

Eletricidade I



Sumário

1. Matéria e substância	05
<i>Moléculas e átomos</i>	06
<i>Prótons, nêutrons e elétrons</i>	06
<i>Equilíbrio de cargas elétricas</i>	07
<i>Medida da tensão elétrica</i>	09
<i>Corrente elétrica</i>	09
2. Grandezas elétricas	12
<i>Tensão e corrente elétrica</i>	13
<i>Amperímetro</i>	13
<i>Voltímetro</i>	17
<i>Sistema de medida da diferença de potencial</i>	20
<i>Condutância</i>	20
<i>Resistência</i>	20
<i>Ohmímetro</i>	22
3. Condutores, resistores e isolantes	27
<i>Resistência específica (resistividade)</i>	28
<i>Coeficiente de temperatura</i>	30
4. Circuito elétrico	32
<i>Componentes do circuito</i>	33
<i>Lei de Ohm</i>	34
<i>Circuito em série</i>	35
<i>Circuito em paralelo</i>	36

<i>Resistência equivalente</i>	37
<i>Ligaçāo em série</i>	37
<i>Ligaçāo em paralelo</i>	38
<i>Ligaçāo mista</i>	40
5. Potēncia em corrente contínua	41
<i>Sistema de medida da potēncia elétrica</i>	42
<i>Cálculo da potēncia elétrica em corrente contínua</i>	43
<i>Cálculo da potēncia sendo conhecido o valor da resistēcia</i>	43
<i>Cálculo da potēncia sem valor de E</i>	44
6. Potēncia mecânica	46
7. Energia elétrica	48
8. Ímās e magnetismo	52
<i>Campo magnético</i>	55
<i>Eletromagnetismo</i>	57
<i>Histerese</i>	61
9. Indução eletromagnética	62
<i>Lei de Lenz</i>	63
<i>Lei de Faraday</i>	64
<i>Força eletromotriz induzida</i>	65
<i>Auto-indução</i>	66
<i>Corrente de Foucault</i>	68
<i>Corrente alternada</i>	69
10. Resistēcia, indutânciā e capacitânciā	71

11. Defasagem entre a tensão e a corrente	75
<i>Reatância indutiva</i>	77
<i>Reatância capacitiva</i>	77
<i>Impedância</i>	78
<i>Corrente e tensão nos circuitos de CA</i>	81
12. Fator de potência	84
<i>Potência no circuito de CA</i>	87
13. Circuito trifásicos	91
<i>Círculo estrela (Y)</i>	92
<i>Círculo triângulo ou delta (Δ)</i>	93
<i>Potência nos circuitos trifásicos</i>	94
14. Transformadores	96
15. Transporte de energia elétrica	99

01 Matéria e Substância

Matéria é tudo que existe no universo, ou seja, é tudo o que tem massa e ocupa lugar no espaço.

A madeira, o vidro, a água são exemplos de matéria. No entanto, podemos perceber diferenças nessas matérias:

- o vidro é transparente, a madeira não.
- a água não tem forma própria.

Uma porção limitada de matéria constitui um corpo. Os corpos são formados por tipos particulares de matéria: as substâncias. Assim, a diferença entre o vidro, a madeira e a água ocorre porque cada tipo particular de matéria é uma substância com características próprias.

CURIOSIDADE

Algumas pessoas têm dificuldades com o conceito de MASSA, porque, no uso corrente, esta palavra pode significar um tamanho físico grande (“a massa de água” de uma onda do mar) ou mesmo números grandes (a massa de pessoas” presentes a um comício). No uso científico, porém, **a massa de um objeto é uma medida direta da quantidade de matéria desse objeto**. Assim: um ovo de galinha tem mais massa que um ovo de codorna.

O **grama** é uma **unidade de massa**, não de peso.

Peso é a força de atração gravitacional entre o objeto e a Terra. Assim, o peso de um objeto é maior no Pólo Norte ou no Sul do que no equador terrestre, porque como

a Terra é ligeiramente achatada nos pólos, estes são mais próximos do centro da Terra que qualquer ponto do equador.

Se não há força de gravidade, o peso de um corpo é nulo, apesar de sua massa permanecer inalterada.

Mais uma curiosidade: em português, o verbo pesar tanto pode significar determinar massa, como determinar peso.

Moléculas e átomos

Molécula é a menor parte de uma substância. As moléculas são partes tão pequenas, que não podem ser vistas mesmo com o auxílio dos microscópios.

Por exemplo: uma molécula de água é a menor quantidade de água que pode existir.

Ainda assim, cada molécula é constituída de átomos.

O que caracteriza uma molécula é o tipo de átomo que a constitui, a quantidade deles, e o modo como são combinados para construí-la.

Atualmente são conhecidos 103 tipos diferentes de átomos. Cada tipo recebeu um nome e tem características próprias.

Prótons, nêutrons e elétrons

Durante muito tempo se acreditou que o átomo fosse a menor parte da matéria. Tanto assim que o seu próprio nome (do grego **a** = sem e **tomo** = dividir) significa “o que não se pode dividir”.

Atualmente, sabe-se que o átomo se compõe de prótons, nêutrons e elétrons.

A estrutura do átomo consiste em um núcleo central, formado por dois tipos de partículas simples e indivisíveis: os prótons e os nêutrons. Os prótons têm carga elétrica positiva, e os nêutrons não têm carga.

Em volta desse núcleo gira um número variável de **partículas de carga elétrica negativa – os elétrons** – que realizam milhões de rotações por segundo.

O **núcleo positivo – prótons** – atrai os elementos negativos, impedindo que eles saiam de suas órbitas.

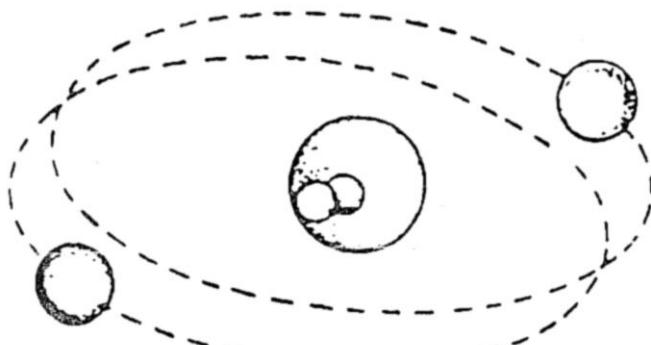


Fig. 1

Nota

O hidrogênio é o único elemento que tem apenas um próton no núcleo e um elétron em órbita.

Equilíbrio de cargas e elétricas

É importante saber que, em condições normais, o número de elétrons em torno de um núcleo é sempre igual ao número de prótons desse núcleo, havendo, portanto, **equilíbrio de cargas elétricas**.

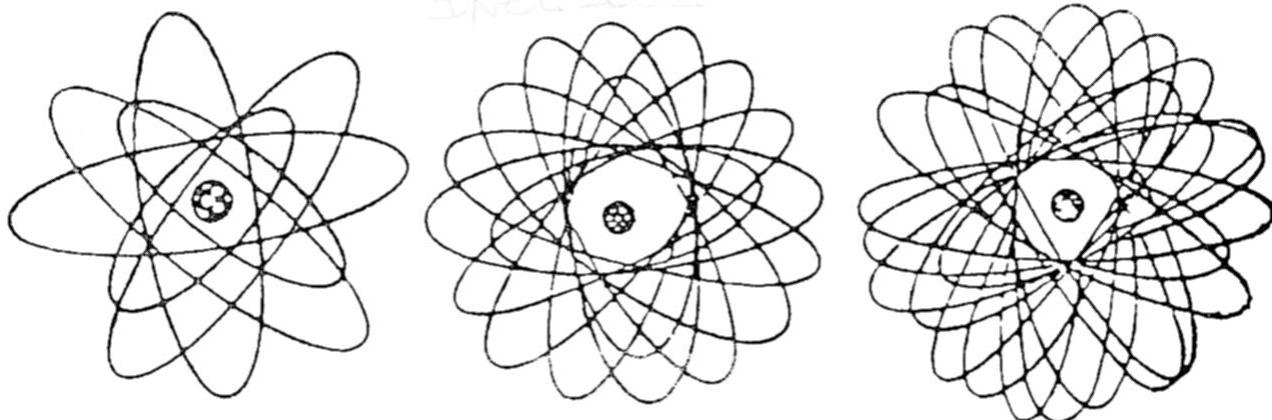


Fig. 2

É possível, porém, retirar ou acrescentar elétrons aos átomos de um corpo. Quando isso acontece, passa a existir uma diferença de cargas elétricas no átomo.

Dizemos, então, que o átomo está **eletrizado ou ionizado**.

Quando um átomo perde ou recebe elétrons, transforma-se um **íon**. Se ficar com falta de elétrons, será um íon positivo ou cátion. Se ficar com excesso de elétrons, será um íon negativo ou ânion.

Para esclarecimento, vejamos os seguintes exemplos:

- Um átomo de ferro tem 26 prótons e 26 elétrons. Se perder 3 elétrons, ficará com 26 prótons (carga positiva) e 23 elétrons (carga negativa) e será **íon positivo ou cátion**.
- Se o átomo de ferro receber 3 elétrons, ficará com 26 prótons (carga positiva) e 29 elétrons (carga negativa) e será **íon negativo ou ânion**.

Há vários processos para desequilibrar as cargas elétricas dos átomos de um corpo, criando uma diferença de potencial cuja tensão elétrica será tanto maior quanto maior for a diferença das cargas. No decorrer do curso, analisaremos os processos industriais. Porém, estudemos agora o primeiro processo de que se tem notícia: o de **eletrização por fricção**.

Sabe-se que, quando um corpo é friccionado com outro, ambos adquirem cargas elétricas.

Podemos constatar esse processo, fazendo a experiência que se segue:

- a – corta-se papel fino em partículas do menor tamanho possível.
- b – fricciona-se o lado de um pente num pedaço de flanela, seda ou lã, sempre no mesmo sentido.
- c – aproxima-se o pente das partículas de papel.

Conclusão: As partículas de papel são atraídas pelo pente.

CURIOSIDADE

Os aviões e as espaçonaves em movimento adquirem grande quantidade de carga elétrica pelo atrito entre a lataria e o ar atmosférico. Essas cargas vão sendo descarregadas pelas várias pontas existentes na superfície desses veículos: o bico, as asas e diversas hastes metálicas colocadas como proteção contra o acúmulo de cargas. Esse acúmulo poderia fazer explodir o avião, se uma faísca produzida pelo atrito se formasse nas proximidades do tanque de combustível, incendiando seus vapores.

Medida da tensão elétrica

Vimos que, sempre que se modifica a estrutura dos átomos de um corpo, este fica eletrizado. Se tivermos dois corpos com cargas elétricas diferentes, haverá entre eles uma diferença de potencial (d.d.p.) elétrico.

É importante, em todos os campos de aplicação da eletricidade, sabermos o valor da tensão da d. d. p. Para isso, existe a unidade de medida chamada volt, e um instrumento para medi-la, o voltímetro.

Corrente elétrica

Quando um átomo está ionizado, sua tendência é voltar ao estado de equilíbrio. Evidentemente, um corpo eletrizado tende a perder sua carga, libertando-se dos elétrons em excesso, ou procurando adquirir os elétrons que lhe faltam. Conclui-se, então, que basta unir corpos com cargas elétricas diferentes para que se estabeleça um fluxo de elétrons, que chamamos **corrente elétrica**.

Para se determinar a grandeza (**intensidade**) de uma corrente elétrica, tornou-se necessário estabelecer uma unidade-padrão.

Falar em elétrons que passam por segundo num condutor é impraticável, pois os números envolvidos nos problemas seriam enormes. A fim de se eliminar esse inconveniente, fez-se uso de uma unidade de carga elétrica – o **coulomb (C)** – que corresponde a $6,28 \times 10^{18}$ elétrons.

A intensidade de corrente elétrica é medida em **ampère** e corresponde à quantidade de **coloumbs** que passa por segundo em um condutor.

Uma intensidade de **1 coloumb por segundo** equivale a **1 ampère**.

O instrumento que mede a intensidade de corrente é o amperímetro.

Para entender o sentido da corrente elétrica, é bom recapitular as condições de cargas elétricas do átomo.

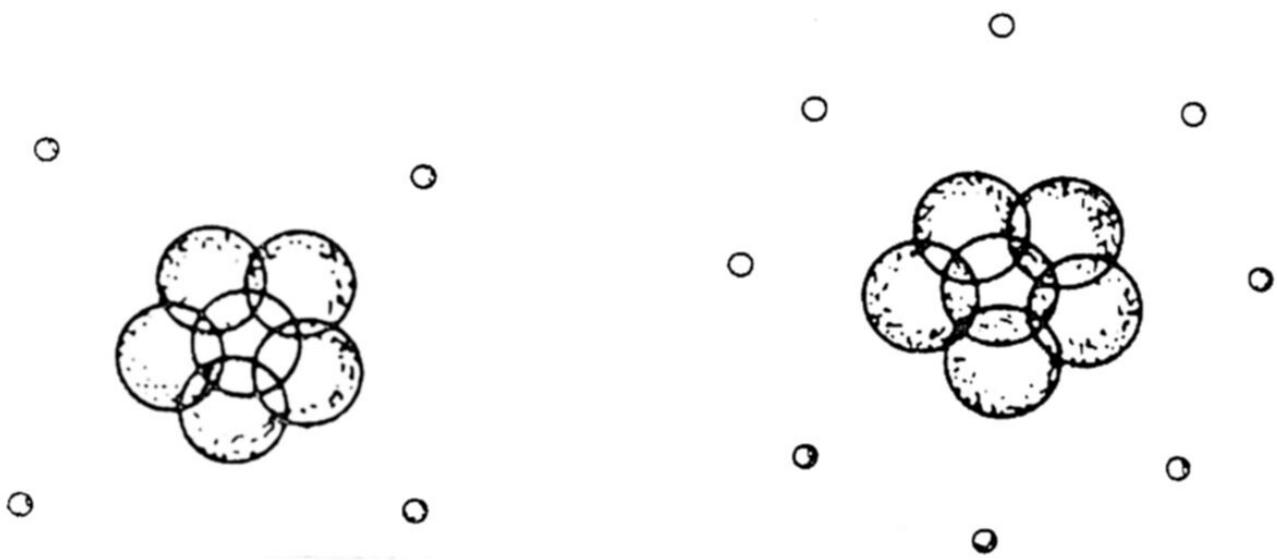


Fig. 3

Como se sabe, os prótons têm carga positiva, e os elétrons, cargas negativas. Se o átomo perde elétrons, ficará com carga negativa.

Se considerarmos as condições de carga dos átomos apresentados na figura acima, havendo ligações entre eles, o átomo B (-) cederá dois elétrons ao átomo A (+). Logo, o sentido da corrente elétrica é da carga negativa (-) para a carga positiva (+).

Entretanto, antes de ter alcançado esses conhecimentos sobre os átomos, o homem já fazia uso da eletricidade, e sabia que algo se movimentava produzindo a corrente elétrica. Por uma questão de interpretação, admitiu que o sentido da corrente elétrica fosse do positivo (+) para o negativo (-).

Para evitarmos dúvidas, sempre que considerarmos o sentido da corrente como sendo igual ao dos elétrons, diremos sentido eletrônico e, no caso oposto, sentido convencional ou clássico.

CURIOSIDADE

Você sabe por que durante uma tempestade as nuvens acumulam as cargas necessárias para produzir um raio? Qual a diferença entre raio e relâmpago? O que é o trovão?

A maneira pela qual uma nuvem acumula a quantidade de cargas elétricas necessárias para produzir um raio é um tema que ainda não foi totalmente compreendido. Acredita-se que durante uma tempestade a queda e ascensão de partículas de gelo e gotículas de água vão atritando as nuvens, formando em cada uma duas seções: uma com cargas elétricas positivas, outra com cargas elétricas negativas. A seção positiva fica sempre mais elevada que a negativa.

Separadas nestas seções, as cargas elétricas vão se acumulando nas nuvens, até que o ar atmosférico ofereça condições para seu escoamento. Inicialmente, esse escoamento se dá entre as duas seções de uma mesma nuvem ou entre uma seção de uma nuvem para a seção oposta de outra nuvem, fenômeno que percebemos como um clarão nas nuvens, denominado relâmpago.

Quase simultaneamente ao relâmpago, entre a nuvem mais baixa e



a Terra ocorre outra descarga elétrica, em ziguezague, que é o raio. Isso acontece porque as nuvens mais próximas (cujas cargas negativas estão voltadas para baixo) induzem cargas positivas na superfície da Terra; assim, nuvem e Terra passam a funcionar como duas seções de cargas opositas, até que a atmosfera propicie a descarga elétrica entre ambas. A temperatura dentro de um raio é de cerca de 30.000°C e aquecer o ar com tamanha intensidade que este se expande explosivamente, criando o estrondo do trovão.

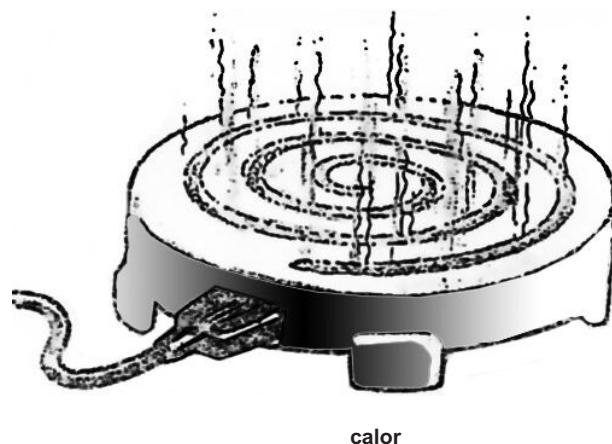
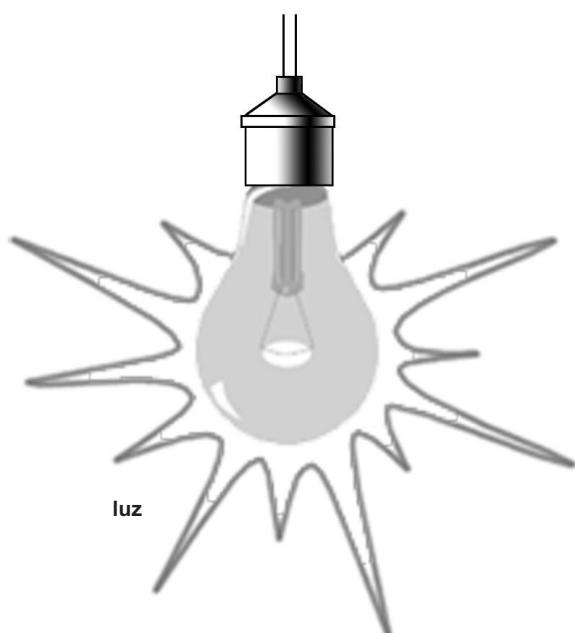


02

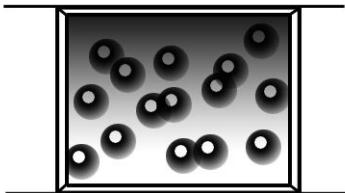
Grandezas Elétricas

Na realidade, a eletricidade é invisível.

O que percebemos são seus efeitos, como:

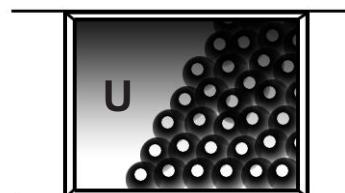


choque elétrico

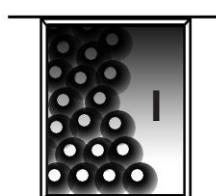


Tensão e Corrente elétrica

Nos fios, existem partículas invisíveis chamadas *elétrons livres*, que estão em constante movimento de forma desordenada.



Para que estes elétrons livres passem a se movimentar de forma ordenada, nos fios, é necessário haver uma força que os empurre. A esta força é dado o nome de *tensão elétrica* (U).



Esse movimento ordenado dos elétrons livres nos fios, provocado pela ação da tensão, forma uma corrente de elétrons. Essa corrente de elétrons livres é chamada de *corrente elétrica* (I).

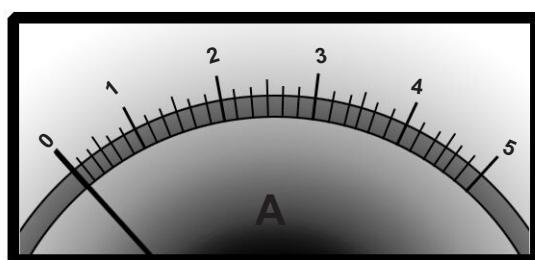
Pode-se dizer então que:

Tensão: é a força que impulsiona os elétrons livre nos fios. Sua unidade de medida é o *volt* (V)

Corrente elétrica: é o movimento ordenado dos elétrons livres nos fios. Sua unidade de medida é o *ampère* (A)

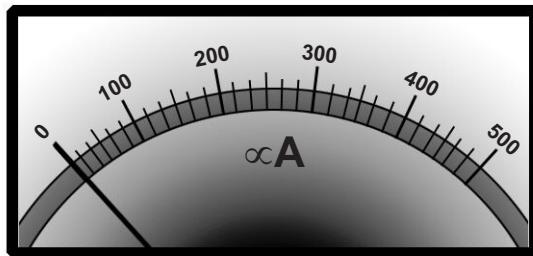
Amperímetro

O amperímetro (figura abaixo), é um aparelho destinado a realizar medições da intensidade da corrente elétrica em ampère.

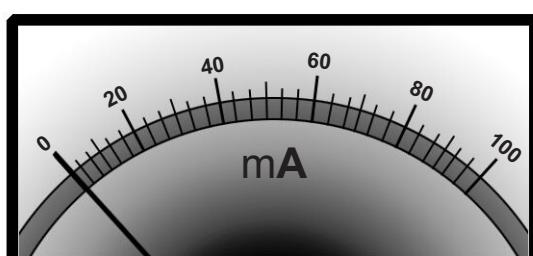


Como a corrente elétrica pode também ser medida em microampère, miliampère ou quiloampère, temos ainda:

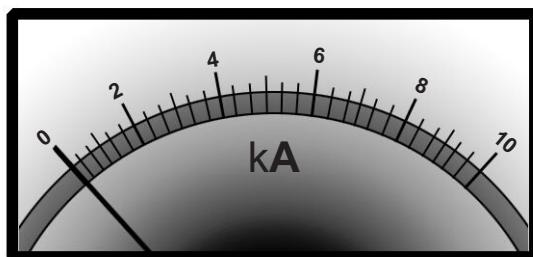
Microamperímetro – destinado a realizar medições da amperagem em microampères;



Miliampérmeter – destinado a realizar medições da amperagem em miliampères;

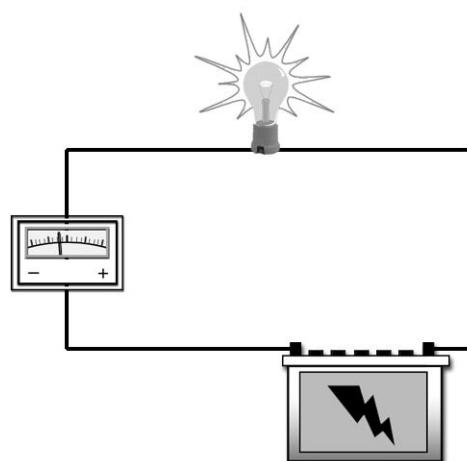


Quiloamperímetro – destinado a realizar medições da amperagem em quiloampères.

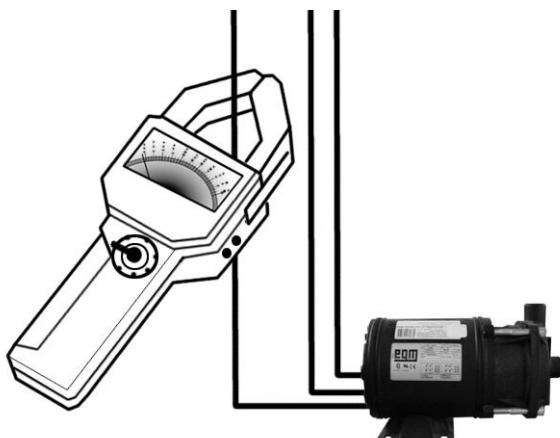


As ilustrações a seguir mostram como se ligam os amperímetros para a medição da intensidade da corrente elétrica.

Os amperímetros comuns são ligados aos condutores do circuito:



Outros modelos não têm necessidade de ser incluídos no circuito, pois atuam pelo efeito magnético produzido pela passagem da corrente elétrica.

