CAPÍTULO I

ELETRICIDADE E MAGNETISMO

Estrutura Atômica da Matéria, Metais e Ligações Covalentes

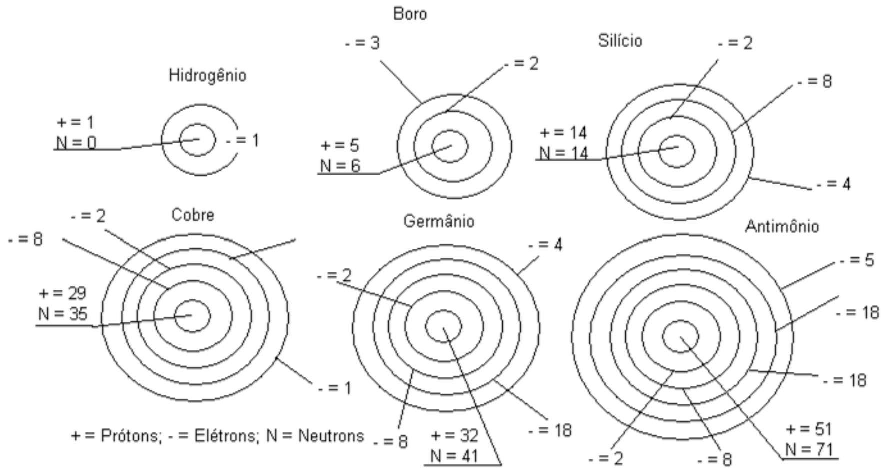
Uma teoria ainda hoje aceita sobre a estrutura atômica da matéria é a teoria de Rutherford – Bohr, a qual afirma ser o átomo constituído de um núcleo formado por prótons e nêutrons, em torno do qual giram os elétrons. A física quântica está cada vez mais descobrindo outros elementos internos do átomo, porém vamos ficar apenas com a teoria de Rutherford – Bohr, pois ela se adapta às nossas necessidades didáticas de embasamento e é suficiente para podermos adentrar na eletricidade básica.

No núcleo está praticamente concentrada toda a massa do átomo, que é constituída de prótons, carregados positivamente, e nêutrons, que não possuem cargas. Portanto, devido aos prótons, o núcleo está carregado positivamente. Os elétrons possuem uma massa muito pequena, quase desprezível quando comparada à massa do núcleo, e movimentam-se ao redor do núcleo a distâncias de até dez mil vezes o diâmetro do núcleo, descrevendo órbitas fechadas e distribuídas em no máximo sete camadas. Os elétrons estão carregados negativamente.

Essas camadas de elétrons são denominadas de K, L, M, N, O, P e Q, sendo que a camada K é a camada mais próxima do núcleo e a Q é a mais distante. As camadas intermediárias vão se afastando do núcleo conforme a ordem alfabética acima. Cada camada pode suportar um determinado número máximo de elétrons, conforme mostra a tabela a seguir.

CAMADAS	1ª (K)	2ª (L)	3ª (M)	4ª (N)	5ª (O)	6ª (P)	7ª (Q)
Nº Máx. Elétrons	2	8	18	32	32	18	8

A figura a seguir mostra alguns exemplos de modelos atômicos de alguns átomos.



Modelos atômicos de alguns átomos

A camada externa de elétrons (última camada) é denominada camada de "valência". Ela é responsável pela junção dos átomos a fim de formar uma molécula, que, por sua vez, ao unir-se com outras moléculas, forma um corpo.

Um átomo só é estável, ou seja, não se combina ou reage com outros átomos, quando a sua camada de valência possui oito elétrons ou, exclusivamente no caso do gás hélio, dois elétrons. Esses elementos que possuem oito elétrons na camada de valência são denominados de gases nobres. Observe na figura anterior que o neônio é um gás nobre, pois possui oito elétrons em sua última camada. Todos os outros átomos, em condições normais, não podem existir sozinhos, ou seja, precisam se combinar a fim de atingir a estabilidade acima referida. Quando os átomos se combinam com outros átomos iguais, formam o que chamamos de substância simples. Quando os átomos se combinam com átomos diferentes, forma-se o que denominamos de substância composta.

