{3}} = 606A \quad i_2 = \frac{163 \cdot 1000}{220 \cdot \sqrt{3}} = 428A$$

Como você pôde observar, haverá uma redução na corrente ($606 - 428 = 178$ A), com o fator de potência igual a 0,92. Assim, a queda de tensão nos condutores diminui e melhora a eficiência de todo o sistema ligado à rede.



Figura 74 - Banco de Capacitores para Correção de Fator de Potência

Fonte: Batista ([200-?], p. 131).

Exemplo

Uma indústria tem instalada uma carga de 200 KW. Verificou-se que o FP (fator de potência) é igual a 85% (em atraso).

Considerando esses dados, qual deverá ser a potência (KVar) de um capacitor que, instalado, venha a reduzir a potência reativa, de modo que o fator de potência atenda às prescrições da concessionária, isto é, seja igual (no mínimo) a 0,92?

$$Q_1 = P \cdot \tan \phi_1$$

$$Q_2 = P \cdot \tan \phi_2$$

Para se reduzir a potência de Q_1 para Q_2 , você deve ligar uma carga capacitativa igual a:

$$Q_c = Q_1 - Q_2 = P (\tan \phi_1 - \tan \phi_2)$$

Assim você terá:

$$\cos \phi_1 = 0,85 \rightarrow \phi_1 = 31,78^\circ \text{ e}$$

$$\tan \phi_1 = 0,619$$

$$\cos \phi_2 = 0,92 \rightarrow \phi_2 = 23,07^\circ \text{ e}$$

$$\tan \phi_2 = 0,425$$

Logo:

$$Q_c = P (\tan \phi_1 - \tan \phi_2) = 200 (0,619 - 0,425) = 38,8 \text{ KVar}$$

CORREÇÃO DO FATOR DE POTÊNCIA

Quando uma rede tem um fator de potência inferior a 0,92, é necessário melhorar esse fator de potência para atender às exigências da concessionária e alcançar economia na despesa com a energia elétrica. Tal melhoria pode ser conseguida instalando capacitores em paralelo com a carga, de modo a reduzirem a potência reativa obtida da rede externa, pois compensam a natureza indutiva do subsistema de transmissão e a maior parte de suas cargas.

Em cargas indutivas a tensão possui fase adiantada em relação à corrente, significando um fator de potência menor que a unidade. Dessa forma, a companhia de distribuição tem que fornecer maior quantidade de corrente. Adicionando capacitância ao circuito implicaremos num resultado mais eficiente no uso e na transferência de energia.

O chaveamento dos capacitores para correção do fator de potência pode causar problemas na qualidade da energia, principalmente se o banco de capacitores está localizado próximo à carga. Quando isso ocorre, a única solução é fazer um novo arranjo dos alimentadores com a finalidade de adicionar perdas na linha entre os capacitores e a carga.

Finalizando

O estudo desta unidade curricular de eletricidade teve como objetivo desenvolver conhecimentos, habilidades e atitudes necessárias para fornecer a você condições básicas para a sua evolução no restante do curso. As informações estudadas neste material didático ofereceram subsídios para que você possa ter conhecimentos mínimos necessários com relação à eletricidade, porém isso não representa o todo. Certamente a realização de atividades experimentais, práticas laboratoriais e pesquisas contribuirão muito para um aprofundamento e melhor construção do conhecimento.

A você, caro aluno, caberá distinguir os diferentes recursos das tecnologias disponíveis e buscar novas alternativas, não estando preso ao que os materiais didáticos e livros podem lhe oferecer. Estamos convictos de que o processo de ensino-aprendizagem ocorre, em grande parte, pela sua dedicação e pela qualidade das informações que estão à sua disposição.

Por isso, tendo apenas como referência este material didático, você deve se sentir livre para observar, exercitar e questionar os temas abordados, buscando sempre que necessário as orientações do seu professor, que é quem estará ao seu lado para auxiliá-lo em sua caminhada nesta unidade curricular.

Abraços, Patrick

Referências

- BATISTA, Rogério Silva. **Eletricidade Básica**. Belo Horizonte: Centro de Formação Profissional SENAI João Moreira Salles, [200?]. 151 p.
- CARVALHO, Geraldo Camargo de. FONSECA, Martha Reis Marques da. **Partículas do átomo**. 2009. Disponível em: <http://www.escolainterativa.com.br/canais/18_vestibular/estude/quimi/tem/img/atom01.gif>. Acesso em 11 out. 2009
- MINIPA. **Alicate amperímetro**. Disponível em: <<http://www.minipa.com.br/produtos/Default.aspx?Secao=19&cat=6&subcat=74>>. Acesso em: 07 out. 2009.
- MINIPA. **Multímetro**. Disponível em: <<http://www.minipa.com.br/produtos/Default.aspx?Secao=19&cat=6&subcat=74>>. Acesso em: 07 out. 2009.
- MUNDIM, Kleber Carlos. **Linhas de Força**. 1999. Disponível em: <<http://www.unb.br/iq/kleber/EaD/Eletromagnetismo/LinhasDeForca/LinhasDeForca.html>>. Acesso em: 25 out. 2009.
- PARANÁ, Djalma Nunes da Silva. Física: **eletricidade**. 6. ed. São Paulo: Ática, 1998. 431 p.
- PARIZZI, Jocemar Biasi. **Eletônica Básica**. 2. ed. Santa Maria, RS: Centro de Educação Profissional SENAI Roberto Barbosa Ribas, 2003. 101 p.
- RAMALHO JR, Francisco et. al. **Os fundamentos da física**. 8. ed. rev. e ampl. São Paulo: Moderna, 2003. 468 p.
- SATURNINO, Luis Fabiano. **Princípios de eletricidade**. [S. I.]: Centro de Formação Profissional SENAI Fidélis Reis, [200?]. 102 p.
- SERVIÇO NACIONAL DE APRENDIZAGEM INDUSTRIAL. SC. **Eletrotécnica**. Florianópolis, 2004. 140 p.
- SERVIÇO NACIONAL DE APRENDIZAGEM INDUSTRIAL. PR. **Eletricidade**. Curitiba, 2001. 142 p.
- VIEIRA JÚNIOR, Magno Estevam. **Eletricidade Básica**. Ouro Branco, MG: Unidade Operacional do SENAI MG Ouro Branco, 2004. 56 p.
- WOLSKI, Belmiro. **Curso técnico em eletrotécnica: eletricidade básica**, módulo 1, livro 3. Curitiba: Base Didáticos, c2007. 160 p.