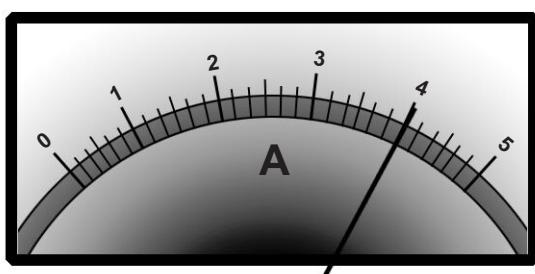


O amperímetro da figura ao lado é chamado de amperímetro-alicate e, normalmente, apresenta múltipla escala, cujas variações se medem em graus de 1,10 ou 100. Para a leitura ser definida numa escala escolhida, usa-se o seletor.

Para que você aprenda a ler o amperímetro, observe a ilustração abaixo:

O amperímetro está marcando 4A (4 ampères).

Vamos ver por quê.



Observe, no aparelho, logo abaixo do ponteiro, a letra A. Isto indica que a leitura deve ser feita em ampère. Observe, depois, que o ponteiro está coincidindo com o número 4 da escala; portanto, lemos $I = 4A$ (corrente é igual a 4 ampère).

Análise da equivalência entre a unidade (ampère), seus submúltiplos e seu múltiplo

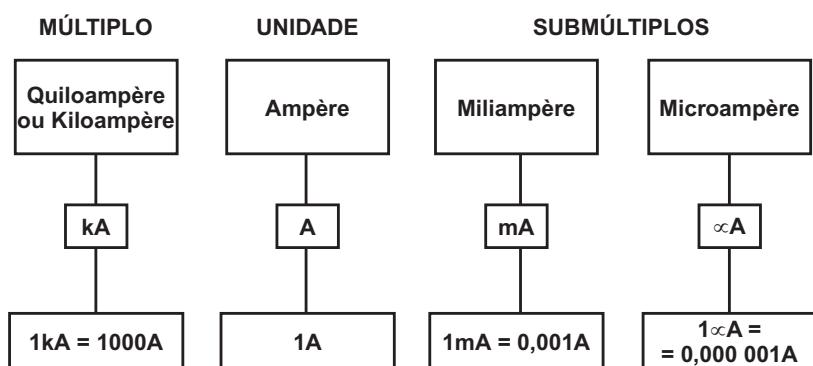
MICROAMPÈRE (μA)	MILIAMPÈRE (mA)	AMPÈRE (A)	QUILOAMPÈRE (kA)
6 500 000	6 500	6,5	0,0065
8 800 000	8 800	8,8	0,0088
11 700 000	11 700	11,7	0,0117
500 000 000	500 000	500	0,5
3 000 000 000	3 000 000	3 000	3
5 000	5	0,005	0,00005
108 000 000 000	108 000 000	108 000	108

Importante

Por ser medida em ampère, costuma-se chamar a intensidade da corrente elétrica de AMPERAGEM.

Para melhor fixação do ampère, seus múltiplos e seus submúltiplos, veja o quadro-resumo abaixo:

Sistema de Medida da Intensidade da Corrente Elétrica (Amperagem) I



Curiosidade

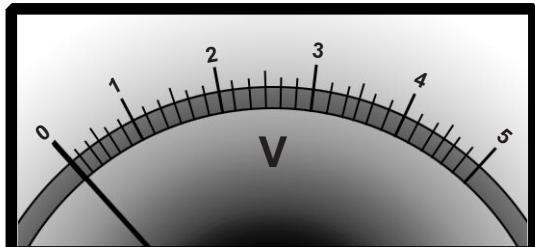
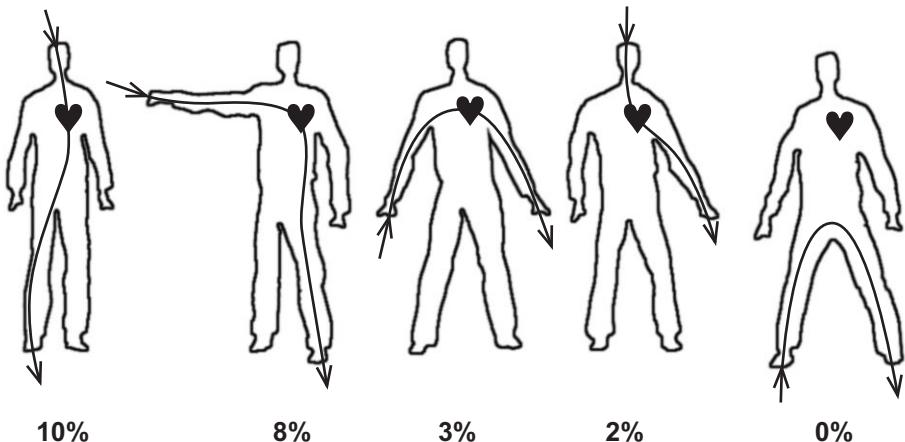
1- Choque elétrico

A gravidade do choque elétrico – que age diretamente no sistema nervoso do corpo humano, podendo provocar desde pequenas contrações musculares até a morte – é determinada tanto pela intensidade da corrente elétrica como pelo caminho que ela percorre no corpo da pessoa.

A menor intensidade da corrente que percebemos como um formigamento é de 1mA (miliampère). Uma corrente com intensidade de 10mA faz a pessoa perder o controle muscular. O valor entre 10mA até 3A pode ser mortal se atravessar o tórax da pessoa, pois atinge o coração, modificando seu ritmo e fazendo com que ele pare de bombear o sangue; a pessoa então pode morrer em poucos minutos. Intensidades acima de 3A levam à morte certa por asfixia em poucos segundos.

O choque mais grave é o que atravessa o tórax, pois afeta o coração. Nesse caso, mesmo uma intensidade não muito alta da corrente pode ser fatal. Por outro lado, uma corrente de alta intensidade que circule de uma perna a outra pode resultar só em queimaduras locais, sem lesões mais sérias.

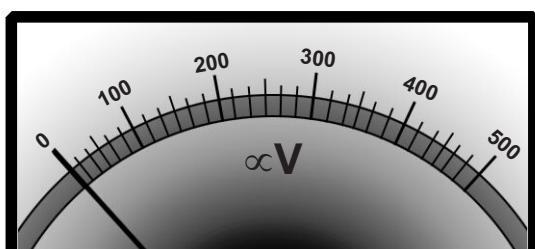
O quadro abaixo mostra a porcentagem da corrente elétrica que passa pelo coração em função do tipo de contato.



Voltímetro

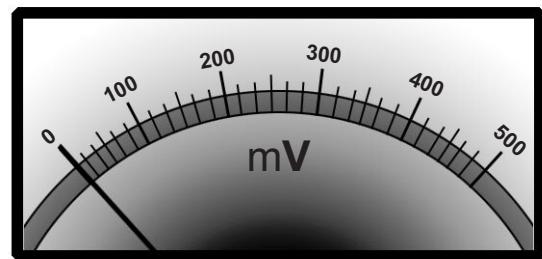
O voltímetro é um aparelho destinado a realizar medições da tensão elétrica, em volts.

Como a tensão elétrica pode ser medida em microvolt, milivolt ou quilovolt, temos ainda:

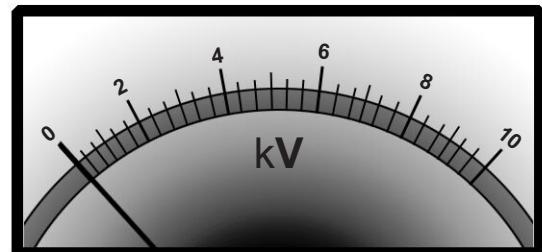


Microvoltímetro – destina-se a realizar medições da tensão elétrica em microvolts.

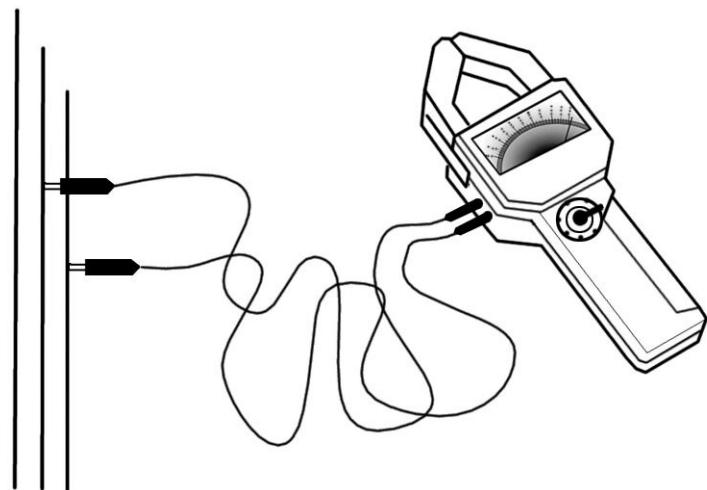
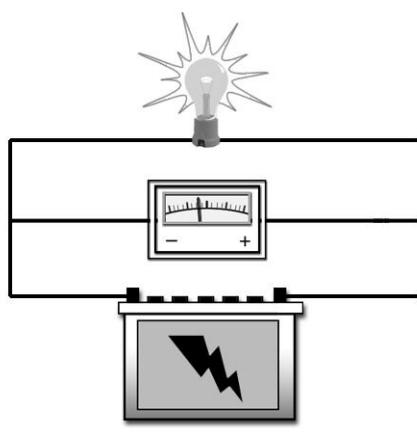
Milivoltímetro – Destina-se a realizar medições da tensão elétrica em milivolts.



Quilovoltímetro – destina-se a realizar medições da tensão elétrica em quilovolts.



Para medição de tensão elétrica, os dois tipos de aparelhos são ligados da mesma maneira, como mostram as seguintes ilustrações:



A leitura do voltímetro é feita da mesma maneira que a leitura do amperímetro. Lê-se a medida, indicada pelo ponteiro, e a grandeza, cujo símbolo aparece no mostrador.

Tabela de equivalência entre a unidade (volt), suas submúltiplos e seu múltiplo.

MICROVOLT(µV)	MILIVOLT (mV)	VOLT (V)	QUILOVOLT(kV)
2 000 000 000	2 000 000	2 000	2
30 000 000 000	30 000 000	30 000	30
3 500 000 000	3 500 000	3 500	3,5
7 800 000 000	7 800 000	7 800	7,8
5 000 000 000	5 000 000	5 000	5
8 000 000 000	8 000 000	8 000	8
12 000 000 000	12 000 000	12 000	12
1 100 000 000	1 100 000	1 100	1,1

Importante

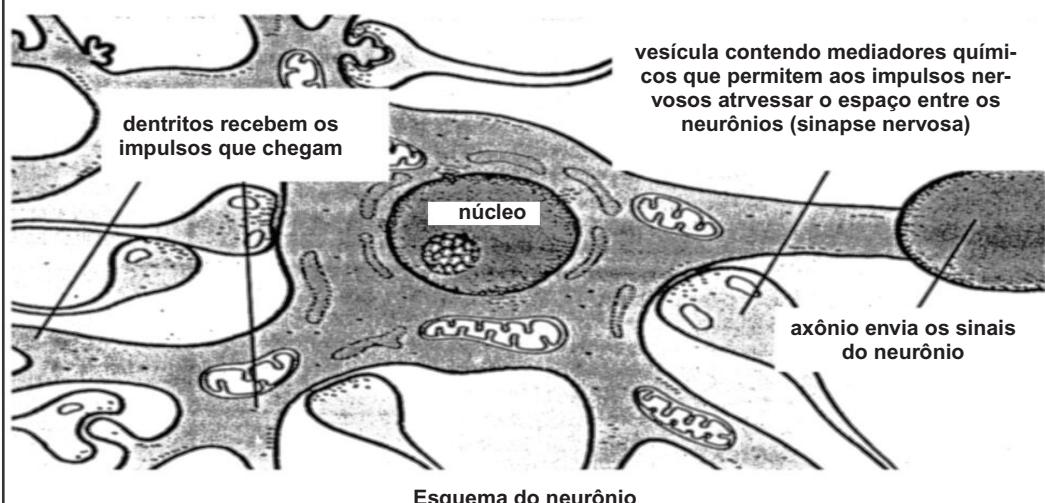
Por ser medida em volts, costuma-se chamar a tensão elétrica de VOLTAGEM, representada pela letra E.

Curiosidade

Através de sinais elétricos que viajam pelo nosso sistema nervoso, o cérebro recebe as impressões dos sentidos e envia instruções para os diferentes sistemas do corpo.

A voltagem dos impulsos nervosos é de menos de 0,1V; a velocidade com que se transmitem é de até 100m/s. Isso significa menos de 0,04s entre o momento em que um órgão sensorial é estimulado e aquele em que o comando do cérebro chega aos sistemas que devem ser acionados.

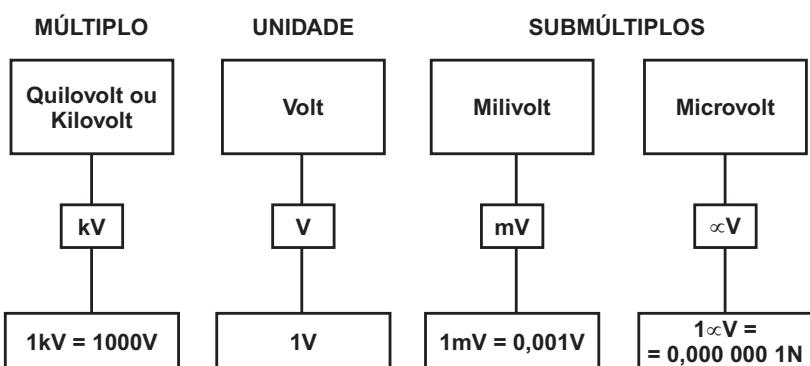
Os componentes fundamentais de nosso sistema nervoso são os neurônios. Neste existem prolongamentos, chamados axônios, revestidos por uma proteína chamada mielina, que funciona como a capa de isolamento dos fios elétricos.



A extremidade de cada neurônio ramifica-se em estruturas chamadas dendritos. Entre os dendritos de dois neurônios, há um minúsculo intervalo, denominado sinapse, no qual se processa a comunicação entre uma célula nervosa e outra. A transmissão da informação nervosa, pela sinapse, acontece quimicamente, não eletricamente.

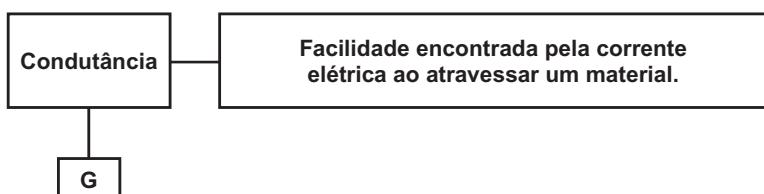
As correntes elétricas que acompanham a atividade cerebral podem ser registradas por aparelho de eletroencefalograma.

Sistema de Medida da Diferença de Potencial (Tensão ou voltagem)



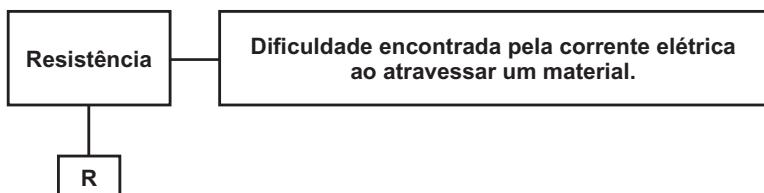
Condutância

A facilidade que a corrente elétrica encontra, ao percorrer os materiais, é chamada de *condutância*. Essa grandeza é representada pela letra G.



Resistência

Os materiais sempre oferecem certa oposição à passagem da corrente elétrica. Essa dificuldade que a corrente elétrica encontra ao percorrer um material é a *resistência elétrica*, normalmente representada pela letra R.

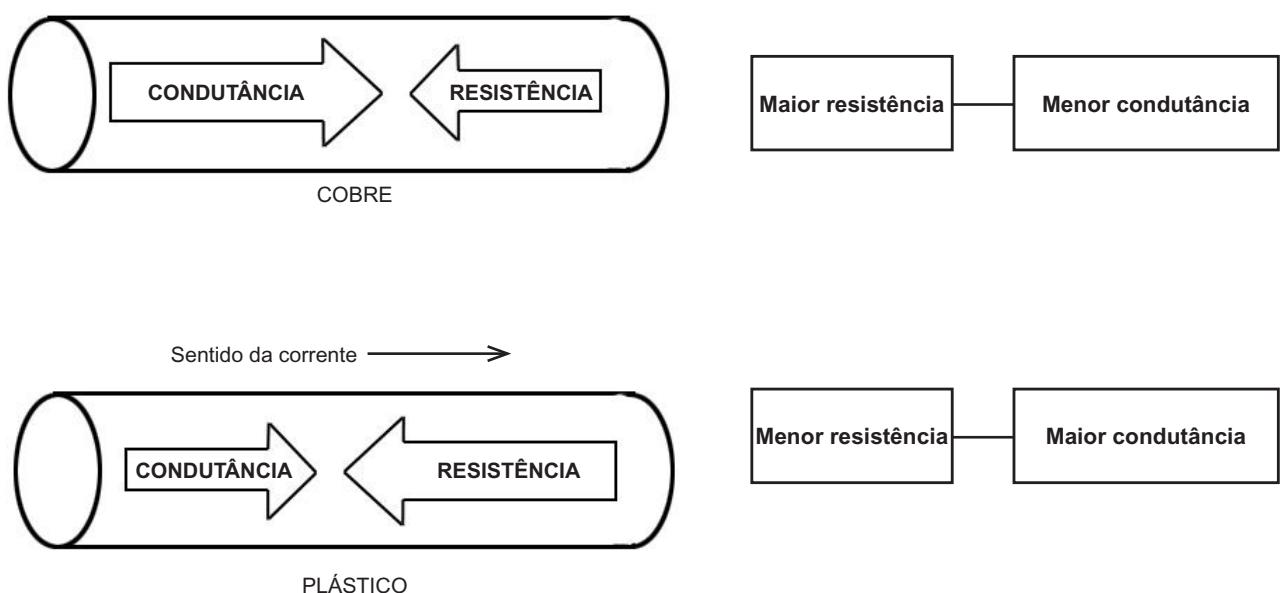


Todo material condutor de corrente elétrica apresenta certo grau de condutância e de resistência. Quanto maior for a condutância do material, menor será sua resistência. Se o material oferecer resistência, proporcionalmente apresentará pouca condutância.

A condutância é o inverso da resistência.

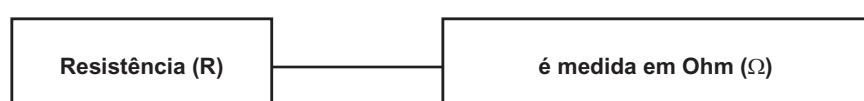
A condutância e a resistência elétrica se manifestam com maior ou menor intensidade nos diversos tipos de materiais.

Por exemplo: no cobre, a condutância é maior que a resistência. Já no plástico, a resistência é muito maior que a condutância.



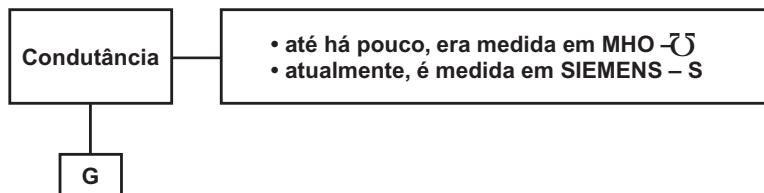
A *condutância* e a *resistência* são grandezas; portanto, podem ser medidas.

A unidade utilizada para medir a resistência é o OHM, representada pela letra grega Ω (lê-se ômega).



Como a condutância é o inverso da resistência, a unidade utilizada para medi-la, foi, de início, denominada MHO (inverso de OHM, e representada simbolicamente pela letra grega ômega, também invertida: \mho).

Atualmente, a unidade empregada para medir a condutância é denominada SIEMENS representada pela letra S.



Normalmente, será necessário determinar a resistência de condutores ou de isolamento de condutores. Todavia, precisando saber o valor da condutância, para efetuar cálculos, basta lembrar:

A condutância é igual ao inverso da resistência.

Condutância é representada por G.

Resistência é representada por R.

Matematicamente, podemos afirmar que:

$$G = \frac{1}{R} \quad (\text{condutância é igual ao inverso da resistência})$$

$$R = \frac{1}{G} \quad (\text{resistência é igual ao inverso da condutância})$$

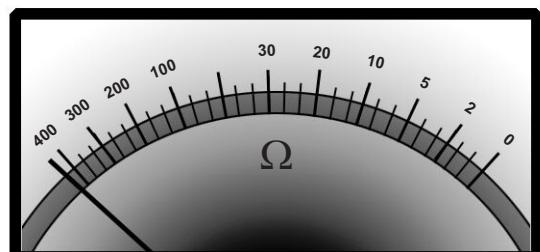
Vimos que a resistência elétrica é uma grandeza que tem por unidade de medida o ohm.

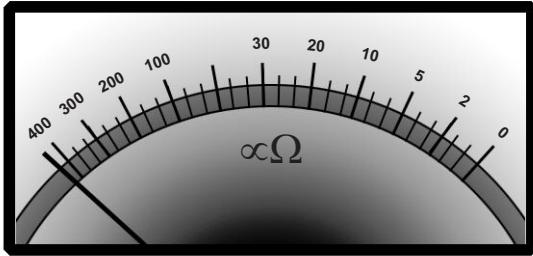
O instrumento utilizado para medir a resistência elétrica é o ohmímetro, e, no momento da medição, o circuito tem que estar desenergizado.

Ohmímetro

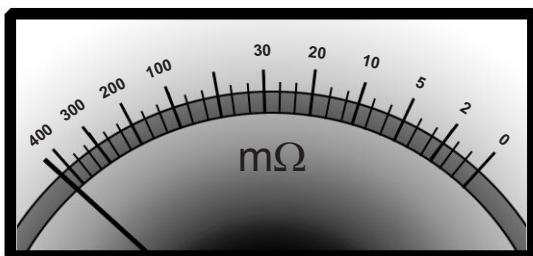
Serve para medir a resistência elétrica em OHM (Ω).

Como a resistência elétrica pode ser também medida em microhm, miliohm, qui-loohm e megohm, teremos, para cada caso, os seguintes aparelhos medidores:

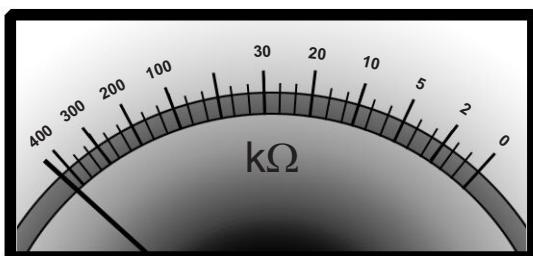




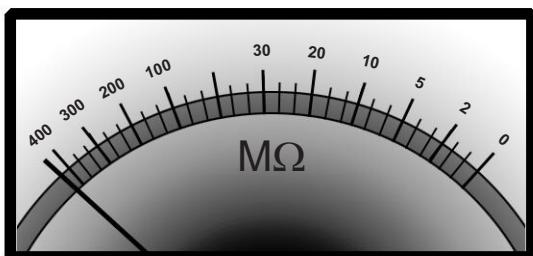
Microhmímetro – destina-se a medir a resistência elétrica em microhm ($\mu\Omega$) .



Miliohmímetro – destina-se a medir a resistência em miliohm ($m\Omega$).

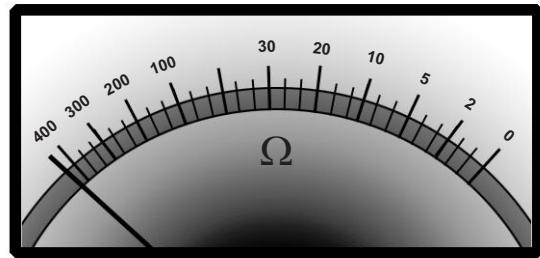
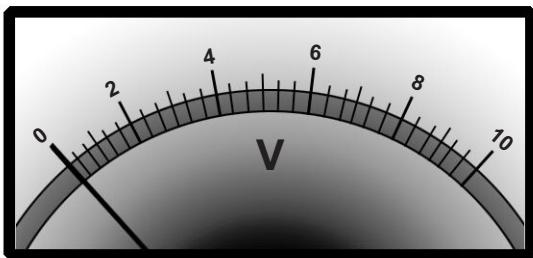


Quilohmímetro – destina-se a medir a resistência em quilohm ($k\Omega$).



Megômetro – destina-se a medir a resistência em megohm($M\Omega$).

Observe que os OHMÍMETROS, normalmente, têm o início de suas escalas ao inverso dos voltímetros, ou seja, o zero (0) da escala está à direita.