Quando um átomo está em equilíbrio, o número de elétrons é igual ao número de prótons. Observe que o hidrogênio é o elemento mais simples, pois possui apenas um próton em seu núcleo e um elétron em órbita. Por outro lado, o urânio é um dos mais complexos, pois possui 92 prótons em seu núcleo e 92 elétrons em órbita.

Quando um elétron sai de sua órbita, e também do átomo, esse átomo fica com carga total positiva, pois nesse caso haverá mais prótons do que elétrons. Quando isso acontece, esse átomo passa a ser denominado de "íon".

Existem elementos cujos elétrons da última camada são fracamente atraídos e facilmente retirados. Esses elementos são denominados metais. A figura anterior mostra o átomo de cobre, que é considerado um metal. Observe que a camada de valência do átomo de cobre possui apenas um elétron, que pode sair facilmente de seu átomo. Os elétrons que saem de seus átomos são denominados de elétrons livres, os quais são os responsáveis pela corrente elétrica, conforme veremos mais à frente.

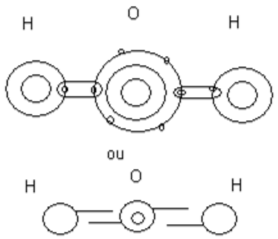
Entre os diversos mecanismos de formação de substâncias, vamos estudar o mecanismo da associação em pares de elétrons, denominado "ligações covalentes".

Nas ligações covalentes, cada elétron participa tanto do seu átomo quanto do átomo adjacente, de modo que a última camada desses dois átomos se une para formar uma só camada compartilhada entre eles. Esse compartilhamento possui oito átomos, e atinge-se assim a condição de equilíbrio (oito elétrons na última camada).

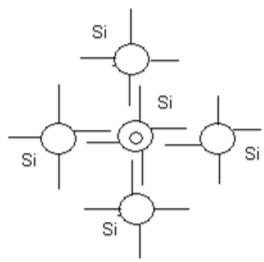
Observe na figura a seguir que uma molécula de água é formada por dois átomos de hidrogênio, cada um com um elétron em sua última camada, e por um átomo de oxigênio, que possui seis elétrons em sua última camada. Juntando-se os seis elétrons da última camada do átomo de oxigênio com o elétron da última camada de um dos átomos de hidrogênio e mais o elétron da última camada do outro átomo de hidrogênio, forma-se uma molécula com dois átomos de hidrogênio e um átomo de oxigênio unidos pela última camada. Temos a molécula chamada água (H_2O).

Vamos detalhar também a estrutura atômica do silício, fundamental para o estudo dos semicondutores.

Cada átomo de silício possui quatro elétrons na camada de valência. Esses quatro elétrons unem-se a um dos elétrons des respectivas camadas de valência de outros quatro átomos de silício,para formar o material denominado silício, conforme mostra a figura a seguir.



Molécula de água



Estrutura atômica do silício

Ligações covalentes

Corpos Bons e Maus Condutores e Semicondutores

Um material é bom condutor quando os elétrons da camada de valência (elétrons de valência) estão fracamente ligados ao átomo e podem facilmente sair dele. Nessas condições, até mesmo à temperatura ambiente os elétrons de valência desprendem-se de seus átomos e seguem para outros em uma movimentação desordenada. Existe uma grande quantidade desses elétrons livres no interior de um corpo bom condutor, formando o que se chama de "nuvem eletrônica". Aplicando-se uma tensão as extremidades de um fio de cobre, por exemplo, os elétrons livres irão se movimentar de forma ordenada, de acordo com o campo elétrico produzido, e formarão o que se denomina "corrente elétrica". Voltaremos a esse assunto mais à frente.

O ouro, a prata, o alumínio, além do cobre, são metais bons condutores.

Por outro lado, quando os elétrons de valência estão firmemente ligados ao átomo, torna-se difícil arrancá-los de suas camadas. Esses materiais são maus condutores e denominados "materiais isolantes". Alguns elementos simples (constituídos de apenas um tipo de átomo) apresentam características isolantes, porém materiais compostos, como, por exemplo, a borracha, o teflon, a baquelita, etc., nos quais os elétrons estão firmemente ligados aos átomos, são materiais com maiores características isolantes. Quanto maior for a característica isolante do meio, mais difícil se torna a existência de uma corrente elétrica nesse ambiente. A dificuldade de se obter uma maior intensidade de corrente elétrica em um meio é conhecida como resistividade, ou resistência elétrica do material.