Um outro detalhe é que as divisões da escala do OHMÍMETRO não são iguais, ou seja, não são eqüidistantes, enquanto que as divisões da escala do VOLTÍMETRO são eqüidistantes.

atenção

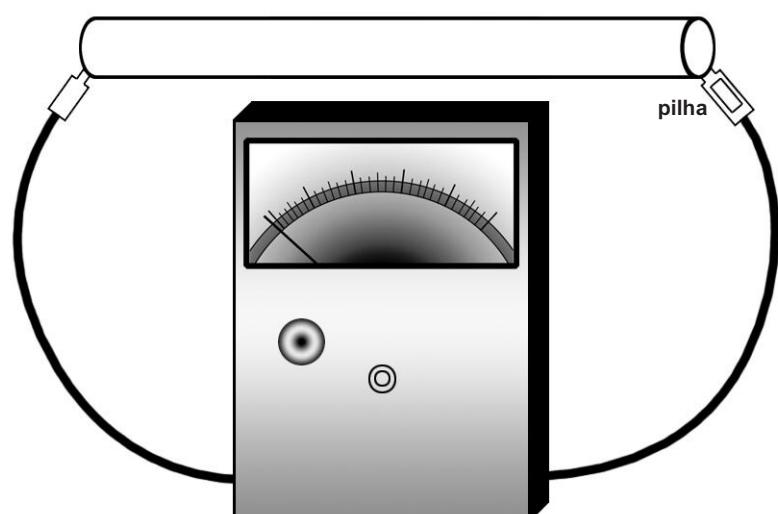
Quando se deseja medir a resistência de um material ou elemento de um circuito, esse deve estar totalmente desconectado da fonte geradora.

Tanto o ohmímetro quanto o megômetro utilizam uma fonte geradora própria. Por isso, se o elemento no qual se irá verificar a resistência estiver alimentado por uma outra fonte geradora, poderá haver um curto circuito, danificando o aparelho e causando outras possíveis consequências.

Quando não vão realizar as medições, deve-se ligar o ohmímetro ou o megômetro, de acordo com as seguintes ilustrações:

Ilustração A

Para medir a resistência do material com um ohmímetro, o material tem que estar desenergizado, como se mostra na ilustração A, e as pontas do aparelho se ligam diretamente no condutor.



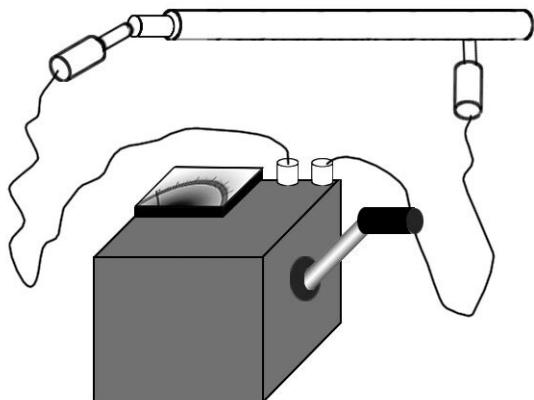
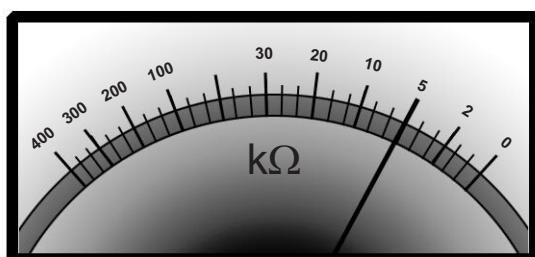


Ilustração B

Para medir a resistência do isolamento com o megômetro, uma das pontas do aparelho fica no condutor, a outra, no isolamento.

Estudou-se a unidade de medida OHM e os aparelhos para medi-la. Falta, agora aprender a ler o aparelho. Para isso, observe a ilustração abaixo:



Neste exemplo vemos, logo abaixo do ponteiro, o símbolo $k\Omega$, que nos indica que a medida deve ser lida em quiloohm. O ponteiro está coincidindo com o número 5; por conseguinte, temos uma resistência elétrica de cinco quilohms.

$$R = 5k\Omega$$

Equivalência entre a unidade (ohm), seus submúltiplos e seus múltiplos.

MEGOHM ($M\Omega$)	KILOOHM ($k\Omega$)	OHM (Ω)		MILIOHM ($m\Omega$)	MICROHM ($\mu\Omega$)
		1 Ω	1 000 000 $m\Omega$		
1	1,000			1 000	1 000 000
0,000001	0,001	1	1 000 000	12 000	12 000 000
0,000012	0,012	12		5 400	5 400 000
0,0000054	0,0054	5,4		3 000	3 000 000
0,000003	0,003	3		47 000	47 000 000
0,000047	0,047	47		20 000	20 000 000
0,000020	0,020	20		4 700	4 700 000
0,0000047	0,0047	4,7		15 100	15 100 000
0,0000151	0,0151	15,1			

Sistema de medida de resistência elétrica ®

MÚLTIPLOS	UNIDADE	SUBMÚLTIPLOS		
Megohm $M\Omega$ $1 M\Omega = 1000000\Omega$	Quilohm ou Kiloohm $K\Omega$ $1k\Omega = 1\ 000\Omega$	Ohm Ω 1Ω	Miliohm $m\Omega$ $1m\Omega = 0,001\Omega$	Microhm $\circ\Omega$ $1\circ\Omega = 0,000\ 0001\Omega$



03 Condutores, Resistores e Isolantes

Todos os materiais oferecem uma certa oposição à passagem da corrente elétrica.

No entanto, dependendo da substância do material, essa oposição é maior ou menor, sendo que alguns materiais praticamente não permitem essa passagem.

Aos materiais que oferecem pouca oposição à passagem de corrente elétrica chamamos *condutores*. Aos que oferecem mais oposição, chamamos *resistores*. E aos que praticamente não permitem a passagem da corrente elétrica chamamos de *isolantes*.

A razão da maior ou menor oposição oferecida à passagem da corrente elétrica tem sua explicação na estrutura dos átomos.

O átomo se compõe de um núcleo com cargas positivas (prótons) tendo em torno de si, em órbitas, elétrons com carga negativa. Os elétrons e os prótons do núcleo se atraem mutuamente, porém a rapidez do movimento dos elétrons os mantém em suas órbitas, afastados do núcleo.

Em alguns materiais, entretanto, os elétrons em órbitas mais afastadas sofrem pouca atração do núcleo, tendo facilidade de se deslocar de um para outro átomo, num rodízio desordenado, sendo chamados *elétrons livres*.

Os elétrons livres são numerosos nos materiais condutores como a prata, o cobre e o alumínio e praticamente inexistentes nos materiais isolantes, como vidro, a borracha e a porcelana.

Como exemplos de resistores temos a grafite e o níquel-cromo.

O conhecimento sobre materiais condutores e isolantes de eletricidade é muito aplicado na vida moderna.

Outra aplicação desse conhecimento é o usos de bota de borracha por quem lida diretamente com eletricidade. A borracha isola a passagem da eletricidade pelo corpo da pessoa, evitando acidentes que podem ser fatais.

CURIOSIDADE

Nos navios que transportam combustível (petróleo, óleo, gasolina), os marinheiros precisam usar sapato cuja sola seja de material condutor de eletricidade. O uso de sapato com sola de borracha a bordo de navio-tanque pode ser extremamente perigoso, tanto que, no passado, explosões causaram a destruição de muitos desses navios.

Veja o que pode acontecer se um marinheiro estiver de sapato com sola de borracha:

Ao movimentar-se pelo navio com sapato de sola de borracha, cargas elétricas vão acumulando-se no corpo do marinheiro enquanto ele trabalha. Ao tocar no navio, uma pequena faísca pode ser produzida quando a carga acumulada sai de seu corpo. Essa faísca pode inflamar os vapores do combustível que o navio está transportando e causar uma enorme explosão. Usando sapato com sola de material condutor, a carga não se acumula no corpo do marinheiro, fluindo através dele e não produzindo assim nenhuma faísca.

Outra causa de explosão de navios-tanque é o surgimento de pequenas faíscas no momento em que o óleo está sendo descarregado. Para evitar acidentes, a superfície do combustível é coberta com uma fina camada de nitrogênio, que é um gás não-inflamável.

Resistência específica (resistividade)

A resistência oferecida à passagem da corrente elétrica depende da estrutura atômica do material. Mas existem outros fatores que também influem para essa resistência. É o que se vai estudar agora.

Para dois condutores de igual seção transversal e comprimentos diferentes, as resistências serão diferentes.

$$A = 5$$

$$B = 10$$

O condutor B, tendo o dobro do comprimento do condutor A, tem o dobro da resistência elétrica do condutor A; logo, a resistência aumenta com o comprimento do condutor.

Para dois condutores com comprimentos iguais e seção transversal diferente, as resistências serão diferentes.

$$A \quad S = 1\text{mm}^2$$

$$B \quad S = 2\text{mm}^2$$

Dos dois condutores A e B, aquele que apresentar maior seção transversal é o que tem menor resistência elétrica.

Para podermos avaliar a influência que os materiais, conforme a constituição de seus corpos, exercem sobre as suas resistências elétricas, tomamos amostras dos mesmos com determinadas dimensões e na mesma temperatura.

Esses valores são conhecidos como *resistência específica* ou *resistividade* dos materiais a que se referem, a qual é representada pela letra grega ρ (rô).

Do exposto, podemos deduzir a seguinte equação:

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

R - resistência elétrica do condutor

L - comprimento do condutor

S - área da seção transversal

ρ - resistividade do material de que é feito o condutor

A resistividade pode ser determinada em várias dimensões. A dimensão mais usada é o ohm por metro de comprimento e 1 milímetro quadrado de seção transversal.

A seguir, uma tabela da resistividade de alguns materiais a 20°C, considerando as dimensões do parágrafo anterior.

TABELA	
MATERIAL	RESISTIVIDADE
prata	0,016
cobre	0,017
alumínio	0,030
tungstênio	0,050
zincos	0,060
chumbo	0,220
niquelina	0,420
níquel-cromo	1,000

Coeficiente de temperatura

O coeficiente de temperatura da resistência é a razão com que a resistência de um material varia por ohm e por grau de temperatura.

Em geral, a resistência elétrica dos materiais aumenta quando há elevação de temperatura. O carvão, o vidro, a grafite, o quartzo, a porcelana e os gases são exceção: suas resistências diminuem quando a temperatura aumenta, e vice-versa.

Sabendo o coeficiente de temperatura de um material a determinada temperatura, podemos determinar a sua resistência elétrica a outra temperatura, com uma equação já indicada no 1º parágrafo: $R_t = R_0 (1 + \alpha_0 t)$

R - resistência a determinada temperatura

R_0 - resistência a 0°C

α_0 - coeficiente de temperatura a 0°C

t - temperatura em graus Celsius

Observação:

O coeficiente de temperatura é simbolizado pela letra grega (α).

Um caso em que se aplica esta noção será apresentado no problema que se segue.

aplicação

Um fio de cobre tem 10ohm de resistência a 0°C. Qual será a sua resistência a 30°C, sendo o coeficiente de temperatura a 0°C igual a 0,00427?

$$R_{30^\circ\text{C}} = 10 + 10 \times 0,00427 \times 30 = 11,28\Omega$$

Esta equação pode ser indicada por:

$$R_t = R'_t + (R'_t \cdot \alpha \cdot \Delta t)$$

R_t - resistência desejada a determinada temperatura

R'_t - resistência à temperatura conhecida

α - coeficiente da temperatura conhecida

Δt - diferença de temperatura

Coeficiente de temperatura da resistência elétrica de alguns metais e ligas a 20°C:

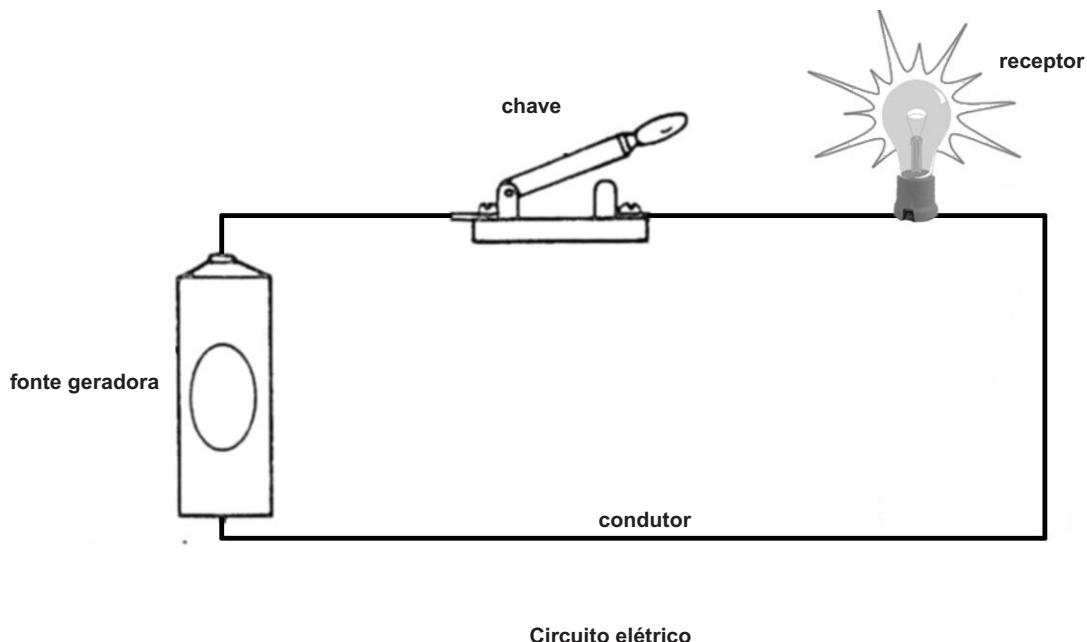
alumínio	0,0039
antimônio	0,0036
cobre	0,00393
ouro	0,0034
chumbo	0,00387
níquel	0,0062
platina	0,003
prata	0,0038
tungstênio	0,005
zincos	0,0037
bronze	0,002
constantan	0,000005

Com adequação a essa tabela, podemos determinar a resistência elétrica desses materiais a qualquer temperatura entre - 50°C e + 200°C.

04 Circuito Elétrico

Círculo elétrico é o caminho percorrido pela corrente elétrica.

No círculo elétrico, é importante determinar a função de cada componente, para que se possa entender o seu funcionamento.



Componentes do circuito elétrico

Fonte geradora – é o componente onde a energia elétrica é gerada.

Ex.: baterias, dínamos e outros.

Condutores – são os componentes que utilizam a corrente elétrica da fonte geradora para os receptores.

Ex.: fios de cobre

Receptores – são os componentes que utilizam a corrente elétrica para produzir luz, força.

Chave ou interruptor – é o componente que abre e fecha o circuito.

Funcionamento do circuito elétrico

Quando a chave está fechada, a corrente elétrica circula da fonte geradora para o receptor, retornando à fonte. Esse processo permanece, até que o circuito seja aberto ou a fonte pare de gerar corrente.

CURIOSIDADE

A ligação de certos corpos com a terra geralmente é feita através de um fio metálico denominado fio-terra. Sua função é semelhante à função das pontas: o fio-terra conduz para a terra as cargas elétricas que, do contrário, ficariam acumuladas nesses corpos.

Um exemplo bem comum de utilização necessária do fio-terra são os aparelhos elétricos que temos em casa (chuveiro, torneira elétrica, televisão, geladeira etc.): eles podem ficar tão carregados que se queimam, caso não haja um descarregamento da eletricidade pelo fio-terra.

Outro exemplo são os caminhões que transportam combustível. Observe como esses veículos trazem uma corrente de metal ou uma tira de couro pendurada na carroceria, com a outra extremidade em contato com o solo. Isso é necessário, porque o próprio atrito do ar com a lataria do veículo em movimento produz a eletrização deste, que, ficando carregado, pode explodir à menor faísca.

Lei de OHM

A relação entre a tensão (E), a intensidade de corrente (I) e a resistência elétrica (R) foi determinada por George Simon Ohm, cientista alemão. Em sua homenagem, esta relação foi denominada lei de Ohm, e pode ser enunciada da seguinte forma:

A intensidade de corrente elétrica é diretamente proporcional à tensão e inversamente proporcional à resistência do circuito.

Essa lei corresponde à seguinte equação:

$$I = \frac{E}{R}$$

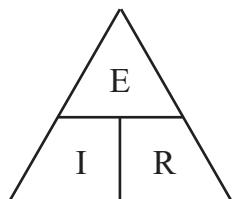
Dessa equação podemos deduzir que:

$$E = I \times R \quad R = \frac{E}{I}$$

Para facilitar a interpretação dessas equações, utiliza-se um triângulo e procede-se do seguinte modo:

a - cobrir a letra que representa a unidade desejada;

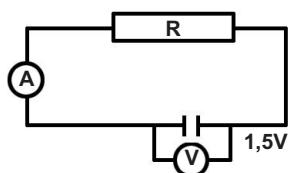
b - usar a equação que se apresentar.



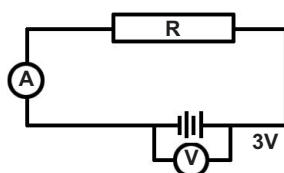
aplicação

No circuito (a) abaixo, uma resistência R submetida a uma tensão de 1,5V, é percorrida por uma corrente de 0,1A (indicada no amperímetro). Logo a seguir (circuito (b)) duplicou-se a tensão, mas a resistência permaneceu constante.

a)



b)



Sabendo que:

$$\text{resistência elétrica do condutor} = \frac{\text{tensão aplicada ao condutor}}{\text{corrente no condutor}}$$

Isto é:

$$R = \frac{E}{I} \quad \text{ou} \quad E = R \cdot I$$

e considerando a resistência constante nos circuitos apresentados, teremos:

em (a):

$$R = \frac{E}{I} = \frac{1,5}{0,1} \Rightarrow R = 15\Omega$$

em (b):

$$R = \frac{E}{I} = \frac{3,0}{0,2} \Rightarrow R = 15\Omega$$

A corrente estabelecida em um condutor metálico é diretamente proporcional à tensão a ele aplicada, de modo que sua resistência permanece constante.

Tendo em vista esta observação, pode-se enunciar duas leis conhecidas, respectivamente, como primeira e segunda lei de Ohm.

Primeira Lei de Ohm: Um ohm é a resistência de um condutor que é percorrido por uma corrente de um ampère (1A) de intensidade quando se aplica a seus extremos uma diferença de tensão de um volt (1V).

Segunda Lei de Ohm: A resistência elétrica de um fio condutor é diretamente proporcional a seu comprimento e inversamente proporcional à área de sua seção. Além disso, a resistência também depende do material que o constitui e de sua temperatura.

Círculo em série

Círculo em série é aquele cujos componentes estão ligados de tal modo, que permitem um só caminho à passagem da corrente elétrica.

Conjunto de três lâmpadas formando um círculo em série.



A tensão total de um circuito em série é igual à soma das tensões dos seus componentes.

$$E = e_1 + e_2 + e_3 \text{ etc.}$$

Devemos considerar que, havendo um só caminho para a passagem da corrente, todos os elementos são atravessados pela mesma intensidade de corrente.

$$I = i_1 = i_2 = i_3 \text{ etc.}$$

Em virtude da composição do circuito em série, é importante notar-se que:

- a – no circuito em série, os receptores funcionam simultaneamente;
- b – a falta ou interrupção de um receptor não permite o funcionamento dos demais;
- c – a corrente de funcionamento dos receptores deve ser igual;
- d – o valor da tensão do funcionamento dos receptores pode ser diferente.

Círculo em paralelo

Círculo em paralelo é aquele em que os receptores estão ligados diretamente aos condutores da fonte. Dessa maneira, nesse circuito haverá vários caminhos para a passagem da corrente, sendo cada receptor um caminho independente para essa passagem.

Exemplo de circuito em paralelo formado com três lâmpadas.



A intensidade total de corrente no circuito paralelo é a soma das intensidades de corrente dos receptores.

$$I = i_1 + i_2 + i_3 \text{ etc.}$$

A tensão elétrica no circuito paralelo é igual nos bornes de todos os receptores.

$$E = e_1 = e_2 = e_3 \text{ etc.}$$

Em virtude da composição do circuito em paralelo, é importante notar-se que:

- a - as tensões dos receptores devem ser iguais;
- b - as intensidades de corrente dos receptores podem ser diferentes;
- c - cada receptor pode funcionar independentemente dos demais.

Resistência equivalente

Quando existem vários resistores num circuito, é importante determinar a *resistência equivalente* do conjunto, isto é, a resistência única capaz de substituir a associação daqueles resistores.

Para maior clareza, a maioria dos problemas de cálculos da resistência equivalente é acompanhada de um desenho chamado “esquema”, onde os resistores são representados por uma das figuras abaixo.



Para determinar a resistência equivalente de um conjunto de resistores, é necessário saber o modo como eles estão ligados entre si. Os resistores podem ser ligados em série ou em paralelo.

Quando conjuntos em série e em paralelo estão interligados, são chamados mistos ou em série-paralelo.

Ligações em série

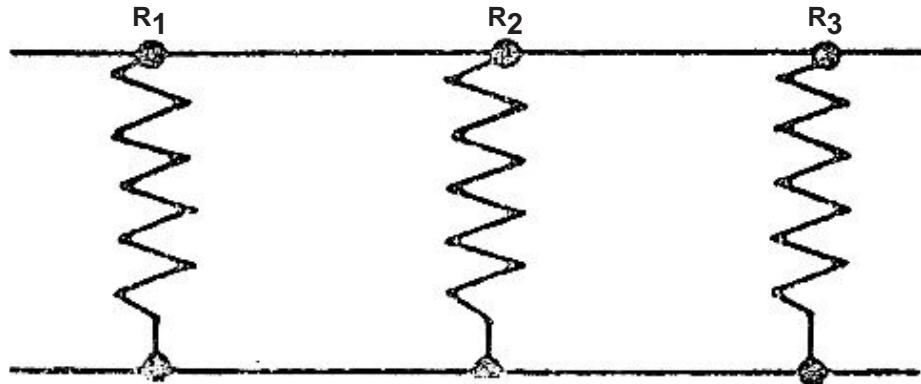


Esquema de um conjunto de resistores ligados em série.

Como sabemos, a resistência aumenta com o comprimento (L) dos resistores. Assim, quando ligamos um conjunto em série, estamos somando os comprimentos dos resistores. Deduzimos, então, que a resistência equivalente (R_e) do conjunto, será a soma das resistências dos resistores (R). Como consequência, o valor de R_e será sempre maior que o valor de qualquer uma das resistências da ligação.

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

Ligação em paralelo



Esquema de um conjunto de resistores ligados em paralelo.

Diferenças entre as associações em série e em paralelo

Quais as diferenças básicas entre as associações em série e em paralelo?

As diferenças são três e se referem à corrente elétrica, à ddp e à resistência equivalente.

Veja o quadro abaixo.

Diferenças entre as associações		
	em série	em paralelo
corrente elétrica	<i>não se divide ao percorrer os resistores da associação.</i>	<i>divide-se ao percorrer os resistores da associação.</i>
ddp	a ddp da associação é a <i>soma</i> da ddp de cada resistor.	a ddp da associação tem <i>o mesmo valor</i> da ddp de cada resistor.
resistência equivalente	é a <i>soma</i> das resistências individuais da associação.	o <i>inverso</i> da resistência equivalente é a <i>soma do inverso</i> das resistências individuais da associação.

É importante lembrar que a resistência diminui, quando a seção (mm^2) aumenta. Podemos notar que, quando ligamos um conjunto em paralelo, estamos somando as seções dos resistores do conjunto.

Deduzimos, então, que, para conhecer a resistência equivalente de um conjunto em paralelo, podemos usar uma das três equações abaixo:

$$1) \ Re = \frac{R}{R_n} \Rightarrow \text{quando os resistores forem de igual valor, sendo:}$$

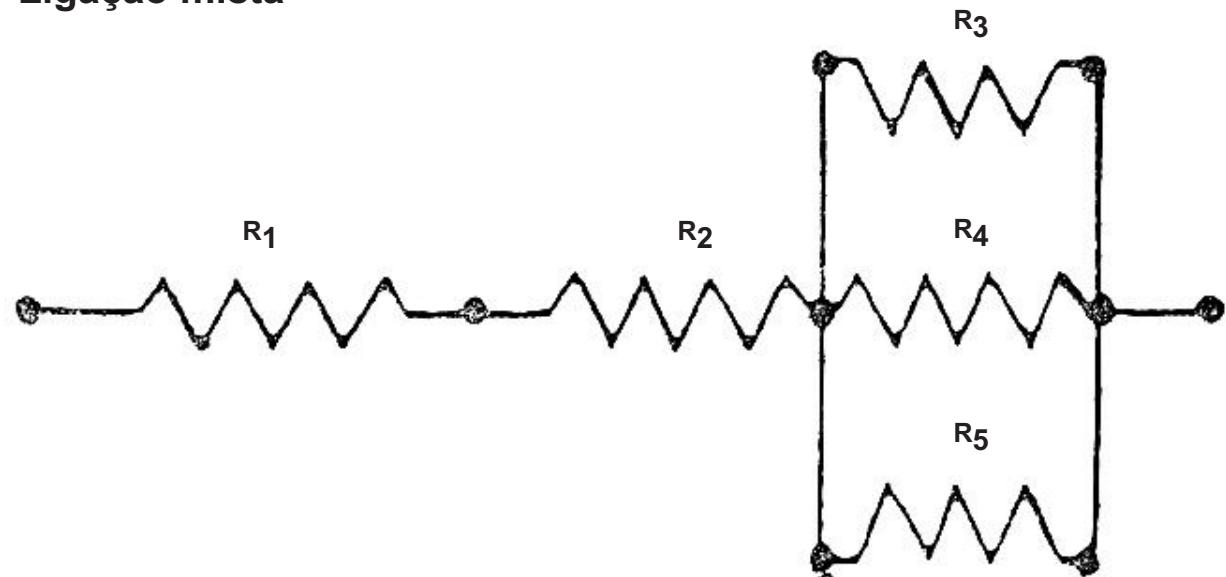
R – resistência de um dos resistores.