Entre o grupo dos bons condutores e o dos maus condutores está o grupo dos materiais semicondutores, cuja resistividade é maior do que a dos metais (condutores), porém menor do que a dos materiais isolantes. Os semicondutores apresentam uma resistividade entre 10^{-2} e 10^{-6} ohm. cm. Mais à frente vamos estudar o que é ohm.

Os semicondutores mais utilizados na eletrônica são o silício (em maior escala) e o germânio, os quais são usados na fabricação de diodos, transistores e outros componentes eletrônicos, que serão estudados no capítulo II.

A tabela a seguir mostra a resistividade de alguns materiais bons condutores, semicondutores e isolantes.

Material	Resistividade (ohm.cm)
Prata	$1,6*10^{-6}$
Cobre	$1,7*10^{-6}$
Ouro	$2,3*10^{-6}$
Alumínio	$2,8*10^{-6}$
Germânio	47
Silício	$21,4*10^{4}$
Vidro	$5*10^{4}$
Mica	$9*10^{16}$
Quartzo	$75*10^{18}$

Carga Elétrica e Campo Elétrico

Vimos anteriormente que as cargas elementares são os prótons e os elétrons, os quais estão dentro de um átomo. Por convenção, adotou-se a carga do próton como positiva e a do elétron como negativa, o que significa dizer que essas cargas possuem polaridades opostas.

Quando se aproximam duas cargas, as de mesma polaridade se repelem e as de polaridades opostas se atraem.

A unidade adotada para se medir a quantidade de carga elétrica que um corpo possui denomina-se "coulomb" (C).

A menor carga negativa que existe (carga elementar) é a carga de um elétron, que é igual a $1,6*10^{-19}$ C. Portanto, para se obter uma carga de 1 coulomb são necessários $1/(1,6*10^{-19}) = 6*10^{18}$ elétrons. Lembre-se, que 1 cm^3 de cobre possui $8*10^{22}$ elétrons livres, o que corresponde a uma carga total de elétrons livres de $1,33333*10^{4}$ C.

Uma carga elétrica no espaço (Q), seja ela puntiforme (um ponto) ou distribuída, modifica as características do espaço que a envolve de tal modo que, ao colocarmos uma outra carga elétrica (q) nesse espaço circunvizinho à outra carga, surgirá uma força de origem elétrica na carga q.

Essa força que surge em q se dá por causa das características modificadas do espaço circunvizinho à carga Q, que se denomina "campo elétrico". Portanto, o campo elétrico é o espaço com características modificadas devido à presença de cargas elétricas e responsável pelo suporte às interações elétricas entre duas ou mais cargas elétricas.

É obvio que a carga elétrica q também provoca um campo elétrico ao seu redor, o qual age sobre outras cargas situadas nesse campo.

A força elétrica que surge em uma carga elétrica devido à eletricidade existente na região onde se encontra essa carga é do tipo vetorial, ou seja, tem uma intensidade, uma direção e um sentido.

$\vec{F} = \mathbf{q} * \vec{E}$

$\vec{F}$ = Vetor Força elétrica

q = Carga elétrica (número real)

$\vec{E}$ = Vetor Campo elétrico

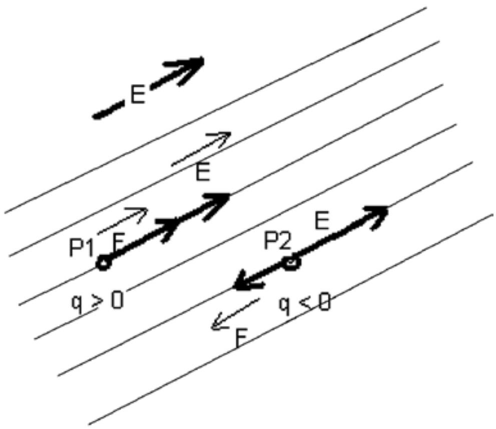
NOTA: Multiplicando-se o número real q pelo vetor E, temos:

Para q > 0, $\vec{F}$ e $\vec{E}$ possuem o mesmo sentido.

Para q < 0, $\vec{F}$ e $\vec{E}$ possuem sentidos contrários.