R_n – quantidade de resistores do conjunto.

$$2) \ Re = \frac{R_1 \times R_2}{R_1 + R_2} \Rightarrow \text{quando o conjunto for de dois resistores, de valores distintos;}$$

$$3) \ Re = \frac{1}{\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3} + \dots + \dots} \Rightarrow \text{para qualquer número de resistores no conjunto.}$$

Ligaçāo mista



Esquema de conjunto de resistências em ligação mista

Para determinarmos a resistência equivalente da ligação mista, calculamos a resistência equivalente dos resistores ligados em paralelo a que se soma o valor dos resistores ligados em série:

$$R_{eq} = \frac{1}{\frac{1}{R_3} + \frac{1}{R_4} + \frac{1}{R_5}} + R_1 + R_2$$

05 Potência em Corrente Contínua

Potência é a capacidade de realizar um trabalho em um determinado tempo.

Potência elétrica é a energia produzida, ou seja, o trabalho elétrico realizado por unidade de tempo.

A potência elétrica é uma grandeza como a resistência elétrica, a tensão elétrica ou intensidade elétrica, sendo representada pela letra “P”.

Sendo uma grandeza, a potência elétrica pode ser medida, sendo o *watt*, representado pela letra W, sua unidade padrão de medida. É bom lembrar que $1W = 1\text{ VA}$, ou seja 1 watt equivale a 1 volt/ampère.

A potência elétrica é o resultado do produto da tensão pela intensidade de corrente, ou seja:

$$P=E \cdot I$$

onde:

P= Potência elétrica em corrente contínua – medida em watt (W)

E= Tensão elétrica – medida em volt (V)

I= Intensidade de corrente elétrica – medida em ampère (A)

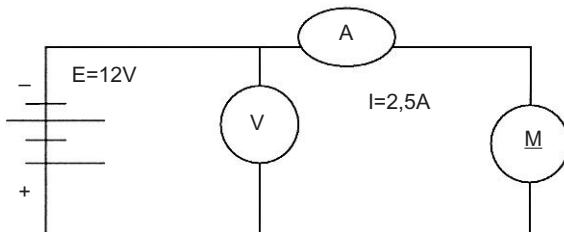
aplicação

O motor representado no diagrama ao lado funciona com:

$$E = 12 \text{ V} \text{ e } I = 2,5 \text{ A.}$$

Logo, sua potência elétrica (P) será calculada como segue:

$$P = E \cdot I \Rightarrow P = 12 \times 2,5 \therefore P = 30 \text{ W}$$



Sistema de medida da potência elétrica

O watt é a unidade padrão de medida da potência elétrica. Tem, portanto, seus múltiplos e seus submúltiplos

MÚLTIPLOS	UNIDADE	SUBMÚLTIPLOS
Megawatt (MW) Quilowatt (kW)	Watt (W) Watt(W)	Miliwatt (mW) Microwatt (μ W)

$$1 \text{ quilowatt (kW)} = 1\,000 \text{ W} \text{ ou } 1 \text{ watt} = 0,001 \text{ kW}$$

aplicação

Que potência em kW tem um consumidor de 3 500 watt?

$$P(\text{kW}) = \frac{\text{W}}{1000} \Rightarrow P(\text{kW}) = \frac{3500}{1000}$$

$$\text{Portanto, } P = 3,5 \text{ kW}$$

Cálculo da potência elétrica em corrente contínua

Para o cálculo da potência elétrica em corrente contínua, usa-se a fórmula:

$$P = E \cdot I$$

da qual derivam:

$$E = \frac{P}{I} \quad \text{e} \quad I = \frac{P}{E}$$

sendo:

P = Potência elétrica em CC, medida em watt (W).

E = Tensão elétrica, medida em volt (V).

I = Intensidade de corrente elétrica, medida em ampère (A).

aplicação

Calcule a potência de uma carga ligada a uma fonte de energia em corrente contínua de 24 V, por onde circula uma corrente de 5 A.

$$P = ?$$

$$E = 24V$$

$$I = 5A$$

$$P = E \cdot I \quad \Rightarrow \quad P = 24 \times 5 \therefore P = 120W$$

Cálculo da potência sendo conhecido o valor da resistência

Observe:

$$P = E \cdot I \quad \text{e} \quad I = \frac{E}{R}.$$

Na fórmula $P = E \cdot I$, pode-se substituir I por $I = \frac{E}{R}$

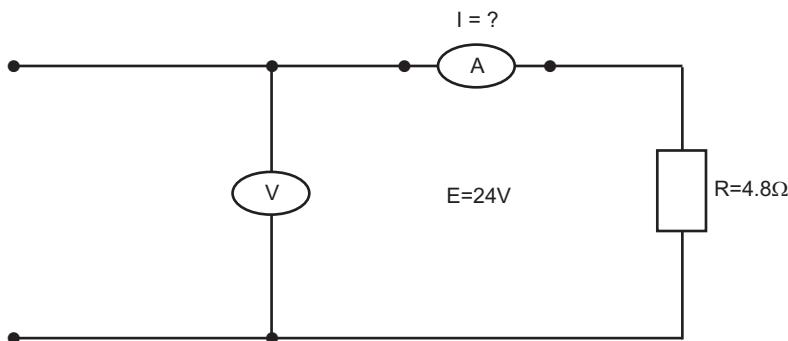
Veja:

$$P = E \cdot I$$

$$P = E \cdot \frac{E}{R} \Rightarrow P = \frac{E \cdot E}{R} \therefore P = \frac{E^2}{R}$$

aplicação

Calcule a potência do circuito abaixo.



$$P = \frac{E^2}{R} \Rightarrow P = \frac{24^2}{4,8} \Rightarrow P = \frac{24 \times 24}{4,8} \Rightarrow P = \frac{576}{4,8} \therefore P = 120W$$

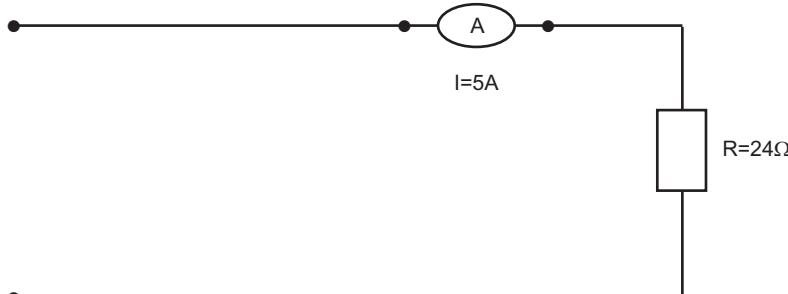
Observação: Na realidade, usando a fórmula $P = \frac{E^2}{R}$, faz-se a mesma operação indicada em $E \cdot I$

Cálculo da potência sem valor de E

Observe uma outra forma de resolver problemas de potência com as outras grandezas.

aplicação

Partindo do diagrama abaixo, calcule o valor da potência do resistor.



Pelo que estudamos, sabemos que $P = E \cdot I$. Pela Lei de Ohm, $E = I \cdot R$, o que permite encontrar o valor de E, multiplicando esses dois valores já conhecidos. Assim, $E = 5 \times 24$, ou seja, $E = 120V$.

A partir desse valor de E, calcula-se P.

$$P = E \cdot I \Rightarrow P = 120 \times 5 \Rightarrow P = 600W.$$

Calculando a potência com uma fórmula direta, teremos:

se $E = I \cdot R$, substituiremos E por esse valor na fórmula

$$P = E \cdot I$$

Assim,

$$P = I \cdot R \cdot I$$

$$\text{Portanto, } P = I \cdot I \cdot R, \text{ ou melhor: } P = I^2 \cdot R.$$

Considerando o exemplo anterior, teremos:

$$P = I^2 \cdot R \Rightarrow P = 5^2 \cdot 24 \Rightarrow P = 25 \times 24 \therefore P = 600W.$$

De tudo o que foi estudado, pode-se concluir que há três fórmulas básicas (tendo em vista os valores conhecidos) para cálculo de potência em corrente contínua:

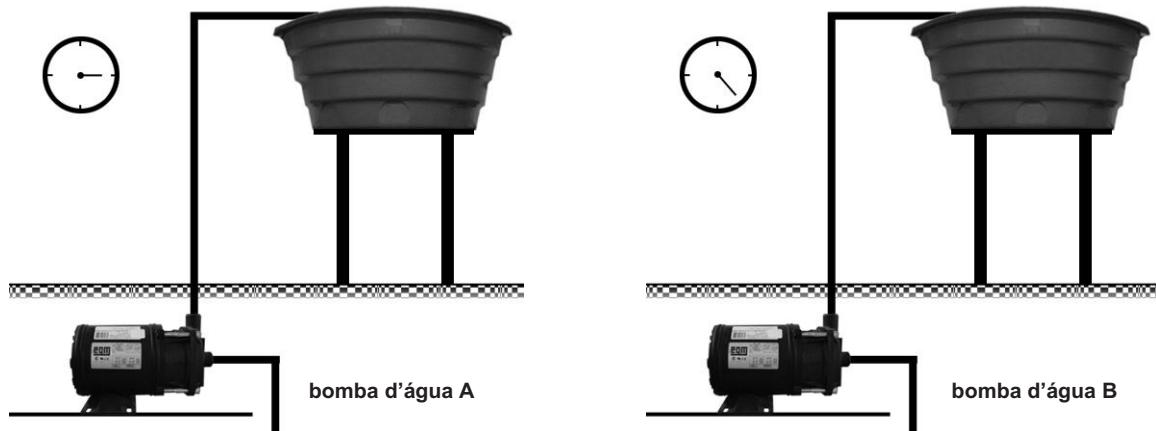
$$P = E \cdot I$$

$$P = \frac{E^2}{R}$$

$$P = I^2 \cdot R$$

06 Potência Mecânica

Iniciaremos o estudo deste assunto, com um exemplo.



As bombas-d'água da ilustração acima encheram caixas-d'água iguais, realizando, portanto, o mesmo trabalho.

A bomba-d'água A gastou 15 minutos para encher a caixa, enquanto a bomba B precisou de 25 minutos para realizar o mesmo trabalho.

Se o trabalho realizado foi o mesmo, a bomba mais eficiente foi aquela que gastou menos tempo para finalizá-lo: a bomba A.

Por que a bomba A foi mais eficiente, isto é, gastou menos tempo para realizar o trabalho? Porque a bomba A tem maior potência que a bomba B.

Potência mecânica: É o resultado da divisão do trabalho realizado, pelo tempo gasto para realizá-lo.

Matematicamente, temos:

$$\text{Potência mecânica} = \frac{T(\text{trabalho})}{t(\text{tempo})}$$

sendo trabalho igual ao produto da força pela distância, isto é: $T = F \cdot d$

Assim, substituindo, na fórmula de potência mecânica, T por Fd temos:

$$P = \frac{F \cdot d}{t}$$

aplicação

Qual a potência de um motor de elevação de guindaste para carga de 10 000N, se esta carga, em 50 segundos (s), deve se elevar a 3m?

Aplicando a fórmula $P = \frac{F \cdot d}{t}$, teremos:

$$P = \frac{10000 \text{ N} \cdot 3\text{m}}{50} \Rightarrow P = \frac{30000}{50} \therefore P = 600\text{J/s.}$$

A unidade de medida de potência mecânica é (joule/segundo (J/s)) ou (watt (W)), ambas unidades oficiais de potência, adotadas pelo Sistema Internacional de Unidades.

curiosidade

Geralmente, os aparelhos eletrodomésticos trazem impresso o valor de sua potência. Esse valor é chamado nominal.

07 Energia Elétrica

Energia é a capacidade de um corpo ou sistema de corpos de realizar trabalho.

A energia apresenta-se sob as mais variadas formas. Assim, podemos ter a energia elétrica, a energia mecânica, a energia térmica.

Essas formas de energia podem ser transformadas entre si, com o uso de aparelhos especiais.

Por exemplo:

Motor elétrico – transforma a energia elétrica em energia mecânica.

Estufa – transforma a energia elétrica em energia térmica.

Lâmpada – transforma a energia elétrica em luz.

atenção

A transformação da energia elétrica em qualquer outro tipo de energia sempre leva à formação de *calor* no sistema. Isto significa que o efeito Joule está presente em todas as transformações da energia elétrica. Assim, a bateria de automóvel fica aquecida ao ser recarregada; os aparelhos elétricos ficam aquecidos depois que entram em movimento; a lâmpada começa a esquentar logo depois de acesa.

Dois aparelhos semelhantes, de potências diferentes, podem consumir a mesma energia, isto é, realizar o mesmo trabalho, porém o mais potente o faz em menos tempo.

A potência de um aparelho é a energia por ele consumida na unidade de tempo, ou seja:

$$W = \frac{T}{t}$$

onde:

W – potência do aparelho

T – energia

t – tempo

Para determinarmos a quantidade de energia, basta realizarmos uma simples transposição de termos na expressão acima e obteremos: $T = W \cdot t$

Como vemos, a energia pode ser medida, isto é, ela é uma grandeza.

A potência elétrica é medida em watts, e o tempo, em segundos, portanto, a unidade de medida da energia elétrica é o watt/segundo (Ws) que, entretanto não é usada na prática, por ser muito pequena. Prefere-se, por isso, usar o watt/hora (Wh), em que a unidade de tempo é a hora.

O consumo de energia durante um determinado tempo, geralmente um mês, é determinado pela diferença entre duas leituras consecutivas.

Assim, se a leitura em um mês qualquer fosse 1 586 kWh e no mês anterior tivesse sido 1 494 kWh, teríamos o consumo de energia, calculado da forma abaixo:

$$1\ 586 - 1\ 494 = 92 \text{ kWh}$$

Normalmente, a energia elétrica é medida em quilowatt-hora (kWh) que vale 1000 Wh.

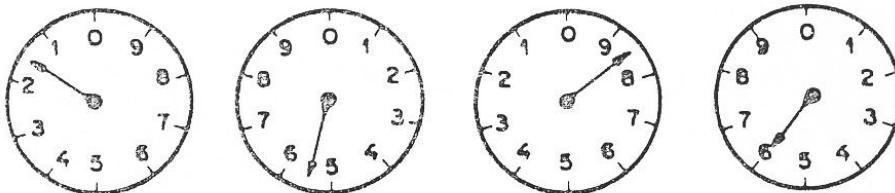
O consumo de energia elétrica é medido com instrumentos denominados *medidores de energia elétrica (contadores)*, que são inseridos no circuito de entrada da instalação.

O wattímetro contém um elemento de medir tensão e outro de medir corrente. Ambos fazem girar um disco, normalmente feito de alumínio, o qual, por sua vez, movimenta um mecanismo de relojoaria, que acionará os ponteiros que marcarão a energia consumida. Ao contrário do que acontece nos instrumentos

até agora estudados, os ponteiros do medidor não voltam a zero, quando não há consumo de energia.

Os medidores possuem, em geral, quatro mostradores circulares, numerados de 0 a 9, correspondendo, respectivamente, aos milhares, às centenas, às dezenas e às unidades. As leituras são feitas em kWh.

Exemplo:



Leitura: 1 586 kWh

Outros medidores, e lugar de mostradores de ponteiro, possuem um indicador com a leitura direta.

1	5	8	6
---	---	---	---

curiosidade

1 – A lâmpada mais antiga encontrada data de cerca de 20 000 anos. Trata-se de uma concavidade de pedra, onde se colocava combustível (o azeite) e um pavio que queimava aos poucos. Esse tipo de lâmpada continuou em uso (com aperfeiçoamentos e feita também em argila ou metal) até o século XVIII, queimando azeites vegetais ou óleos animais (de peixe, de baleia, etc.).

A invenção da vela, por sua vez, aconteceu provavelmente no século I em Roma. As primeiras velas eram de sebo ou cera de abelha, inconvenientes pela fumaça e pelo mau cheiro (as de sebo) e pelo custo elevado (as de cera). Por volta de 1780 aparece a vela de espermáceo (substância cerosa extraída da cabeça do cachalote, um mamífero marítimo de grande porte). No século XIX o espermáceo foi

substituído por parafina. Este antigo material e os pavios de algodão trançado continuam presentes nas velas atuais.

Adaptado de : Troia, Rosane (concepção). *A cidade iluminada – tecnologia e política a serviço da Light no início do século*. São Paulo: Divisão de Preservação do Patrimônio Arquitetônico, 1989. p. 10.

2- Você sabe por que a lâmpada se acende imediatamente após o interruptor ser acionado?

Resposta de Sônia S. Peduzzi, Departamento de Física da UFSC

O acender imediato da lâmpada não depende da velocidade dos elétrons, mas sim da velocidade – próxima à velocidade da luz – com que se propaga a mudança do campo elétrico ao longo do fio. Ou seja, os elétrons que provocam o acender da lâmpada não são os do interruptor, e sim os que estão no próprio filamento da lâmpada.

Caderno Catarinense de Ensino de Física.

Florianópolis, UFSC, v. 4, n° 2, agosto, 1987. p. 116.

3- O chuveiro elétrico é um grande consumidor de energia elétrica – aproximadamente 25% do total da energia gasta numa residência. Mantendo a chave a posição “verão”, você economiza cerca de 30% dessa energia.



OS Ímãs e Magnetismo

Os ímãs e o magnetismo intervêm no funcionamento de inúmeros aparelhos elétricos. Daí a importância de seu estudo.

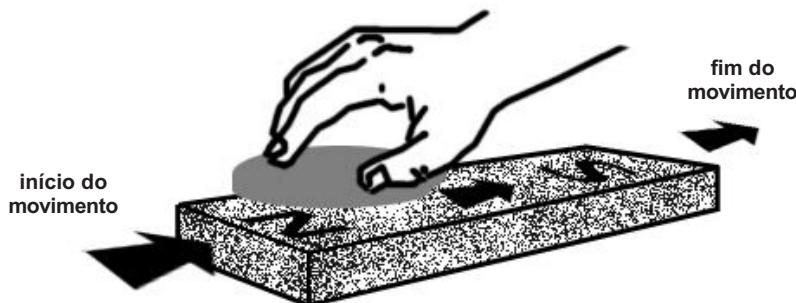
Os ímãs são materiais que têm a propriedade de atrair objetos de ferro. A esse fenômeno dá-se o nome de magnetismo, em virtude de se denominar Magnésia a cidade onde, pela primeira vez, esse fenômeno foi observado pelos gregos antigos.

Os primeiros fenômenos magnéticos foram observados em determinadas pedras, chamadas ímãs naturais, que possuem um poder magnetizante muito fraco, mas que eram capazes de atrair pedaços de ferro. Os ímãs naturais são formados por um minério de ferro chamado magnetita.

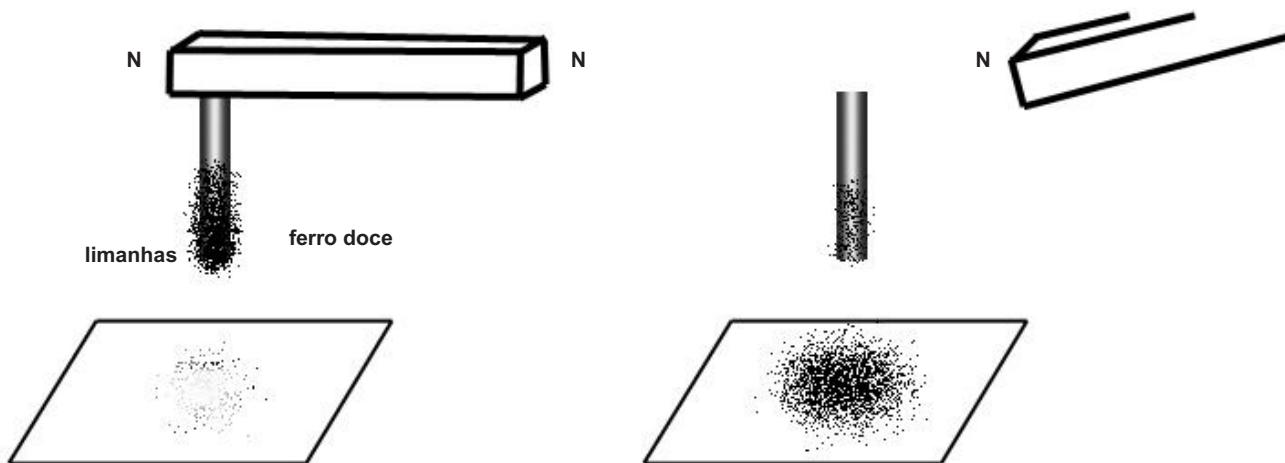
Além dos ímãs naturais, existem outros, produzidos por processos diversos, aos quais damos nome de ímãs artificiais; possuem, em geral, poder magnetizante maior.

Um ímã artificial pode ser obtido de duas maneiras:

- friccionando um pedaço de metal ferromagnético com um ímã natural, caso em que a imantação é permanente; a fricção deve ser sempre no mesmo sentido.



- mantendo em contato com um ímã outro corpo que tenha capacidade para adquirir propriedades magnéticas; enquanto durar o contato, o corpo atua como um ímã, atraindo os ferromagnéticos. Esse tipo de imantação é temporária.



Em contato com um ímã, o ferro doce transforma-se em ímã temporário. Após o contato, ele perde sua capacidade magnética e as limalhas se desprendem.

Os ímãs artificiais apresentam as mesmas características dos ímãs naturais.

Além dos ímãs artificiais, atualmente é muito comum a aplicação de ligas magnéticas na confecção de diversos aparelhos, como televisores, telefones, instrumentos de medição elétrica, etc. A liga magnética mais utilizada chama-se *alnico*, composta de alumínio, níquel, cobalto, cobre e ferro. Entre outras ligas metálicas, temos: o *ramolly*, composto de molibdênio, ferro, cobalto; o *tungstênio*, composto de tungstênio, manganês, ferro e carbono; o *permalloy*, composto de níquel, ferro e molibdênio.

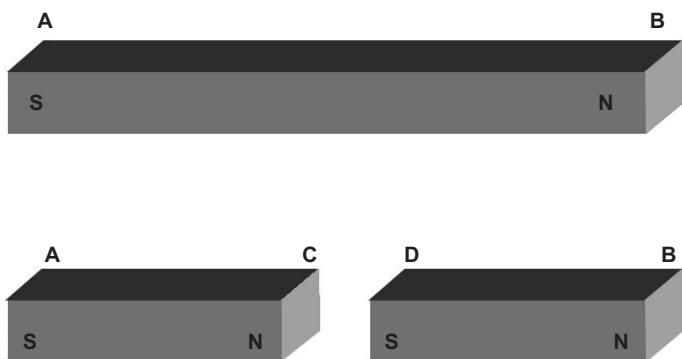
Sabemos que a propriedade que caracteriza um ímã é a de atrair objetos de ferro e essa atração é maior em certas partes dele – os extremos – denominados *pólos do ímã*. Nos ímãs simétricos, o ponto central entre os pólos, chama-se *linha neutra*. Nesta região não há atração.

Se suspendermos um ímã em forma de barra de modo que ele gire livremente em torno de seu centro, notamos que as extremidades se orientam sempre na mesma direção, que coincide, aproximadamente, com a direção norte – sul da Terra. Um dos pólos sempre aponta a *norte*, e por isso é chamado *pólo norte* do ímã. O outro aponta sempre o *sul*, sendo denominado *pólo sul* do ímã.

Esta propriedade foi utilizada na construção da bússola magnética, que nada mais é que um pequeno ímã suspenso pelo seu centro de gravidade. É usada para orientar os viajantes.

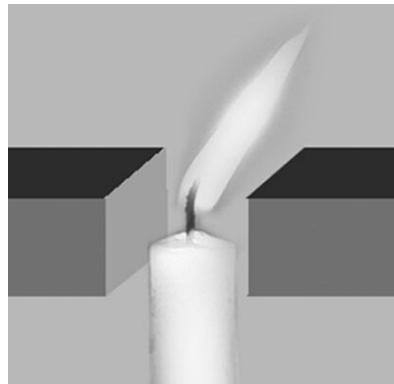
Se aproximarmos um ímã de uma bússola, notamos que o pólo norte da bússola é repelido pelo pólo norte do ímã. O mesmo acontece com os pólos sul do ímã e da bússola. Entretanto, o pólo norte do ímã atrai o sul da bússola, enquanto que o pólo norte da bússola é atraído pelo sul do ímã. Assim, pode-se afirmar que pólos magnéticos de mesmo nome se repelem; os de nomes contrários se atraem, ou seja, polaridades iguais se repelem e as diferentes se atraem.

Outra propriedade dos ímãs consiste na inseparabilidade de seus pólos: foi verificado, através de experiências, que é impossível obter um pólo magnético isolado: qualquer ímã apresenta, pelo menos, dois pólos. Se partirmos ao meio um ímã em forma de barra, obteremos, dois novos ímãs, como na figura ao lado.



CURIOSIDADES

1 – Dependendo de sua capacidade magnética, um ímã também pode atrair líquidos e gases. Por exemplo, se colocarmos uma bolha de sabão entre os pólos de um poderoso ímã em ferradura, a força magnética deste irá distender, por indução magnética, a bolha em direção aos dois pólos. Da mesma maneira, colocada entre os pólos de um ímã poderoso, a chama de uma vela muda sua direção habitual, mostrando-se sensível ao magnetismo.



2- O que torna o planeta Terra em ímã?

Em 1600, após concluir estudos decisivos com a bússola, William Gilbert deduziu que o interior da Terra deveria ser formado por alguma espécie de rocha magnética, provavelmente a própria magnetita que ele andara pesquisando.

Sabemos hoje que o núcleo de nosso planeta é formado por ferro e níquel submetidos a altíssima temperatura e pressão. E ambos são facilmente magnetizáveis. Teria pois, Gilbert acertado com sua dedução? Não, pelo simples fato de que qualquer ímã perde suas qualidades magnéticas acima de certa temperatura, o ponto Curie,

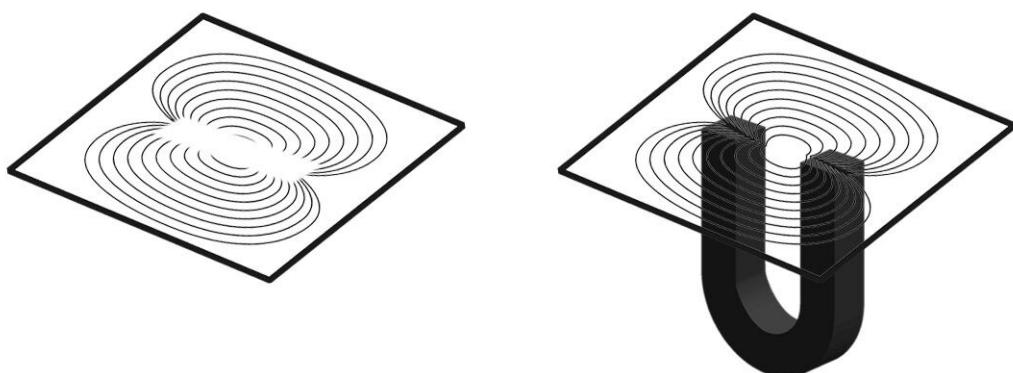
readquirindo-as apenas quando a temperatura retorna a um valor menor que o de seu ponto Curie. Considerando a elevada temperatura do núcleo da Terra, é muito improvável que o ferro e níquel sejam os responsáveis pelo magnetismo terrestre.

Atualmente, os geólogos estão relativamente de acordo: o magnetismo da Terra deve ser causado pelo aparecimento de correntes elétricas no interior do globo, criadas pelo atrito interno entre as várias camadas do planeta que se encontram em movimento. Tratar-se-ia, portanto, de *Eletromagnetismo*, assunto que você vai estudar mais adiante.

Adaptado de: CROPANI, Ottaviano de Fiore di. *O mundo da eletricidade*. São Paulo: Pau-Brasil, 1987. p. 18

Campo magnético

A região, em torno de um ímã, onde se exercem ações magnéticas é chamada campo magnético. Espalhando limalhas de ferro no campo magnético de um ímã, notamos que elas se dispõem segundo linhas bem definidas, que denominamos *linhas de força* do campo magnético. As linhas de força, por convenção, sempre se dirigem do pólo norte para o pólo sul do ímã.

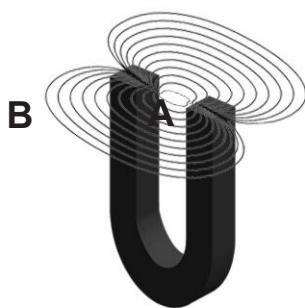


É preciso observar que o campo magnético não se manifesta somente segundo um plano, ele é uma região do espaço.

Supondo-se, no interior do campo magnético de um ímã, uma superfície de 1cm^2 , o número de linhas de força que passa através dessa superfície nos permite avaliar a intensidade do campo magnético, que é uma grandeza expressa em *oersteds*, sua unidade de medida.

A intensidade do campo magnético não é igual em todos os seus pontos, pois, à medida que nos afastamos do ímã, tornam-se raras as linhas de força.

Assim, na zona A, forma-se uma intensidade de campo magnético de maior valor do que a que ocorre na zona B, uma vez que naquela há maior número de linhas de força.

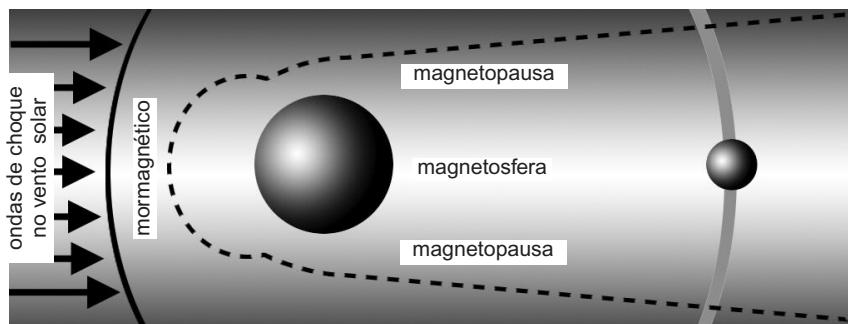


CURIOSIDADE

Cinturões de Van Allen – escudo magnético da Terra

O campo magnético terrestre começou a ser explorado experimentalmente com o lançamento de foguetes espaciais. O próprio conceito de magnetosfera surgiu em 1958, quando o satélite norte-americano Explorer I foi posto em órbita.

O Explorer levava consigo um contador Geiger, instrumento destinado a detectar partículas portadoras de alta energia, como os raios cósmicos. A primeira contribuição importante deste aparelho foi assinalar que, à volta do equador terrestre, entre os 5 000 e 10 000 km de altura, a Terra possui dois cinturões de altíssima radiação. Eram os *cinturões de Van Allen*, nome do maior estudioso do fenômeno.



A Terra possui um campo magnético, a magnetosfera, cujas linhas de indução correm de pólo a pólo, curvando-se sobre si próprias. Os *cinturões de Van Allen* são duas zonas da magnetosfera que capturam ou repelem partículas provenientes do espaço. Devido à curvatura das linhas de indução nos pólos,

elas formam nessas regiões dois “funis” de entrada para as partículas que, ao deslizarem em massa para dentro desses funis, produzem as auroras boreais. O vento de prótons emitido pelo Sol deforma a magnetosfera, achatando-a do lado do Sol e alongando-a em cada cauda do lado oposto.

Os cinturões de Van Allen funcionam como dois captadores magnéticos de partículas provenientes do espaço. O Sol e o próprio espaço cósmico bombardeiam nosso planeta com uma chuva de partículas subatômicas eletricamente carregadas: elétrons, prótons (que formam o chamado *vento solar*) e núcleos de átomos sem elétrons (os *raios cósmicos*). O cinturão duplo de Van Allen, que segue as linhas de indução do campo magnético terrestre, representa uma armadilha para as partículas de alta energia, que ele retém magnética mente e que de outra forma cairiam sobre a Terra. A faixa interna do cinturão retém prótons, que ali permanecem “dançando” por centenas de anos. O cinturão externo é bombardeado diretamente pelo vento solar e pelos raios cósmicos .

CROPANI, Ottaviano de Fiore di. *O mundo da eletricidade*. São Paulo: Pau-Brasil, 1987. p. 20.

Eletromagnetismo

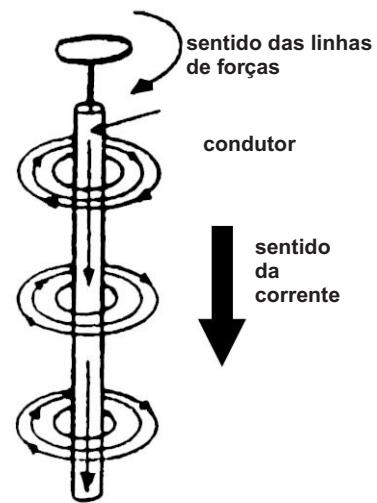
Embora a eletricidade e o magnetismo fossem considerados ramos independentes da Física, no século XIX um professor dinamarquês – Hans Cristian Oersted – mostrou que há íntima relação entre eles. De suas experiências ficou comprovado que uma corrente elétrica é capaz de produzir efeitos magnéticos.

Novas experiências foram-se desenvolvendo graças aos trabalhos de cientistas daquela época, entre os quais destaca-se Ampère. Em pouco tempo, verificava-se que qualquer fenômeno magnético era provocado por correntes elétricas. Estava definitivamente provada a relação entre Magnetismo e Eletricidade, originando-se daí o ramo da Física denominado Eletromagnetismo.

Quando a corrente elétrica passa por um condutor, solenóide ou eletroímã, produz efeitos magnéticos. Isso nos diz que se cria nas regiões vizinhas um *campo magnético*, cujas linhas de força são circunferências concêntricas, de plano perpendicular ao condutor.

Seu sentido é dado pelo movimento do cabo de um saca-rolhas, cuja ponta avança pelo condutor no mesmo sentido da corrente (Regra de “Maxwell”).

O campo magnético criado pela corrente que circula num condutor é, em geral, muito fraco. Para aumentá-lo, enrolamos o condutor em forma de bobina, formando então um *solenóide*. Dessa maneira, o número de linhas de força no interior do solenóide aumenta, o que acarreta maior intensidade do campo magnético. Quanto maior o valor da intensidade da corrente e quanto maior o número de espiras do solenóide, ou seja, quanto maior o valor de ampère-espiras do solenóide, maior será a intensidade de campo magnético no seu interior. A intensidade do campo magnético depende também do comprimento do solenóide. Quanto menor o comprimento, maior a intensidade. A intensidade de um campo magnético (H) é determinada pela fórmula:



$$H = \frac{1,25 NI}{1\text{cm}}$$

1,25 – constante

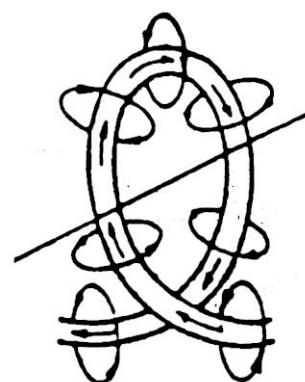
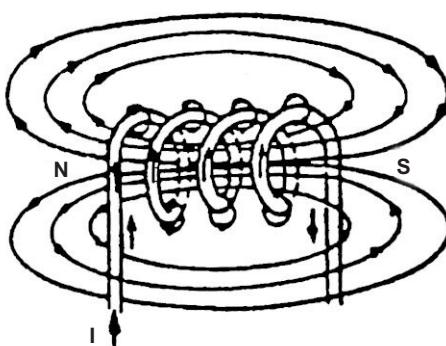
N – número de espiras

I – intensidade de corrente

1cm – comprimento do solenóide em centímetro

Do mesmo modo que um ímã, um solenóide possui polaridade.

As linhas de força saem do pólo norte e se dirigem para o sul, na parte externa; e na interna, de sul para norte.



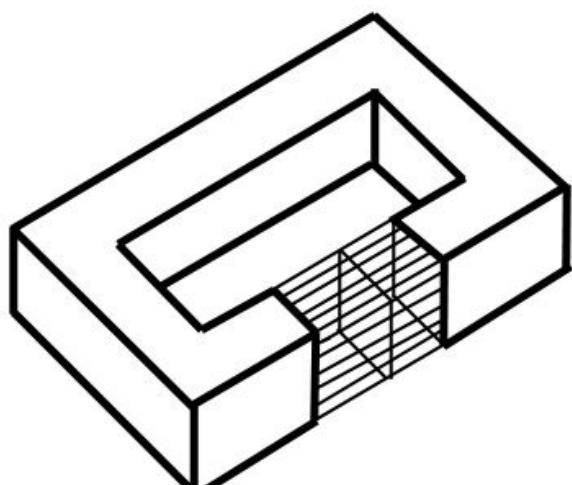
Introduzindo no solenóide um núcleo de ferro, obtém um eletroímã.

O número de linhas de força por cm^2 num eletroímã com núcleo de ferro, é bem maior do que em outro com núcleo de ar, em igualdade de condições de ampère-espiras, isto é, a intensidade do campo magnético é maior no ferro que

no ar, ou seja, o ferro é mais permeável às linhas de força do campo magnético do que o ar.

As linhas de força que se espalhavam núcleo de ar, agora com núcleo de ferro, se juntam. Há uma nítida preferência em circular pelo ferro, por este ser mais permeável do que o ar.

A *permeabilidade magnética* dos materiais é indicada por uma grandeza dita permeabilidade magnética, e nos permite classificá-los em três espécies.

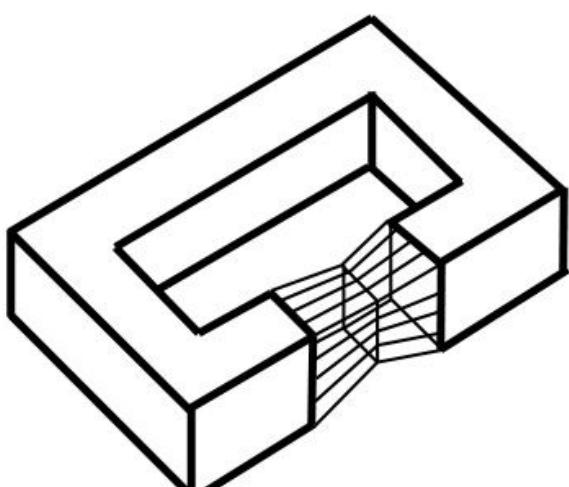


a - Paramagnéticos – ao serem colocados em um campo magnético, imantam-se de modo a provocar um pequeno aumento no valor do campo, em um ponto qualquer. Os ímãs tendem a se orientar no mesmo sentido do campo aplicado.

Ex.: o ar, o alumínio, a platina, o sulfato de cobre.

b - Diamagnéticos – ao serem colocados em um campo magnético, têm os seus ímãs elementares orientados em sentido contrário ao campo aplicado. O campo resultante terá valor um pouco menor que o inicial.

Ex.: cobre, prata, ouro, chumbo.



c - Ferromagnéticos – pequeno grupo de substâncias existentes na natureza que, ao serem colocadas em um campo magnético, se imantam fortemente. O campo magnético que estabelecem é muitas vezes maior do que o campo aplicado.

Ex; o ferro, cobalto e níquel, e as ligas que contêm esses elementos.

No núcleo do ar de um bobina, a permeabilidade magnética é chamada de *intensidade do campo magnético* (H), e no núcleo de ferro, *indução magnética* (B). Essa última é medida em *graus*.

Numa bobina, a relação entre a indução magnética e a intensidade do campo magnético é:

$$B = \propto \cdot H$$

Para determinar o fluxo magnético (\emptyset) numa bobina, é necessário conhecer o valor da indução magnética (B) e o da secção (S) atravessada pelo fluxo.

O produto de B x S é determinado *fluxo magnético* (\emptyset).

Assim:

$$\emptyset = B \times S$$

sendo:

\emptyset = fluxo magnético, medido em maxwell.

B = indução magnética, medida em graus.

S = secção atravessada pelo fluxo, medida em cm^2

CURIOSIDADES

1- Modernamente tornaram-se comuns os instrumentos musicais em que o som é tratado eletronicamente, como é o caso da guitarra elétrica, e não mais pela resistência dos seus materiais constitutivos, como no violão.



Dentro da guitarra elétrica existe uma bobina, peça complementar diretamente ligada a um amplificador de som.

As cordas são fios de aço. Quando elas vibram, a vibração é captada pela bobina, que, então, tem seu campo magnético modificado. A ddp que aparece em torno da bobina tem a mesma freqüência que a da corda vibrante. Uma vez amplificada, essa ddp comanda um alto-falante eletrodinâmico, que, por sua vez, tem uma bobina móvel no interior.

De diversos outros instrumentos, como violinos, saxofones e contrabaixos, surgiram variações que funcionam por sistemas semelhantes ao da guitarra elétrica.

Um instrumento que se tornou muito popular é o sintetizador, em que a origem do som não se deve à vibração de um objeto físico, como uma corda ou uma pele esticada num tambor, mas decorre integralmente da manipulação de sinais elétricos em circuitos eletrônicos. Os sintetizadores são capazes de reproduzir com muita fidelidade o som de qualquer instrumento tradicional, com seus timbres característicos. Devido a sua grande capacidade de tratamento sonoro, eles imitam até mesmo ruídos naturais.

2 – Você sabe por que ocasionalmente os instrumentos com dispositivos magnéticos e eletromagnéticos, como bússolas, aparelhos de rádio e televisores, passam a sofrer interferências, apresentando um comportamento totalmente diferente do normal?

A causa do aparente “enlouquecimento” ocasional desses instrumentos são “tempestades magnéticas” ocorridas a mais de 150 000 000 de km da Terra. Essas “tempestades” se formam algumas horas depois da ocorrência de explosões solares, quando grandes quantidades de partículas eletricamente carregadas são expulsas para o espaço. O campo magnético terrestre atrai essas partículas, que são capturadas pelos cinturões de Van Allen, criando outros campos magnéticos muito intensos, que interferem no comportamento das bússolas e de outros equipamentos eletromagnéticos, chegando mesmo a interromper a transmissão de energia elétrica.

Histerese

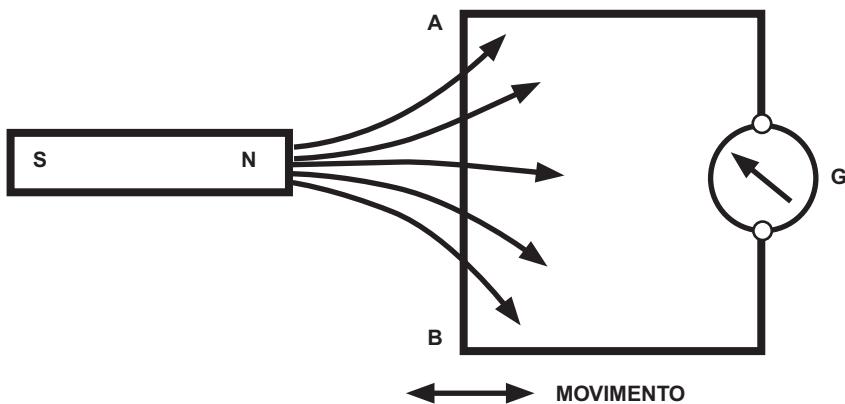
Quando se coloca um núcleo de ferro numa bobina, na qual circula uma corrente elétrica, ele adquire propriedades magnéticas (atração de substâncias que contenham ferro), enquanto a corrente passar por ela. Cessada a passagem da corrente, o núcleo conserva um pouco dessa propriedade (continua ligeiramente imantado), que se chama *magnetismo residual* (ou remanescente), fenômeno também chamado de *histerese*. Para se desimantar totalmente o ferro, é liberada certa energia, que se perde sob a forma de calor na massa do material.

09 Indução Eletromagnética

A corrente elétrica, ao circular através de um condutor (um fio), produz em volta dele um campo magnético. A *indução eletromagnética* é o processo pelo qual se produz uma corrente elétrica num circuito fechado, utilizando-se um campo magnético.

Tomemos um fio condutor que forme um circuito fechado através de um galvanômetro, e movimentemos esse condutor próximo a um campo magnético.

Veremos que o ponteiro do instrumento se desvia, acusando a presença de uma corrente elétrica.



A produção de energia elétrica em grande escala, capaz de movimentar indústrias, iluminar cidades e fazer funcionar os aparelhos de nossas casas, só foi possível depois da descoberta da indução eletromagnética.

O cientista inglês Michael Faraday, em 1831, comprovou a possibilidade de se produzir uma F. E. M. (força eletromotriz) por meio da indução eletromagnética.

São três os processos básicos para se reproduzir uma F. E. M. por meio da indução eletromagnética:

- 1 – pela movimentação de um condutor em um campo magnético fixo;
- 2 – pela movimentação do campo magnético, permanecendo fixo o condutor;
- 3 – pela variação do fluxo magnético, permanecendo fixo o condutor.

Embora Faraday tivesse observado que a corrente induzida aparece no circuito ora em um sentido, ora em outro, não conseguiu, porém, estabelecer uma lei que indicasse como determinar aquele sentido.

Alguns anos após a divulgação dos trabalhos de Faraday, ainda no século XIX, Lenz, cientista russo, propôs uma “regra” para a resolução deste problema.

CURIOSIDADE

As baterias estão longe de ser as únicas fontes de f.e.m. Entre outros, contam-se os geradores; dispositivos ativados por diferenças de temperatura (termocoplas etc.); dispositivos ativados por luz; o coração humano; certos peixes.

Lei de Lenz

A corrente induzida em um circuito aparece sempre com um sentido tal que o campo magnético que ela cria tende a contrariar a variação do fluxo magnético através da espira.

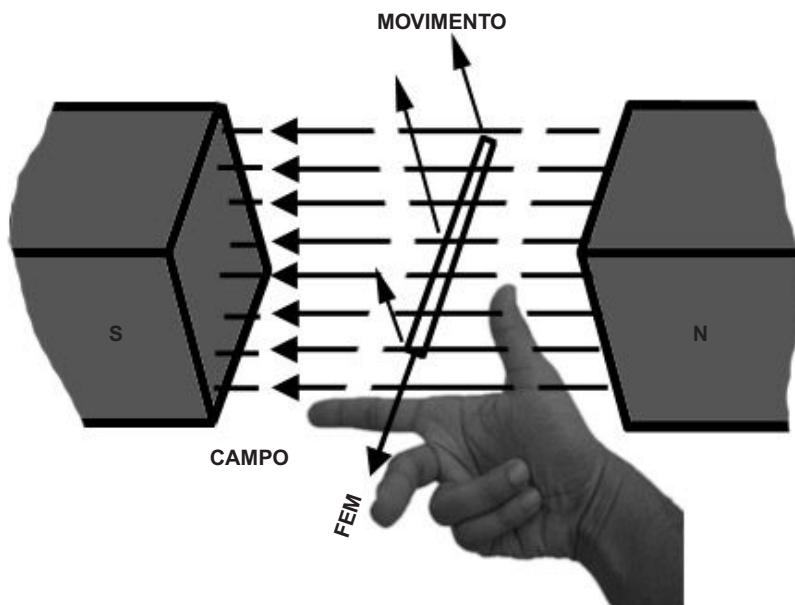
A Lei de Lenz fornece um meio para se determinar o sentido da corrente induzida, porém sua interpretação difere conforme a causa que a produz.

1- Se a corrente for devida ao deslocamento relativo entre um condutor e um campo magnético (1º e 2º processo), ela dá origem, com o circuito fechado, a um sentido tal, que tende a frear o deslocamento do condutor.

2 – Se a corrente induzida é devida à variação do fluxo (3º processo), observamos que o sentido da corrente em relação ao fluxo ocorre do seguinte modo:

- a – tem sentido oposto ao fluxo, quando aumenta;
- b – tem o mesmo sentido do fluxo, quando diminui.

A regra de Fleming, ou “da mão direita”, estabelece uma maneira prática de se verificar o sentido da corrente induzida, sabendo-se o sentido de deslocamento do condutor e o sentido do fluxo: dispõem-se os dedos polegar, indicador e médio da mão direita em ângulos retos, de modo que o indicador aponte no sentido do fluxo e o polegar no sentido do deslocamento do condutor. O dedo médio indicará o sentido da corrente induzida.