Tanto para q > 0, como para q < 0 $\vec{F}$ e $\vec{E}$ possuem a mesma direção.

Observe a figura a seguir.



Direção, sentido e intensidade da força elétrica

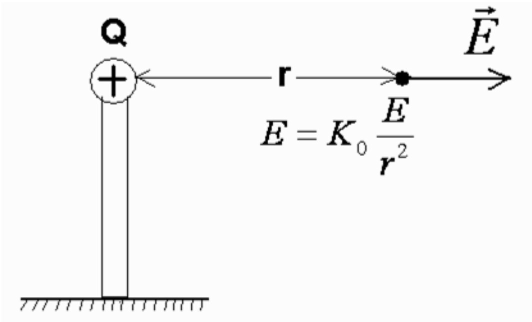
Imagine que uma carga pontual q > 0 seja colocada em um ponto P1 de um determinado campo elétrico e que uma outra de mesma intensidade, porém negativa (q < 0), seja colocada em um outro ponto P2 desse mesmo campo elétrico, conforme mostra a figura anterior. A força elétrica terá o mesmo sentido do campo elétrico quando q > 0 e terá sentido contrário ao campo elétrico quando q < 0. Entretanto, ela possuirá sempre a mesma direção, tanto para q > 0, quanto para q < 0.

Considerando-se apenas o módulo (intensidade) da grandeza vetorial $\vec{F} = \mathbf{q} * \vec{E}$, temos:

F = q*E; E = F/q.

No Sistema Internacional de Unidades (MKS – Metro, Quilo, Segundo), se a força é dada em newton (N) e a caga em coulomb (C), a unidade do campo elétrico (E) é dada em newton/coulomb (N/C).

A expressão E = F/q nos permite calcular a intensidade do campo elétrico, quaisquer que sejam as cargas que o criam. Vamos aplicá-la a um caso particular, no qual a carga que cria o campo é uma carga puntual, conforme mostra a próxima figura.



Cálculo da intensidade de um campo elétrico

Consideremos, então, uma carga puntual Q, no ar, e um ponto situado a uma distância r dessa carga. Se colocarmos uma carga de prova q nesse ponto, ela ficará sujeita a uma força elétrica $\bar{E}$, cujo módulo poderá ser calculado pela lei de Coulomb:

F = Ko Qq/r^2, onde Ko é a constante eletrostática (N*m^2/C^2) no vácuo = 9*10^9 N*m^2/C^2

Como E = F/q, obtemos facilmente:

E = Ko Q/r^2

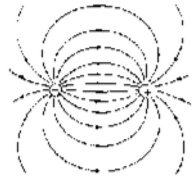
Portanto, essa expressão nos permite calcular a intensidade do campo em um certo ponto, quando conhecemos o valor da carga puntual Q que criou esse campo e a distância do ponto a essa carga. Observe, entretanto, que essa expressão só pode ser usada para esse caso, ou seja, para campo criado por uma carga puntual.

Linhas de Força de um Campo Elétrico

Se em um número conveniente de pontos de um campo elétrico se associar um vetor , obtém-se a representação gráfica desse campo elétrico, conforme mostra a parte inferior da figura a seguir.

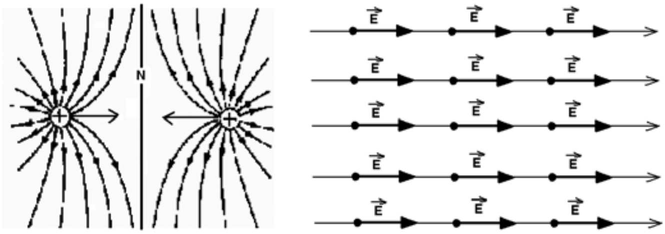
Se unirmos os vetores do campo elétrico através de linhas tangentes a esses vetores, em cada um de seus pontos, obteremos o que é chamado de "linhas de força", conforme mostra a parte superior da figura.

As linhas de força têm o sentido orientado pelos sentidos dos vetores do campo elétrico. Observe que o sentido das linhas de força que chegam a uma carga negativa é orientado para dentro dessa carga, enquanto as linhas referentes a uma carga positiva possuem sentido que se afastando dela.



Linhas de força de um campo elétrico

A parte esquerda da figura a seguir mostra as linhas de força de um campo elétrico entre duas cargas positivas. A parte direita da figura mostra as linhas de força de um campo elétrico uniforme (onde todos os pontos possuem a mesma intensidade, direção e sentido), linhas que são retas e paralelas, espaçadas igualmente e de mesmo sentido.



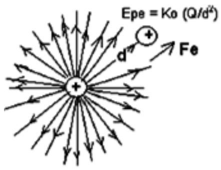
Exemplos de linhas de força de campos elétricos

Energia Potencial Elétrica e Diferença de Potencial (ou Tensão)

Conforme já detalhado anteriormente, quando uma carga está em um campo elétrico, ela fica sujeita a uma força elétrica devido à interação do campo elétrico com essa carga, que conseqüentemente adquire também uma energia denominada "energia potencial elétrica". Para você entender melhor o conceito de energia potencial elétrica, compare-a com a energia que um corpo adquire quando está dentro do campo gravitacional da Terra (quanto maior a altura desse corpo em relação à superfície da Terra, maior sua energia elétrica).

No caso da energia potencial elétrica que uma carga de prova (q) adquire quando colocada em campo elétrico, existem as seguintes relações:

Epe = Ko (Q/d^2), onde Q é uma carga puntiforme geradora do campo elétrico, d é a distância da carga Q à carga q, e Ko no vácuo é $9*10^9$ $N*m^2/C^2$, conforme mostra a figura a seguir, supondo-se que q > 0.



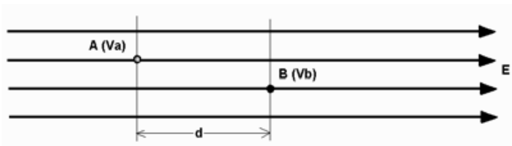
Carga de prova q > 0 inserida em um campo elétrico de uma outra carga Q puntiforme

Epe = q*Vp, onde Vp é o valor do campo elétrico no ponto P onde está a carga q.

A diferença de potencial (ddp) é a diferença entre os valores da energia potencial de uma carga de prova q entre dois pontos de um campo elétrico onde essa carga é colocada.

Em um campo elétrico uniforme, o valor do campo elétrico é constante, e a ddp entre dois pontos desse campo elétrico é obtida através da seguinte fórmula:

$U = V_A - V_B = E*d$, onde V_A é o valor da energia potencial elétrica no ponto A, V_B é o valor da energia potencial elétrica no ponto B, E é o valor do campo elétrico, e d é a distância entre os dois pontos, conforme mostra a figura seguinte.



Diferença de potencial entre dois pontos de um campo elétrico uniforme

Suponha que um gerador hidráulico de energia elétrica consuma uma energia de 500 joules para deslocar 10 coulombs de carga elétrica. Nesse caso, temos uma relação de 50 Joules/Coulomb. A relação Joule/Coulomb foi denominada de Volt, em homenagem a Volta, o descobridor da pilha elétrica.

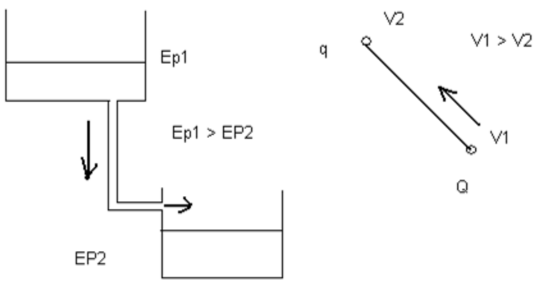
NOTA: 1 Newton (N) = 1 kg*m/s^2

1 Joule (J) = 1 N*m

A diferença de potencial entre dois pontos de um campo elétrico uniforme possui um valor de 1 volt (V), quando essa ddp provaca o trabalho de 1Joule contra as forças elétricas de uma carga de 1Coulomb, ocasionando o deslocamento dessa carga entre esses dois pontos do campo elétrico em questão (1J/C).

Para entender melhor o conceito de ddp, imagine uma tubulação de água que liga dois depósitos d'água, sendo que um deles está em uma altura superior em relação ao outro, ou seja, um dos depósitos possui uma maior energia potencial do que o outro. Nesse caso haverá um deslocamento de água dentro da tubulação, do depósito mais alto (maior energia potencial) para o depósito mais baixo (menor energia potencial), com a finalidade de procurar o equilíbrio energético.