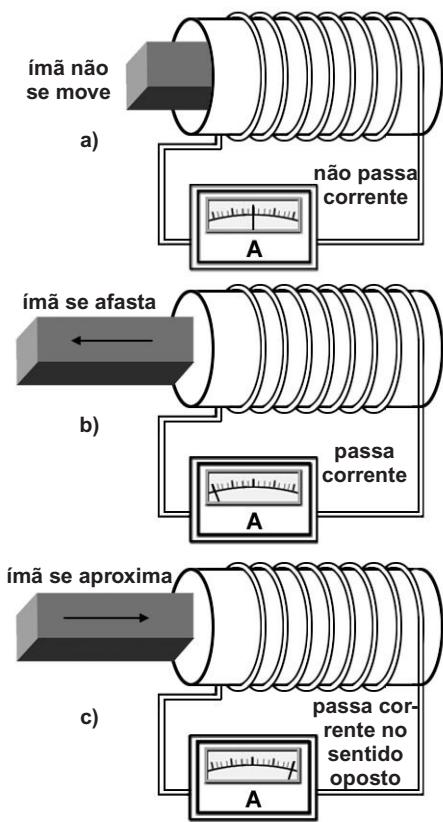


Lei de Faraday da indução eletromagnética

Sempre que ocorrer uma variação do fluxo magnético através de um circuito fechado, será estabelecida nesse circuito uma corrente induzida.

Quando o fluxo está aumentando, a corrente tem sentido contrário ao que ela apresenta quando o fluxo está diminuindo.

Analisando a experiência mostrada na figura que segue, verifica-se que o aparecimento da corrente induzida está de acordo



com a lei de Faraday: na figura (a), existe um fluxo magnético através da bobina, mas ele não está variando e o ímã está parado. Portanto, não há corrente induzida nas espiras; na figura (b), ao afastar-se o ímã, o fluxo magnético através da bobina diminuirá, e esta variação do fluxo faz aparecer uma corrente induzida, que o amperímetro indica; na figura (c), aproximando-se o ímã da bobina, o fluxo através dela aumenta e a corrente induzida aparece em sentido contrário ao anterior, como indicado no amperímetro.

Uma corrente induzida é gerada sempre que um circuito é atravessado por um campo magnético externo que, por qualquer razão, varia com o tempo. Afastando os dois circuitos, a quantidade de linhas do campo magnético gerado pelo circuito indutor na bobina do circuito induzido diminui. Aproximando os circuitos, o número dessas linhas no circuito induzido aumenta.

Força eletromotriz induzida

A força eletromotriz induzida é diretamente proporcional ao número de linhas de força cortada, ou seja, a variação do fluxo magnético é inversamente proporcional ao tempo de duração da variação:

$$e = \frac{\Delta\phi}{\Delta t} \cdot \frac{1}{10^8} \text{ volt}$$

onde:

e – tensão induzida em volts

$\Delta\phi$ – variação de fluxo a que foi submetido o condutor em maxwell

Δt – tempo de duração da variação em segundos

A constante $10^8 = 100\,000\,000$ representa a variação do fluxo por segundo necessário para induzir, num condutor, uma tensão de 1 volt.

O sistema produtor do fluxo chama-se *indutor*, e aquele no qual se induz a f. e. m., *induzido*.

Em geral, nas máquinas e aparelhos eletromagnéticos, o fluxo é produzido por *eletroímã*. Desse modo, podemos obter a variação do fluxo por movimento do induzido ou do indutor, ou, ainda, por variação da corrente que circula no enrolamento do indutor.

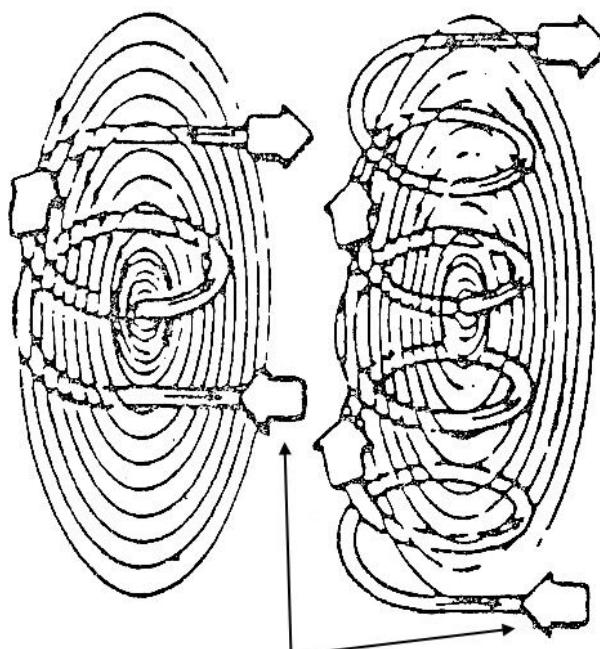
A tensão induzida num único condutor tem um valor muito baixo; por isso, o induzido é constituído de *bobinas*; nelas a tensão induzida vale a soma das tensões induzidas em cada um dos condutores, considerando-se como um condutor um dos lados de uma espira.

Auto-indução

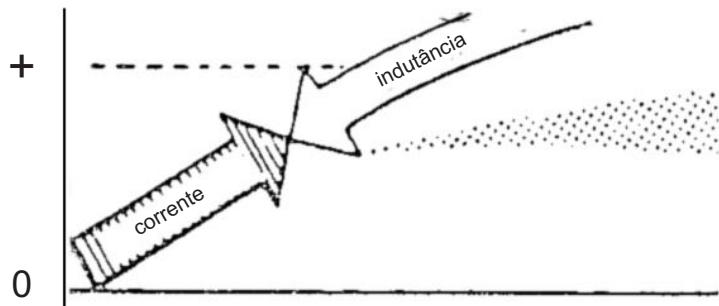
O campo magnético produzido por uma corrente elétrica que percorre um circuito é capaz de induzir corrente não só nos circuitos próximos como também em seu próprio circuito. A indução produzida por um circuito sobre si mesmo recebe o nome de auto-indução ou “self-indução”.

A auto-indução obedece às leis gerais da indução. A corrente de auto-indução se opõe à variação da corrente indutora.

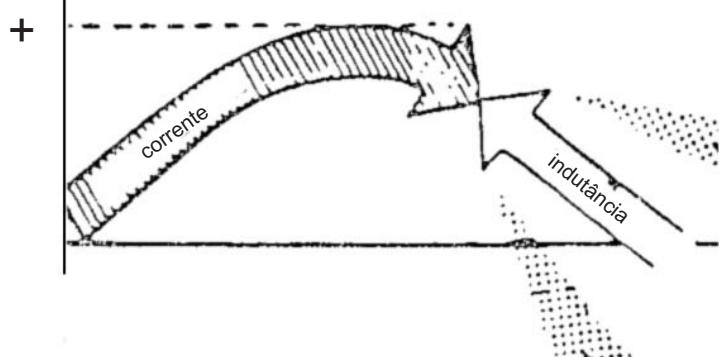
Quando se fecha um circuito, a auto-indução retarda o crescimento da corrente induzida. Quando se abre o circuito, a corrente induzida tende a aumentá-la.



corrente alimentando



Quando a corrente aumenta, a indutância tende a diminuí-la.



Quando a corrente diminui, a indutância tende a aumentá-la.

A auto-indução se opõe às variações da corrente no circuito

A capacidade de um circuito de auto-induzir corrente é determinada por um coeficiente, chamado coeficiente de auto-indução, cuja unidade é o henry.

Para valores menores, usa-se o milihenry (mH), que é igual a 0,001 do henry, e o microhenry (μ H), que é igual a 0,000001 do henry.

O henry (símbolo H) é definido como o coeficiente de auto-indução de um circuito, em que a variação de 1 ampère por segundo desenvolve uma F. E. M. de auto-indução de 1 volt.

$$1 \text{ henry} = \frac{1 \text{ volt} \times 1 \text{ segundo}}{1 \text{ ampère}}$$

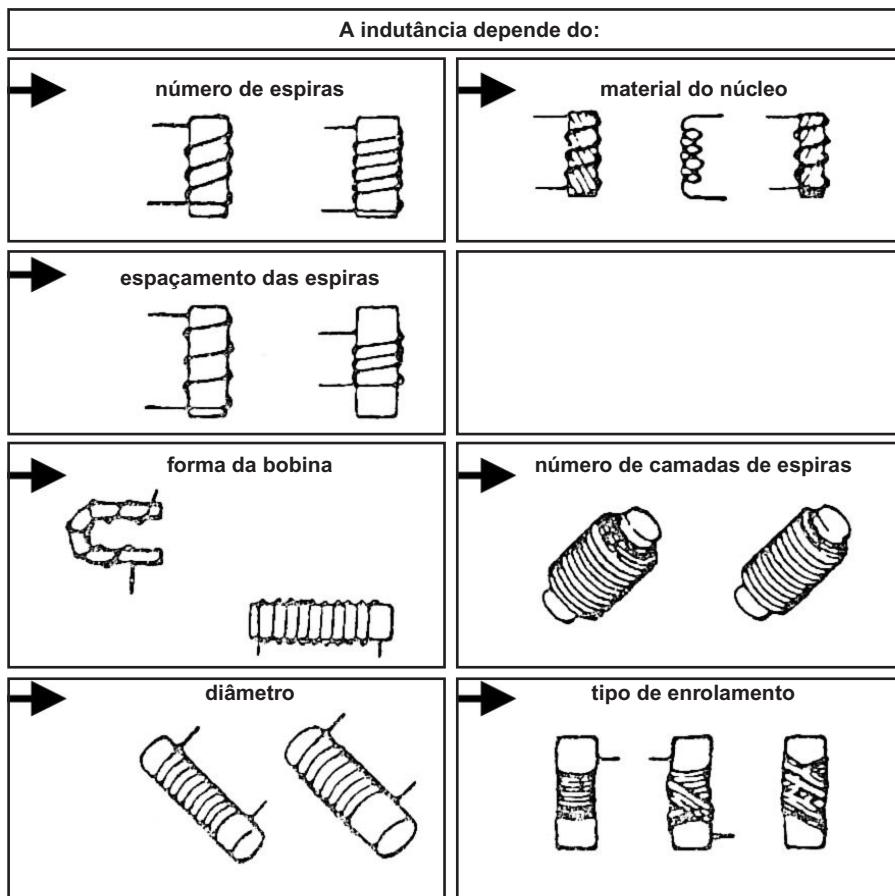
$$\text{Como } \frac{1 \text{ volt}}{1 \text{ ampère}} = 1 \text{ ohm},$$

pode-se escrever:

$$1 \text{ henry} = 1 \text{ ohm/segundo}$$

Por essa razão os ingleses usam, às vezes, a palavra “sec-ohm” em vez de henry.

Alguns dos fatores importantes que determinam o valor da auto-indução estão indicados nas figuras do quadro abaixo.



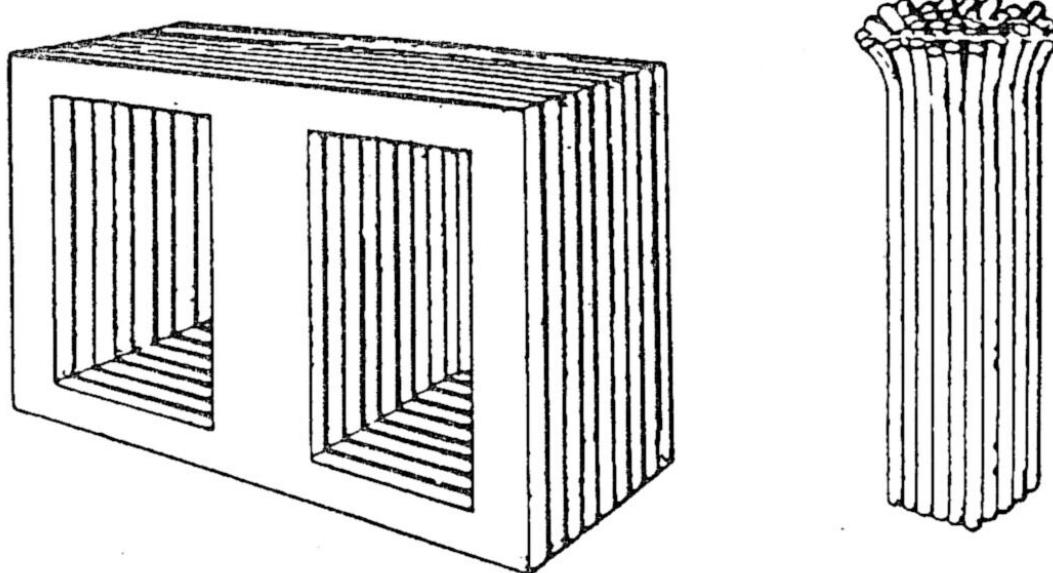
Corrente de Foucault

Se considerarmos o núcleo de um solenóide como sendo metálico, qualquer variação no fluxo magnético induzirá nesse uma corrente elétrica. Essas correntes têm o nome de *correntes de Foucault ou parasitas*.

O calor produzido por elas aquece o núcleo a temperatura indesejáveis, representando uma perda de energia. Para reduzir os efeitos dessas correntes, os núcleos das máquinas que funcionam

com correntes alternadas são constituídos de lâminas ou fios de material ferromagnético de alta resistividade.

As lâminas ou fios são isolados entre si com verniz ou papel especial e montados no sentido do fluxo, porque as correntes de Foucault são perpendiculares a ele.



O valor das correntes de Foucault depende dos seguintes fatores:

- a - freqüência da corrente;
- b - volume da massa do núcleo;
- c - espessura das lâminas;
- d - material de que o núcleo é feito.

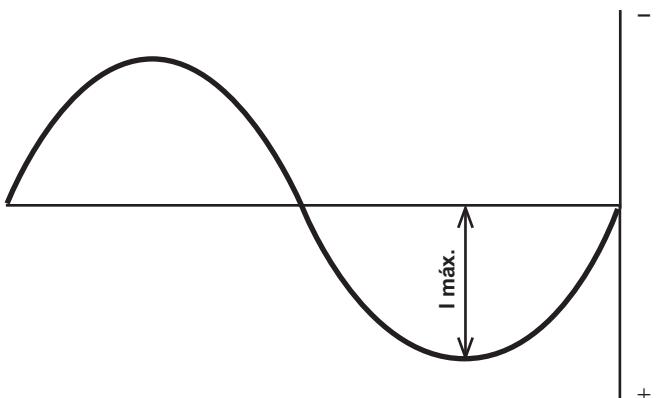
Corrente alternada

A tensão e a corrente produzidas por fontes geradoras podem ser contínuas ou alternadas.

A corrente é contínua, quando circula no circuito num único sentido, como temos estudado até agora. Entretanto, se a corrente sai ora por um, ora por outro borne, na fonte geradora, circula ora num, ora noutro sentido, no circuito. A fonte geradora de corrente alternada chama-se *alternador*.

Representando, num gráfico, os valores da corrente no eixo vertical e o tempo no horizontal, determinamos uma curva, demonstrando a variação da corrente alternada, como se vê ao lado.

No instante inicial, a corrente tem valor nulo, crescendo até um valor máximo, caindo novamente a zero. Nesse instante, a corrente muda de sentido, porém seus valores são os mesmos alcançados da primeira parte da variação. O mesmo acontece com a tensão.



A essa variação completa, em ambos os sentidos, sofrida pela corrente alternada, dá-se o nome de *ciclo*. O número de ciclos descritos pela corrente alternada, na unidade de tempo, chama-se *frequência*. Sua unidade é o *hertz* (Hz). É medida com instrumentos chamados freqüencímetros.

Durante um ciclo, a corrente e a tensão tomam valores diferentes de instante a instante; esses são ditos valores momentâneos ou instantâneos, dentre os quais cumpre destacar o *valor máximo* ($I_{\text{max.}}$).

Entretanto, na prática, não é o valor máximo o empregado, e sim o *valor eficaz*. Define-se como valor eficaz de uma corrente alternada o valor de uma corrente contínua que produzisse a mesma quantidade de calor na mesma resistência.

Por exemplo:

Um motor absorve uma corrente de 5A, que é o valor eficaz. Esse valor é expresso por:

$$I_{\text{ef}} = \frac{I_{\text{máx}}}{\sqrt{2}} = \frac{\sqrt{2}}{2} \cdot I_{\text{máx}}$$

Por analogia, para tensão, temos:

$$E_{\text{ef}} = \frac{E_{\text{máx}}}{\sqrt{2}} = \frac{\sqrt{2}}{2} \cdot E_{\text{máx}}$$

Tanto o *voltímetro* como o *amperímetro*, em relação à corrente alternada, medem *valores eficazes*.

10 Resistência, Indutância e Capacitância

O comportamento dos circuitos e das máquinas elétricas é afetado pelos seus componentes, cujo conhecimento é essencial para que o comportamento de um sistema elétrico possa ser atendido.

Todos os componentes de um circuito elétrico contêm os parâmetros *resistência, indutância e capacidade* em grau maior ou menor, que se apresentam em quantidades distribuídas, isto é, cada parte de um componente elétrico possui uma parcela desses parâmetros.

O desempenho de um circuito elétrico depende da combinação de componentes tais como *resistores, indutores, capacitadores*, etc. de acordo com o valor daqueles parâmetros (resistência, indutância e capacidade) e na forma como estes se conectam para configurar o componente e/ou circuito.

Os parâmetros indutância e capacidade são caracterizados pela habilidade de armazenar energia: indutância no *campo magnético* e capacidade no *campo elétrico* do circuito. Em contraste, o parâmetro resistência é dissipador de energia.

A *resistência* pode ser definida como uma característica dos componentes elétricos que limita a corrente em um circuito.

Um resistor é um componente elétrico onde se destaca a influência da resistência. Por exemplo, a parte ativa de um aquecedor possui um resistor, cuja característica principal é de uma resistência.

Na prática, um resistor possui alguma característica de indutância e capacidade. Dependendo da aplicação, tais influências podem ser desprezadas ou exigir a construção daquele componente com requisitos especiais.

Chamamos *resistor ideal* aquele que *não possui indutância ou capacidade*.

A energia elétrica que circula em um *círculo passivo* é convertida em energia térmica, proporcionalmente ao quadrado da corrente e ao valor da resistência do circuito, ou seja, a potência (watt) consumida em um circuito ou um resistor é igual ao quadrado da corrente I (ampère) multiplicado pela resistência R (ohm).

Portanto, o parâmetro resistência deve ser entendido como dissipador de energia. O valor da dissipação, a cada instante, é igual a $I^2 \times R$.

A *indutância*, que pode ser definida como uma característica de um componente de circuito elétrico que se *opõe às variações de corrente no circuito*, armazena energia em um campo magnético quando a corrente cresce, e devolve energia ao circuito quando a corrente é reduzida.

A quantidade de energia devolvida ao circuito seria exatamente igual à quantidade de energia armazenada, se não houvesse *perdas ativas* no condutor.

O efeito da indutância em um circuito é atrasar as variações de corrente.

A unidade de indutância é o *henry* (H). É comum o emprego de seu submúltiplo, o milihenry.

$$1\text{mH} = 1\text{H}/1000.$$

Um *indutor* é um componente elétrico onde se destaca a influência da indutância. É construído de condutor (cobre) em forma de bobina. O valor da indutância (L) em um indutor é função do número de espiras da bobina, do material usado no núcleo, entre outros fatores.

Dependendo da aplicação e do rigor requerido na análise de circuitos, podem ser desprezados os efeitos da resistência em um indutor.

Chamamos *indutor ideal* aquele que *só possui indutância*.

O parâmetro indutância é caracterizado pela habilidade de armazenar energia no campo magnético do circuito. Esta energia armazenada é função da corrente instantânea, e pode ser calculada em joule por: $EL = (L \times I^2)/2$

A *capacitância* é a propriedade dos circuitos elétricos ou de seus componentes de permitir o armazenamento da energia elétrica no meio isolante (dielétrico).

A capacidade elétrica torna-se significativa quando dois condutores próximos são separados por dielétricos, tais como papel, ar, mica, porcelana, vidro ou outro material isolante.

A unidade de capacidade é o *farad* (F).

É comum o emprego de submúltiplos: 1 microfarad ($1\mu\text{F}$) = $=1\text{F}/1\ 000\ 000$ ou 1 pico-farad ($1\eta\text{F}$) = $1\text{F}/1\ 000\ 000\ 000$.

Um *capacitor* é um componente elétrico onde se destaca a influência do parâmetro capacidade.

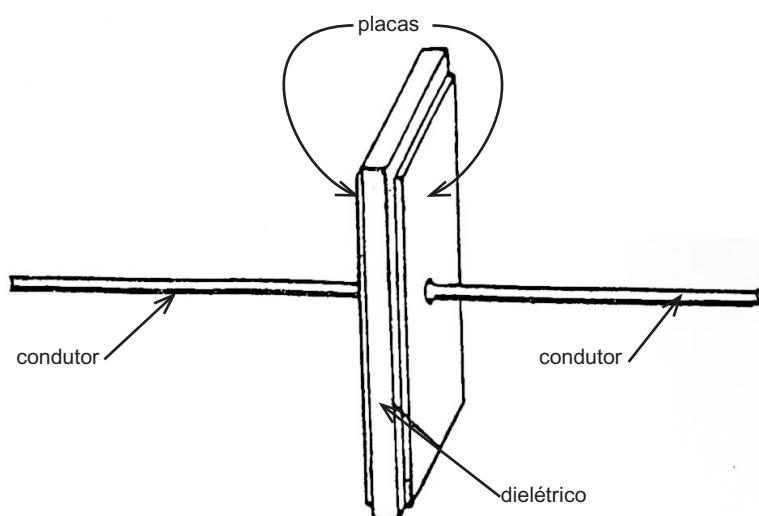
Normalmente um capacitor possui alguma resistência.

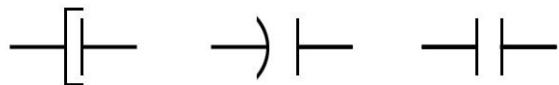
Conforme referido anteriormente para um indutor, a presença da resistência em um capacitor pode ser desprezada em uma análise preliminar do comportamento de um circuito elétrico.

Chamamos *capacitor ideal* aquele que só possui capacidade.

O parâmetro capacidade é caracterizado pela habilidade de armazenar energia no campo elétrico do circuito. Essa energia armazenada é função da tensão instantânea, e pode ser calculada em joule por: $\text{EC} = (\text{C} \times \text{V}^2)/2$.

Um conjunto formado por dois condutores separados por um isolante é um capacitor.





Os condutores são chamados “placas do capacitor”, e o isolante “dielétrico”.

Esquematicamente, os capacitores são representados por um dos símbolos à esquerda.

O capacitor funciona num circuito elétrico da seguinte forma:

Quando a tensão aumenta, o capacitor acumula carga.

Quando a tensão diminui, o capacitor descarrega sua carga no circuito.

A capacidade de carga de um capacitor é medida em *farad* (F).

O farad (F) exprime a capacidade de um capacitor que precisa receber uma carga de 1 coulomb em suas placas, para estabelecer uma d. d. p. de 1 volt.

$$C = \frac{Q}{E}$$

sendo:

C – capacidade em farad

Q – carga adquirida em coulomb

E – tensão nas placas em volt

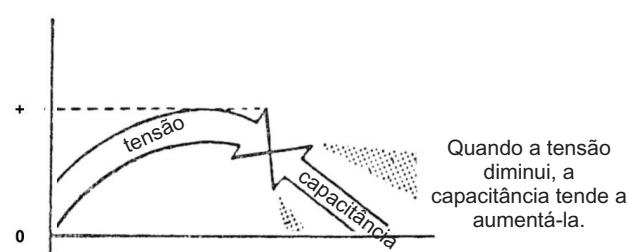
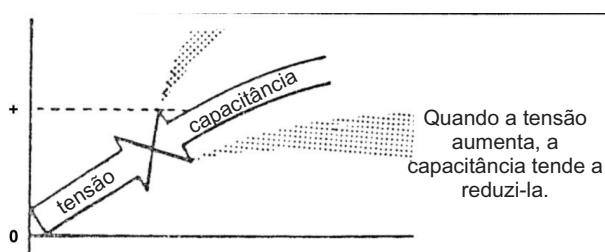
O valor da capacidade de um capacitor depende dos seguintes fatores:

a – área das placas;

b – tipo de dielétrico;

c – espessura do dielétrico.

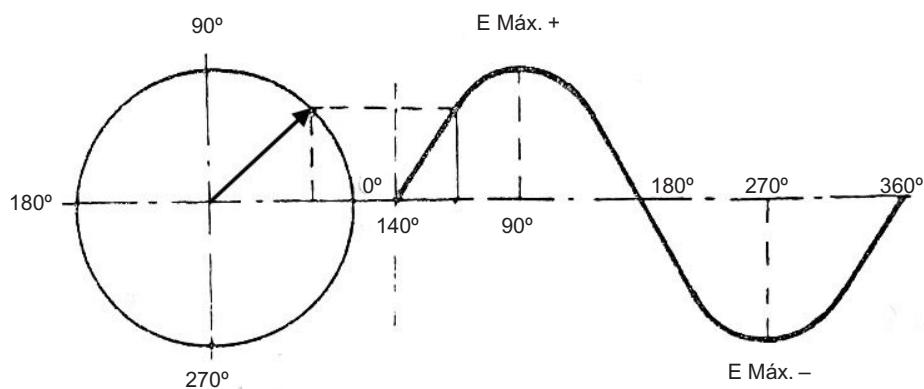
A capacidade tende a impedir a variação da tensão.



11 Defasagem entre a Tensão e a corrente

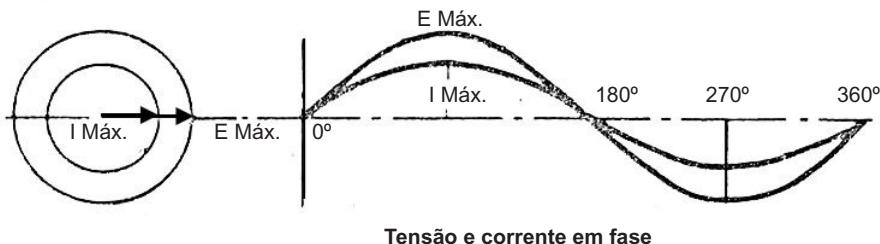
O ciclo da corrente alternada é dividido em 360° , do mesmo modo que o círculo geométrico.

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

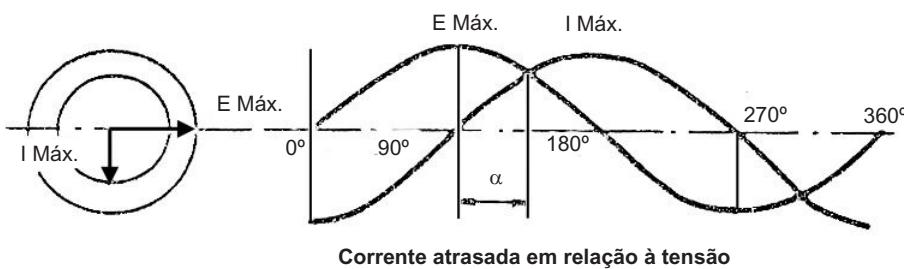


Desse modo, podemos representar a tensão e a corrente alternada por segmentos de reta proporcionais aos seus valores instantâneos. Essa representação é denominada geométrica.

Os valores máximos da corrente e da tensão, durante um ciclo, podem coincidir ou não. Quando coincidem, diz-se que ambos estão em fase. Essa coincidência é característica dos *circuitos resistivos ou ôhmicos*. Se não coincidirem, estão defasados.



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



Se a corrente alternada passa por um indutor (bobina), a corrente estará atrasada de um ângulo de 90° ($\alpha = 90^\circ$) em relação à tensão, devido aos efeitos de auto-indução.

Essa característica é própria do circuito indutivo.

Na prática, não existe um circuito puramente resistivo ou indutivo, porém, em alguns casos, o valor de um ou de outro é tão pequeno, que não é levado em consideração.

Reatância indutiva

A resistência elétrica dos condutores depende apenas das suas características físicas, e não do tipo de corrente (contínua ou alternada) que por eles circula. Todas as equações podem ser aplicadas em C. C.

Nos circuitos de C. A. em que não haja efeitos de auto-indução, formados por resistores como lâmpadas incandescentes, estufas, ferro elétrico, ainda podemos usar as mesmas equações. Nos circuitos de C. A. formados por bobinas (indutores), porém, as correntes de auto-indução desenvolvidas nos enrolamentos tendem a se opor à corrente do circuito (lei de Lenz), criando assim outra dificuldade para a passagem da corrente elétrica.

A oposição criada num circuito de C. A. pelos efeitos de auto-indução é chamada *reatância indutiva*.

O valor da reatância indutiva (XL) depende do coeficiente de auto-indução (L) e do número de variações sofridas pela corrente, em cada segundo. A reatância indutiva é medida em ohm (Ω), e o valor, calculado pela seguinte equação:

$$XL = 2\pi FL$$

XL – reatância indutiva em ohm

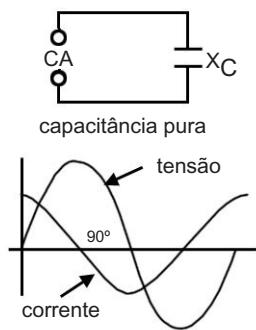
L – coeficiente de auto-indução, em henry (H)

F – freqüência em hertz

Reatância capacitiva

A capacidade produz, num circuito de corrente alternada, um avanço da corrente em relação à tensão, tendo, portanto, efeito contrário à reatância indutiva. Esse avanço é chamado *reatância capacitiva*.

Num circuito em que a oposição à passagem da corrente elétrica seja apenas causada pela reatância capacitativa, a tensão estará atrasada 90° em relação à corrente.



A corrente está adiantada de 90° em relação à

A reatância capacitiva é medida em ohm e determinada pela seguinte equação:

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

X_C = Reatância capacitiva em ohm

F = Freqüência em hertz

C = Capacitância em farad

Na prática, são mais usados os submúltiplos do farad, isto é:

Microfarad (μF) = 0,000001 farad

Nanofarad (nF) = 0,000000001 farad

Curiosidade

A era da Eletrônica não poderia existir sem os capacitadores. Eles são empregados, juntamente com outros dispositivos, para reduzir a flutuação de voltagem nas fontes eletrônicas de tensão, para transmitir sinais por meio de pulsos, para gerar ou detectar oscilações eletromagnéticas de radiofreqüência, para produzir atrasos na propagação de sinais, e de muitas outras maneiras. Na maioria dessas aplicações, a diferença de potencial entre as placas não é constante, mas depende do tempo, freqüentemente de um modo senoidal ou pulsado.

Impedância

É o comportamento do circuito elétrico em função da resistência elétrica (R), da reatância indutiva (XL) e da reatância capacitiva (Xc), considerando-se cada um desses componentes isoladamente.

Vejamos agora o que acontece quando, no mesmo circuito, aparece mais de um desses componentes:

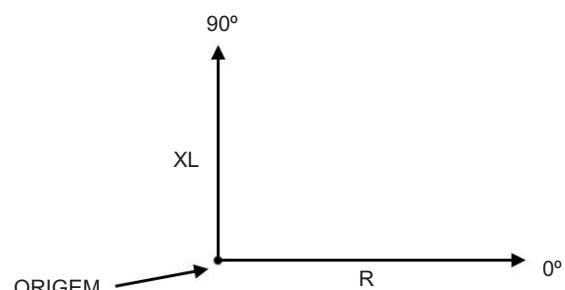
- num circuito resistivo, não há defasagem entre E (tensão) e I (corrente), portanto, o ângulo de fase (ϕ) é igual a 0°.
- num circuito indutivo, a corrente está defasada em atraso de 90° da tensão;
- num circuito capacitivo, a corrente está 90° adiantada da tensão.

Quando num circuito de C. A. há mais de um desses componentes, levam-se em consideração os ângulos de fase e o valor de cada componente, para determinarmos o valor do conjunto.

– Circuito em série de C. A. com um resistor e um indutor:

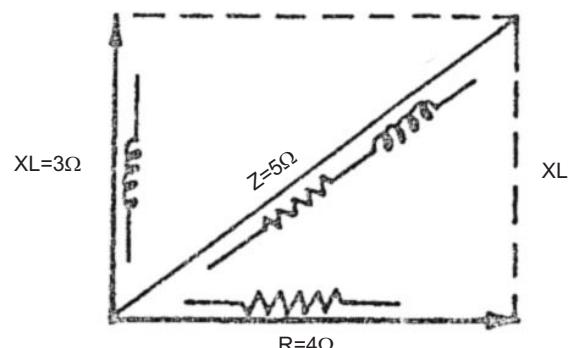


Como o ângulo de fase de $R = 0^\circ$ e de $XL = 90^\circ$, obtém-se o seguinte diagrama vetorial para os dois componentes:



A resultante ou soma vetorial de $R + XL$ é a *impedância* do circuito.

A impedância é representada pela letra Z , e é a hipotenusa de um triângulo retângulo cujos catetos representam R e XL .



aplicações

Observando a figura acima, em que $XL = 3\Omega$ e $R = 4\Omega$, pede-se o valor de Z .

Para calcular Z , aplica-se o teorema de Pitágoras:

$$Z^2 = R^2 + XL^2$$

Assim,

$$Z = \sqrt{R^2 + XL^2}$$

Substituindo as letras pelos valores correspondentes, teremos:

$$Z = \sqrt{4^2 + 3^2} = \sqrt{16 + 9} = \sqrt{25} = 5$$

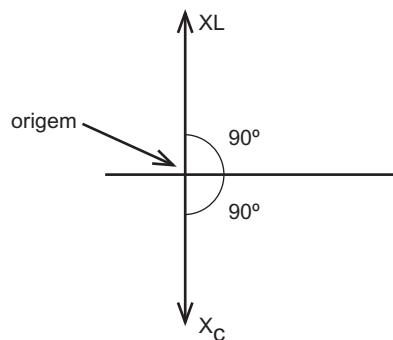
Num circuito de C. A. cujos componentes forem um indutor e um capacitor ligados em série, a impedância será a diferença dos valores dos componentes.

$$Z = XL - Xc \quad \text{ou} \quad Z = Xc - XL$$



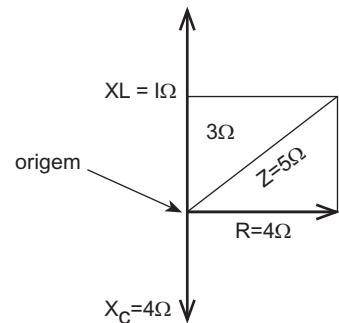
Para entender essa equação, é importante lembrar que o ângulo de fase XL é 90° em atraso e de Xc , 90° avançado. Fazendo a composição ou diagrama dos vetores XL e Xc , teremos os dois na mesma direção e em sentidos opostos:

$$90^\circ + 90^\circ = 180^\circ$$



Se considerarmos um circuito em série de corrente alternada com um resistor, um indutor e um capacitador, teremos o seguinte diagrama vetorial.

$$\begin{aligned} Z &= \sqrt{R^2 + (XL - Xc)^2} \\ Z &= \sqrt{4^2 + (7 - 4)^2} \\ Z &= \sqrt{16 + 9} = \sqrt{25} = 5\Omega \end{aligned}$$



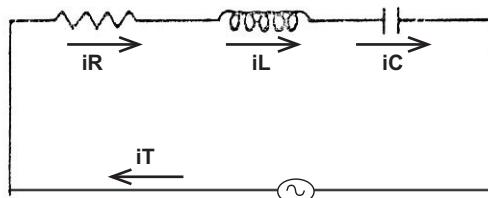
Conclui-se então que, em C. A. a equação $\frac{E \text{ (tensão)}}{I \text{ (corrente)}}$ é a impedância do circuito, e não a resistência ôhmica (R).

Corrente e tensão nos circuitos de C. A.

Nos circuitos de C.A., a tensão e a intensidade da corrente devem ser calculadas do mesmo modo que a impedância, isto é, o cálculo deve ser feito considerando-se os ângulos de fase.

Nos circuito de C. A., a intensidade da corrente é a mesma em qualquer componente do circuito, isto é:

$$iT = iR = iL = iC$$



iT = corrente do circuito

iR = corrente no resistor

iL = corrente no reator (indutor)

iC = corrente no capacitor

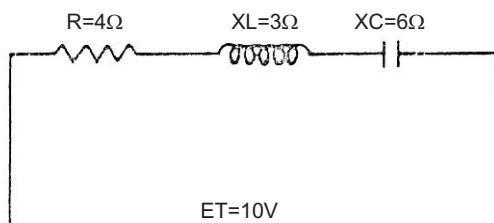
Podemos notar essa equação é semelhante à que se aplica nos circuitos em série de C. C. e nos circuitos ôhmicos ou resisitivos:

$$IT = i1 = i2 = i3 \dots \text{etc.}$$

Para calcularmos a tensão total (ET) de um circuito em série cujos componentes sejam um resistor, um capacitor e um reator, temos que considerar os ângulos de fase de cada um desses componentes.

aplicação

1- Observe o circuito abaixo.



A intensidade total (IT) será:

$$IT = \frac{ET}{Z} = \frac{ET}{\sqrt{R^2 + (XC - XL)^2}} = \frac{10}{\sqrt{4^2 + (6 - 3)^2}} = \frac{10}{\sqrt{4^2 + 3^2}} = \frac{10}{\sqrt{16 + 9}} = \frac{10}{\sqrt{25}} = \frac{10}{5} = 2A$$

Calculando a tensão em cada componente do circuito:

$$\text{Tensão no resistor} \quad ER = I \times R = 2 \times 4 = 8 \text{ V}$$

$$\text{Tensão no reator} \quad EI = I \times XL = 2 \times 3 = 6 \text{ V}$$

$$\text{Tensão no capacitor} \quad EC = I \times XC = 2 \times 6 = 12 \text{ V}$$

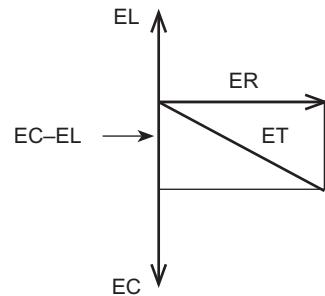
A soma aritmética das tensões resulta num valor superior à tensão da linha (ET). Mas se considerarmos os ângulos de fase das tensões em cada um dos componentes, teremos a composição vetorial ao lado.

Logo, num circuito série de C. A.,

$$ET = \sqrt{ER^2 + (EC - EL)^2}$$

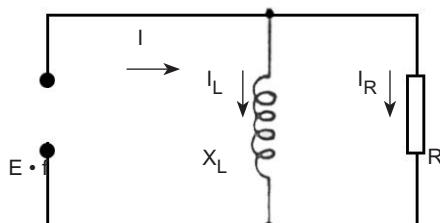
Com os valores do exemplo dado, teremos:

$$ET = \sqrt{8^2 + (12 - 6)^2} = \sqrt{8^2 + 6^2} = \sqrt{64 + 36} = \sqrt{100} = 10 \text{ V}$$



2- Num circuito em paralelo, constituído por um resistor e um indutor, aplicamos uma tensão E, com freqüência f de uma fonte geradora de C. A. Pelo resistor circula uma corrente I_R dada por:

$$I_R = \frac{E}{R}, \text{ em fase com } E.$$



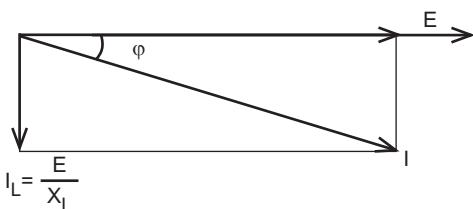
$$I_R = \frac{E}{R}$$

Pelo reator, temos:

$$I_L = \frac{E}{X_L}, \text{ atrasada de } 90^\circ \text{ em relação a } E.$$

Pela linha circula uma corrente I , cujo valor é a soma vetorial ou trigonométrica de I_R com I_L , defasada de um ângulo em relação a E .

$$I = \sqrt{I_R^2 + I_L^2}$$



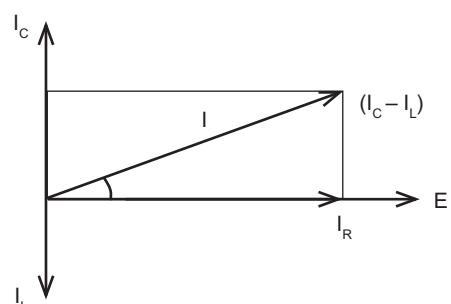
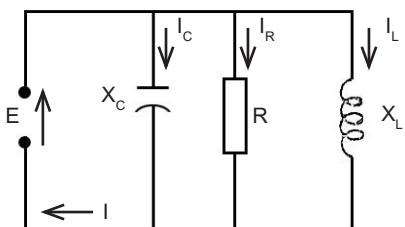
$$I = \sqrt{I_R^2 + I_L^2}$$

Se ligarmos mais uma derivação e nela colocarmos um capacitor, a corrente que passa por ele será $I = EX_c$, que estará adiantada de 90° em relação à tensão.

Desse modo, teremos: $I = \sqrt{I_R^2 + (I_L - I_C)^2}$

A impedância será:

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

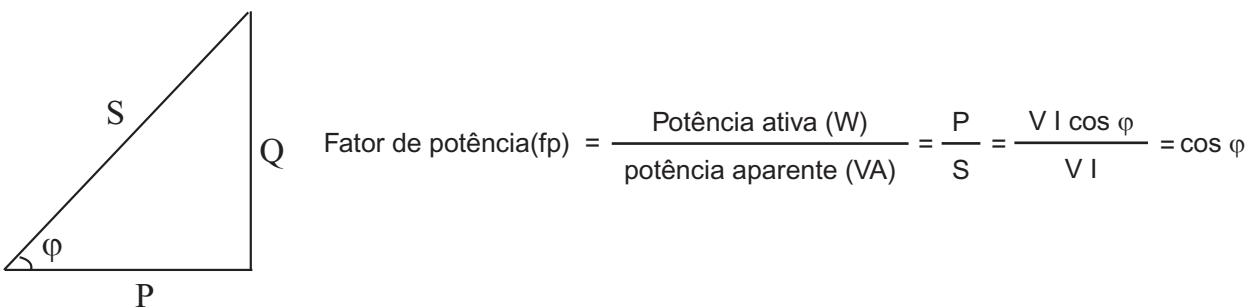


12 Fator de Potência

As cargas são em geral *indutivas* e assim, a corrente é atrasada em relação à tensão aplicada. A potência ativa P fornecida a uma carga é a medida de *trabalho útil* que a carga pode executar por unidade de tempo.

Como um transformador, especificado em VA, kVA ou MVA, é muitas vezes utilizado à tensão fixa, a potência aparente é simplesmente uma indicação da corrente máxima permitida. Teoricamente, se uma carga indutiva ou capacitativa pura fosse a ele ligada, o transformador poderia ser plenamente carregado e a potência ativa transferida ao seu secundário seria nula.

Com relação ao triângulo de potências, a hipotenusa S dá uma indicação da carga no sistema, ao passo que o cateto P mede a potência útil fornecida. É, portanto, desejável que S se aproxime o máximo possível de P, isto é, que ângulo φ se aproxime de zero, ou seja, que o fator de potência (fp) seja unitário. No caso comum de uma carga indutiva é quase sempre possível aumentar o fp colocando capacitores em paralelo com a carga. Observe-se que como a tensão nos terminais de carga permanece a mesma, a potência útil (P) não varia. Como fp é aumentado, a corrente e a potência aparente diminuem e obtém-se uma utilização mais eficiente do sistema.



aplicação

1) Um motor de indução, cuja saída é de 2 HP, tem rendimento de 85%. Com essa carga, o fator de potência é 0,8 atrasado. Determinar as potências de entrada. Considerar 1HP = 745,70W

$$P = 2\text{HP} \times 877,5\text{W/HP} = 1755\text{W}$$

$$S = P/fp = 1755/0,8 = 2190\text{VA}$$

$$\varphi = 36,9 \text{ graus atrasado}$$

$$Q = 2190 \times \sin 36,9^\circ = 1315 \text{ VAr indutivo}$$

2) Um transformador de 25kVA fornece 12 kW a uma carga com fp = 0,6 atrasado. Determinar o percentual de plena carga que o transformador alimenta. Deseja-se alimentar cargas adicionais com fp unitário. Quantos kW podem ser alimentados, até que o transformador esteja à plena carga?

$$\text{Para } P = 12 \text{ kW} \Rightarrow S = P / \cos \varphi = 12 / 0,6 = 20 \text{ kVA.}$$

$$\text{Percentual} = 20 / 25 = 80\%$$

$$\text{Como } \varphi = 53,1 \text{ graus, } Q = S \times \sin \varphi = 20 \times 0,8 = 16 \text{ kVAr indutivo.}$$

Cargas adicionais com fp = 1,

Q permanece inalterado.

À plena carga, o novo valor de $\varphi = \text{arc sen} (16/25) = 39,8^\circ$ atrasado.

$$P \text{ total} = \text{novo } S \times (\cos \text{novo } \varphi) = 25 \times \cos 39,8^\circ = 19,2 \text{ kW.}$$

$$\text{Carga adicional} = 19,2 - 12 = 7,2 \text{ kW}$$

$$\text{Novo fp} = \cos 39,8^\circ = 0,768 \text{ atrasado.}$$

Vários métodos são utilizados para suprir a necessidade de reativos em um sistema elétrico. Capacitores podem ser conectados em paralelo com as cargas, suprindo reativo em avanço, para compensar o fator de potência em atraso de motores ou outros equipamentos indutivos, bem como os barramentos de subestações para compensar os requisitos de reativo em atraso dos transformadores e das linhas. Capacitores são também instalados nas linhas de distribuição, para compensar os requisitos de reativo dos consumidores.

Mantendo-se esses capacitores energizados permanentemente, pode-se acarretar excesso de geração de reativos e consequente elevação de tensão em períodos de carga leve. A quantidade adequada de reativos a compensar depende, portanto, do montante de carga conectada na ocasião, e de seu fator de potência.

Para melhor entendimento do significado do fator de potência, deve-se observar a composição da energia elétrica do ponto de vista físico e de seus usos finais.

A energia elétrica utilizada nas empresas ou residências possui duas componentes fundamentais: a *energia ativa* e a *energia reativa*. A primeira é a que realiza trabalho, isto é, se transforma em outra forma de energia como luz, calor ou força motriz, portanto mudando de forma. Já a energia reativa é uma componente da energia original que não será transformada, continuando com o mesmo caráter após o uso sendo, ainda, portanto, uma forma de energia elétrica. Na verdade ela é o resultado da passagem da energia elétrica por determinados equipamentos, servindo como meio para que estes possam funcionar.

É o caso, por exemplo, de motores elétricos.

Para que funcionem, eles precisam ter uma parte de sua carcaça magnetizada, a fim de que o rotor gire. Esta magnetização é obtida pela circulação de corrente no motor sem que seja gasto praticamente nada de energia ou seja, toda a energia que entra no motor para magnetizá-lo sai na mesma quantidade sendo devolvida à rede, apenas alterada fasorialmente, sendo então chamada de “reativa”. Desta forma não há um “gasto” de energia de forma que se possa cobrar algo por ela.

Por outro lado, esta quantidade de energia ocupa lugar em toda a rede, limitando a quantidade final que esta pode transportar. Uma situação péssima pois, em tese, poder-se-ia fornecer mais energia a mais consumidores, porém a rede está ocupada com energia reativa.

Sob esta ótica, o *fator de potência* é a medida que representa o grau de eficiência de um sistema elétrico, variado de 0 a 1,0. Quanto mais próximo de 1,0 for o fator de potência de um consumidor (região, empresa, rede, transformador ou equipamento) mais eficiente será o uso do sistema elétrico, isto é, mais condições de geração de trabalho útil ele terá.

As cargas que transformam a energia original em reativa são de dois tipos: as *indutivas (magnetizantes)* e as *capacitivas*. Fisicamente, a energia elétrica é uma onda senoidal e o que ambas as cargas produzem na energia original é uma defasagem de 90° : a indutiva “atrasa” e a capacitiva “adianta” a onda em 90°.

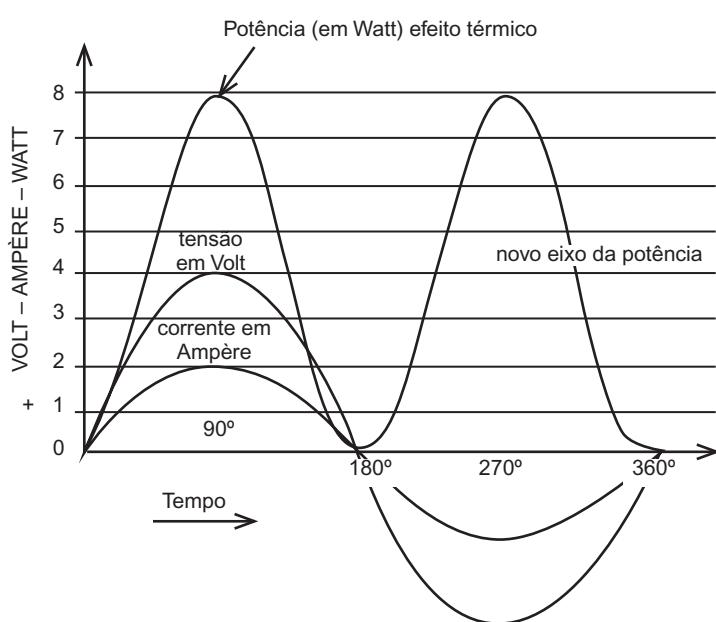
As *cargas magnetizantes* são em geral provocadas por enrolamentos (bobinas) que compõem os mais diversos produtos elétricos, especialmente transformadores, motores e reatores eletromagnéticos.

As *capacitivas* constituem-se basicamente de capacitores e motores síncronos.

Potência nos circuitos de C. A.

Nos circuitos de C. C., a potência é calculada pela equação $P = E \cdot I$. Essa equação só pode ser aplicada nos circuitos de C. A. quando E e I estão em fase.

Curvas da potência, da tensão e da corrente de um circuito resistivo.



Quando a tensão e a corrente estão em fase, todos os valores instantâneos da potência estão acima do ponto zero, e a curva é totalmente positiva. Durante o primeiro semiciclo, a curva da potência aumenta de zero até um máximo e retorna a zero, ao mesmo tempo que as curvas de E e I. Portanto, os valores instantâneos da potência são iguais ao produto dos valores instantâneos de E e I.

No segundo semicírculo, as curvas de E e I são negativas, porém a curva da potência continua positiva, porque o produto de dois valores negativos é positivo (veja tabela).

(+) x (+) = (+)
(+) x (-) = (-)
(-) x (+) = (-)
(-) x (-) = (+)

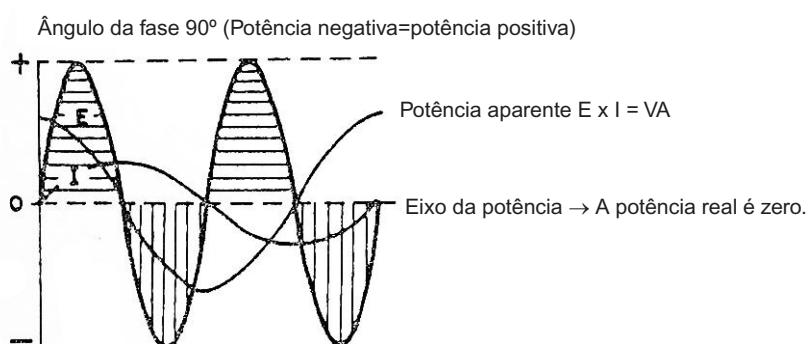
Notamos que a curva da potência no início e no fim do semicírculo apresenta valores menores que E e I. Isso acontece porque, quando multiplicamos duas frações, o produto é uma fração menor (exemplo: $0,5V \times 0,5A = 0,25W$). Por essa razão, todos ou alguns valores instantâneos da curva da potência podem ser menores do que a tensão e a corrente.

A potência efetiva é a média da onda da potência.

Nos circuitos de C. A. em que haja indutâncias, capacitâncias e resistências, o cálculo da potência deve ser feito considerando-se os ângulos de fase do circuito.

Nos circuitos de C. A. temos três potências, que estudaremos a seguir:

Se considerarmos um circuito puramente indutivo ($\alpha = 90^\circ$), teremos as seguintes curvas para P, E e I:



Notamos que de 0° a 90° , E e I são positivos, logo, a potência é positiva ($+ \times + = +$)

De 90° a 180° , I é positivo e E é negativo, logo a potência é negativa ($+ \times - = -$).

De 180° a 270° , E e I são negativos, logo a potência é positiva ($- \times - = +$).

De 270° a 360° , E é positivo e I é negativo; logo, a potência é negativa ($+ \times - = -$).

À curva acima do ponto zero, chamamos de *potência aparente*.

À curva abaixo do ponto zero, chamamos de *potência reativa*.

A *potência real ou ativa* do circuito é a diferença entre a *potência aparente* e a *potência reativa*.

No caso de um circuito puramente indutivo, a potência real ou ativa é zero.

A unidade da potência aparente é o volt-ampère (VA), que é igual a E. I.

A potência real tem como unidade o watt (W).

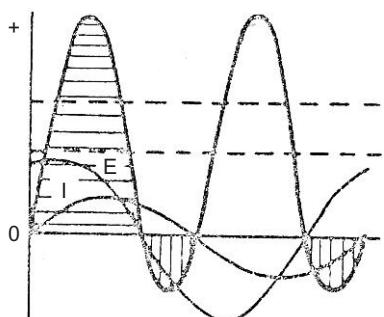
A potência reativa é igual a $E \times I R$ (corrente reativa), e a unidade é o VA_R (volt-ampère reativo).

Na prática, não existe um circuito puramente indutivo, pois a corrente elétrica sempre encontra nos circuitos a resistência ôhmica dos condutores. Por isso, no cálculo da potência consideramos o circuito como:

a - Resistivo-Indutivo;

b - Resistivo-Indutivo-Capacitivo.

Curvas de um circuito Resistivo-Indutivo, com os valores de R e XL iguais (ângulos de fase a 45°)



Ângulo de fase 45° (potência positiva = potência negativa)

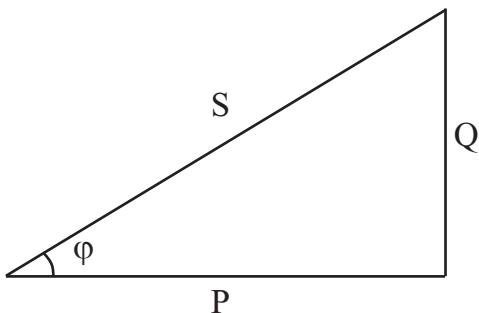
Potência aparente $\rightarrow E \times I = V.A$

Eixo da potência \rightarrow potência real $\rightarrow E.I \cos \varphi$

A média dos valores instantâneos da potência real está representada por um eixo traçado a meio caminho entre os máximos opostos da curva.

As mesmas relações trigonométricas que usamos nos cálculos da impedância são usadas nos cálculos das potências.

Diagrama das potências



S = potência aparente

P = potência real

Q = potência reativa

$$S = \sqrt{P^2 + Q^2}$$

$$S = E \cdot I$$

$$Q = S \cdot \sin \varphi$$

$$P = E \cdot I \cdot \cos \varphi$$

O cosseno do ângulo de defasagem ($\cos \varphi$) é chamado *fator de potência do circuito*.

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

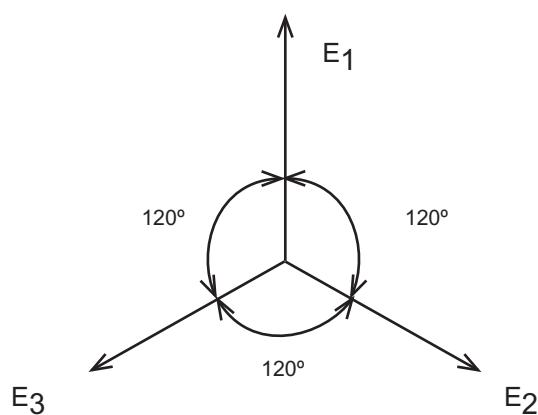
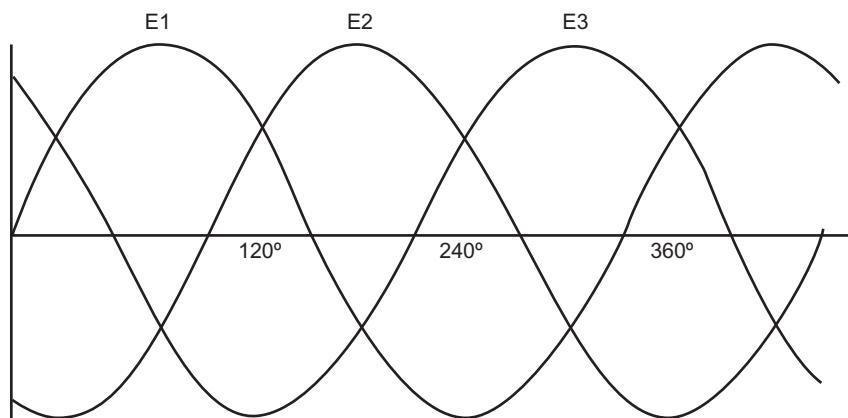
Para melhor aproveitamento das instalações industriais, é conveniente manter, de alguma maneira, o fator de potência próximo da unidade.

O recurso mais usado com essa finalidade é a instalação de capacitores, para se elevar o fator de potência. A NB-3 recomenda 0,92 para o fator da potência medido junto ao medidor de energia.

13 Circuitos Trifásicos

Quando uma linha é formada por três condutores com tensões iguais entre eles, porém defasadas de 120° , temos uma rede trifásica.

Representação da corrente alternada ou tensão trifásica.



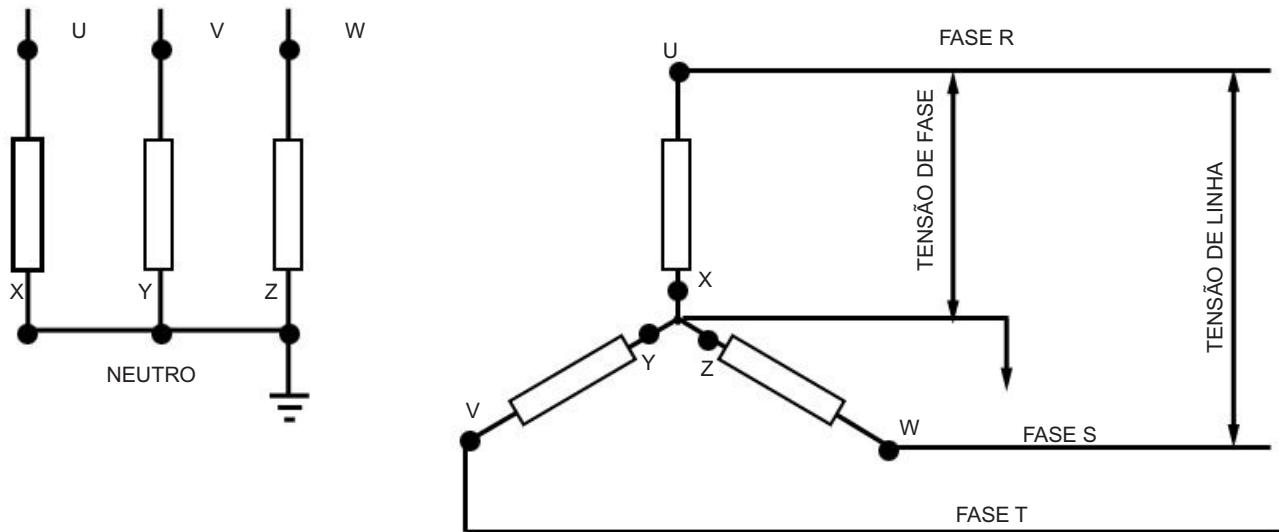
Quando ligamos a uma linha trifásica três elementos receptores, temos um circuito trifásico.

Conforme a maneira de efetuarmos as ligações, temos um *círcuito estrela* (Y) ou *triângulo* (Δ).

Círcuito estrela (Y)

Num circuito estrela (Y), as três extremidades dos finais dos elementos são ligadas entre si, e as três iniciais à linha.

A corrente que passa pela linha é a mesma que passa pelos elementos, isto é, a *corrente de linhas é igual à corrente de fase*.



$$I = I_{\text{Linha}} = I_{\text{Fase}}$$

O ponto comum aos três elementos chama-se *neutro*. Se, desse ponto, se tira um condutor, temos o *condutor neutro*, que em geral, é ligado à terra.

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

A relação entre elas é:

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

$$E_F = \frac{EL}{\sqrt{3}}$$

Círcuito triângulo ou delta(Δ)

Neste tipo de circuito, a extremidade final de um elemento é ligada à inicial do outro (Fig. 1), de modo que os três fiquem dispostos eletricamente, como lados de um triângulo equilátero (Fig. 2).

Os vértices são ligados à linha.

Assim: $E = E_F \text{ e } I = I_F \sqrt{3}$

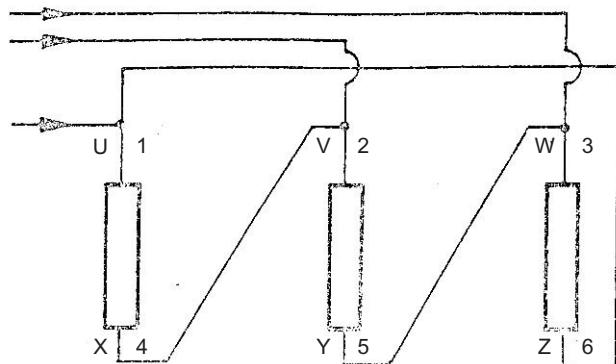


fig. 1

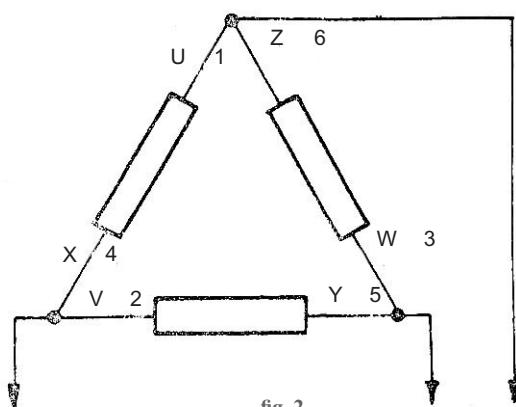


fig. 2

Os elementos de um receptor trifásico são representados pelos seguintes elementos:

extremidades iniciais	extremidades finais
U ou 1	X ou 4
V ou 2	Y ou 5
W ou 3	Z ou 6

Cada um desses elementos tem sua polaridade, que deve ser conservada na ligação.

A distribuição de energia elétrica é feita, em geral, em sistemas trifásicos, cujas redes podem ser ligadas em estrela ou em triângulo.

Na rede em Y, o neutro é ligado à terra, obtendo-se duas tensões, uma entre fase e neutro e outra entre fases, $\sqrt{3}$ vezes maior;

Ex: $E_F = 127V$ (entre fase e neutro);

$$E = 127 \cdot \sqrt{3} = 220V \text{ (entre fases).}$$

Em geral, as cargas monofásicas (lâmpadas e pequenos motores) são ligadas à tensão mais baixa, e as trifásicas (força, aquecimento industrial) à mais alta.

As cargas monofásicas, num circuito trifásico, devem ser distribuídas igualmente entre as fases, para que uma não fique sobrecarregada em detrimento das outras.

Potência nos circuitos trifásicos

Num circuito trifásico ligado em estrela, temos:

$$E = E_F \sqrt{3} \quad \text{e} \quad I = I_F$$

A potência real em cada fase (P_{WF}) será:

$$P_{WF} = E_F \cdot I_F \cdot \cos\phi$$

A potência nas 3 fases será:

$$P_W = 3 E_F \cdot I_F \cos \varphi$$

Num circuito em triângulo, temos:

$$E = E_F \quad \text{e} \quad I = I_F$$

A potência real em cada fase (P_{WF}) será:

$$P_{WF} = E_F \cdot I_F \cdot \cos \varphi$$

Como temos, no circuito estrela,

$$E_F = \frac{E}{\sqrt{3}} \quad \text{e} \quad I_F = I$$

e no triângulo

$$E_F = E \quad I_F = \frac{I}{\sqrt{3}}$$

concluímos que tanto para estrela como para triângulo a potência real nas fases será:

$$P_W = E \cdot I \cos \varphi \cdot \sqrt{3}$$

A potência aparente (P_A) de um sistema trifásico será, portanto:

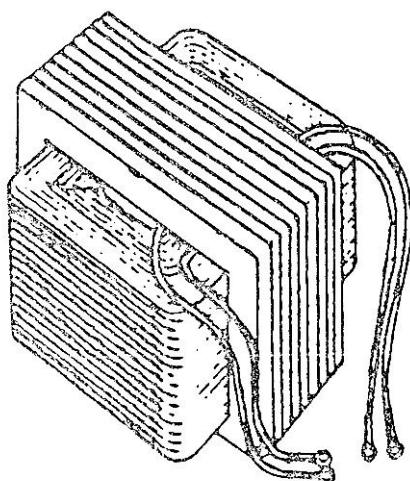
$$P_A = E \cdot I \sqrt{3}$$

Os alternadores (geradores de C . A.) e os transformadores têm suas potências indicadas pelos fabricantes em kW. A potência real e a potência aparente se equivalem, quando o fator de potência é 1. Daí a conveniência de se conseguir um fator de potência elevado nas instalações, para melhor aproveitamento da capacidade dos transformadores.

14 Transformadores

Quando se torna necessário modificar os valores da tensão e da corrente de uma fonte ou rede de energia elétrica, usamos um transformador.

O transformador é um aparelho estático, constituído essencialmente de dois enrolamentos isolados entre si, montados em torno de um núcleo de chapas de ferro.



O enrolamento que se liga à rede ou fonte de energia é chamado primário; o outro, no qual aparecem os valores da tensão e da corrente modificados, é chamado secundário.

O funcionamento dos transformadores é explicado pelos princípios de indução de Faraday, já estudados. As variações da corrente alternada aplicada ao primário produzem um fluxo magnético variável, que induz, no enro-

mento secundário, uma FEM que será proporcional ao número de espiras do primário (N_P) e do secundário (N_S). Essa proporção é chamada *relação de transformação*.

A tensão, a corrente e as espiras entre o primário e o secundário de um transformador são determinados pelas seguintes igualdades:

$$E_P/E_S = I_S/I_P = N_P/N_S$$

sendo:

E_P – tensão no primário

E_S – tensão no secundário

I_P – corrente no primário

I_S – corrente no secundário

N_P – número de espiras no primário

N_S – número de espiras no secundário

A intensidade de corrente (I) é inversamente proporcional ao número de espiras do primário e do secundário.

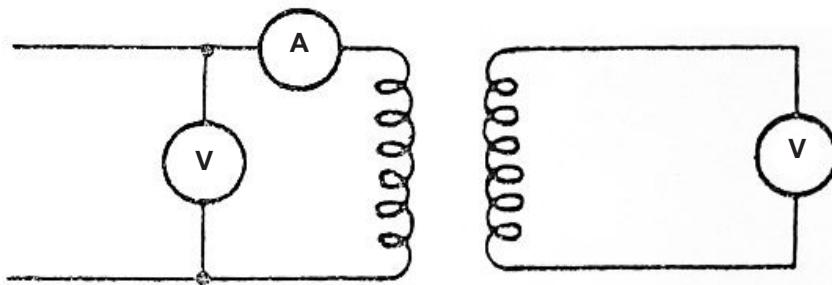
Um transformador não gera energia elétrica. Ele simplesmente transfere energia de um enrolamento para outro, por indução magnética. As perdas verificadas nessa transferência são relativamente baixas, principalmente nos grandes transformadores.

A percentagem de rendimento de um transformador é determinada pela seguinte equação:

$$\frac{P_{WS} \times 100}{P_{WP}}$$

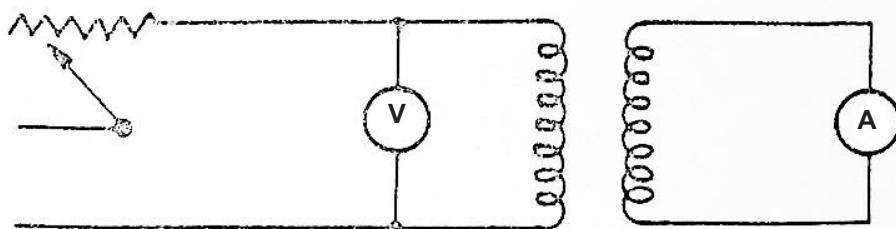
Quando desejamos comprovar a boa qualidade de um transformador, devemos submetê-lo a vários ensaios. Trataremos apenas dos *ensaios de funcionamento a vazio (sem carga)* e *de funcionamento com carga total (plena carga)*.

No ensaio de funcionamento a vazio, o primário do transformador é ligado a uma fonte com tensão e freqüência indicadas pelo fabricante. Um voltímetro é ligado ao primário e outro ao secundário. As indicações desses instrumentos nos darão a razão do número de espiras entre o primário e o secundário. Um amperímetro ligado ao primário indicará a corrente a vazio.



Como a perda I^2R (perda no cobre ou perda de joule), com o transformador sem carga, é menor que 1/400 da perda com carga total, ela será considerada irrelevante. A corrente indicada no amperímetro representa a perda no núcleo e é normalmente inferior a 5% da corrente com carga total, quando o núcleo é de boa qualidade. A *perda no núcleo* é também chamada *perda no ferro*.

O ensaio do transformador com carga total é feito da seguinte maneira:



1 - liga-se um amperímetro em curto-círcuito ao secundário e alimenta-se o primário com a fonte.

2 - utiliza-se um reostato (ou varivolt), e um voltímetro para medir a tensão aplicada ao primário.

3 - opera-se o reostato (ou varivolt), até que o amperímetro registre a corrente de carga total. Nessa condição, o voltímetro deverá indicar uma tensão de $\frac{E_p}{50}$.

15 Transporte de Energia Elétrica

Uma das grandes vantagens da energia elétrica sobre as demais formas de energia é a facilidade do seu transporte a grandes distâncias, sem perdas apreciáveis.

A energia elétrica é produzida por máquinas elétricas instaladas em usinas e transportada para os centros consumidores através de cabos elétricos. Essas usinas utilizam uma forma de energia – normalmente hidráulica (aproveitamento de quedas de água), térmica (carvão, óleo) ou nuclear (atômica) – que é transformada por suas máquinas em energia elétrica. As que funcionam com energia hidráulica são chamadas usinas hidrelétricas; as que usam energia térmica, usinas termoelétricas; e as que usam energia atômica, usinas nucleares.

As usinas termoelétricas e as nucleares podem ser construídas mais próximas dos centros consumidores do que as hidrelétricas, mas o seu custo operacional ainda é mais elevado que o destas últimas. Elas são usadas apenas como auxiliares das hidrelétricas, ou então, em locais onde não exista potencial hidráulico.

As usinas hidrelétricas ficam situadas, geralmente, em distâncias superiores a 30km dos centros consumidores. Se a tensão de transmissão fosse a mesma da utilização dos centros consumidores, mesmo que os condutores usados fossem de seções gigantescas, as perdas seriam tão grandes que o transporte da energia se tornaria impraticável.

Para demonstrarmos a importância da transmissão em alta tensão, tomemos como exemplo o problema resolvido a seguir.

aplicação

A distância entre uma fonte de energia elétrica monofásica de 200V e o local de utilização dessa energia é de 6 km. A potência por transmitir é de 4 000W, e o condutor usado será o cabo de 10mm². Admite-se 6% de perda na transmissão.

Com a transmissão sendo feita na tensão da fonte, a perda seria:

Resistência do cabo de 10mm² por km = 1,3Ω.

Para a distância de 6km, os dois condutores teriam 12 km.

Logo, para R da linha teríamos:

$$12 \times 1,3 = 15,6\Omega.$$

Para I da linha teríamos:

$$I = \frac{W}{E} = \frac{4000}{200} = 20A$$

A perda na linha seria:

$$W = I^2R = 20^2 \times 15,6 = 400 \times 15,6 = 6\,240W$$

Nessas condições, a transmissão seria impraticável, perdendo-se toda a energia.

A solução para eliminar a perda seria elevar a tensão na fonte e abaixá-la no local de utilização, usando-se transformadores para reduzir a corrente (I) da linha.

A perda admitida de 6% pode ser dividida do seguinte modo:

2% para cada transformador;

2% para a linha.

Com 2% de perda no primeiro transformador, a potência na linha será:

$$2\% \text{ de } 4\,000 = \frac{4\,000 \times 2}{100} = \frac{8\,000}{100} = 80W$$

$$4\,000 - 80 = 3\,920W$$

Para a perda na linha teremos:

$$2\% \text{ de } 3\ 920 \text{ W} = \frac{3\ 920 \times 2}{100} = \frac{7\ 840}{100} = 78,4 \text{ W}$$

Para I da linha teremos:

$$I = \sqrt{\frac{W}{R}} = \sqrt{\frac{78,4}{15,6}} = \sqrt{5} = 2,3 \text{ A}$$

A tensão na linha será:

$$E = \frac{W}{R} = \frac{3\ 920}{2,3} = 1\ 700 \text{ V}$$

A potência no segundo transformador será:

$$3\ 920 - 78,4 = 3\ 841,6 \text{ W}$$

A potência para a utilização será:

$$3\ 841,6 - 2\% \text{ da perda no segundo transformador} = 3\ 764 \text{ W}$$

O transformador na fonte elevará a tensão para 1 700 V, e o transformador no local de utilização abaixará para 200 V.

Nos cálculos, não consideramos outros fatores que contribuem para maior exatidão, como F.P. dos transformadores e da carga, a reatância e capacidade da linha.