De modo análogo, se uma carga está em um ponto do campo elétrico com determinada energia potencial elétrica (V1), e existe um condutor elétrico que liga esse ponto a um outro ponto desse mesmo campo elétrico, com uma energia potencial menor (V2), ou seja, V1 > V2, essa carga irá se deslocar do ponto de maior energia potencial para o ponto de menor energia, conforme ilustra a figura a seguir.



Analogia entre deslocamento de água e corrente elétrica

Resistência e Corrente Elétricas e Lei de Ohm

Resistência elétrica é a característica de um meio físico que reage à passagem de uma corrente elétrica nesse ambiente. Os corpos bons condutores têm pequena resistência elétrica, enquanto que os corpos maus condutores possuem uma elevada resistência elétrica, em conseqüência dos fatores já detalhados anteriormente.

Corrente elétrica é o deslocamento de cargas dentro de um meio físico condutor quando existe uma ddp entre as extremidades desse condutor elétrico. Esse deslocamento ocorre para tentar restabelecer o equilíbrio de energia elétrica.

Muitos autores preferem apresentar seus trabalhos considerando o sentido convencional de corrente elétrica (do potencial elétrico positivo para o potencial elétrico negativo). Como, na realidade, o que ocorre é o contrário, ou seja, os elétrons se movimentam de um ponto com energia potencial elétrica negativa mais alta para um ponto com menor energia potencial elétrica negativa, conforme detalhamos anteriormente, preferimos adotar o sentido real da corrente (do potencial elétrico negativo para o positivo).

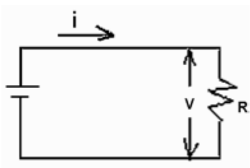
Podemos definir a corrente elétrica como o fluxo de cargas que é transportado através de um condutor elétrico na unidade de tempo.

Quando esse fluxo de cargas elétricas é constante, podemos definir a unidade internacional de corrente elétrica (ampère) através da seguinte relação:

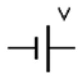
I = Corrente elétrica = 1coulomb/1segundo = 1 ampère (A), ou seja, 1 A = 1 C/s.

A lei de Ohm (em homenagem ao cientista alemão Georg Simon Ohm) estabelece o relacionamento entre a ddp em volts e a corrente elétrica de acordo com a seguinte fórmula:

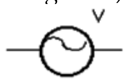
U (ddp) = R x I, onde R é a resistência do meio físico onde passa uma corrente elétrica (em ohms – W) e I é a intensidade da corrente elétrica em ampères (A).



Circuito hipotético

NOTA: Representação de uma fonte de tensão contínua: 

(O lado maior representa o borne positivo, e o lado menor, o borne negativo.)

Representação de um gerador de tensão alternada: 

Resistividade e Condutância

Resistividade é a resistência específica de cada material, ou seja, trata-se da resistência oferecida por um material com 1 metro de comprimento, 1 mm^2 de secção transversal e a 20° C de temperatura.

Cada material possui uma resistência característica, a qual pode ser calculada da seguinte maneira:

R = r*(L/S), onde r é a resistividade do material em ohms.mm^2/metro, L é o comprimento em metros e A é a área da seção transversal do condutor em mm^2.

A próxima tabela mostra a resistividade de alguns materiais.

Material	Resistividade
Prata	0,016 Ω
Cobre	0,017 Ω
Alumínio	0,030 Ω
Tungstênio	0,050 Ω
Constantan	0,500 Ω
Níquel - Cromo	1,000 Ω

A temperatura influencia na resistência do condutor, conforme a seguinte expressão matemática:

$R_t = R_{20}*[1 + \alpha_{20} (t_2 - t_1)]$

R_t = Resistência à temperatura t em Ω

R_{20} = Resistência a 20° C

α_{20} = Coeficiente de temperatura em C^{-1} a 20° C

t_2 = Temperatura final em ° C

t_1 = Temperatura inicial em ° C

Valor e Tolerância dos Resistores

Tendo em vista que as dimensões dos resistores utilizados na eletrônica, na sua grande maioria, são pequenas demais para se escrever o valor no corpo do próprio resistor, os fabricantes utilizam um código de cores, que informa esse valor.

Os resistores menores ainda, que são soldados diretamente na superfície da placa, nem sempre têm o valor impresso no seu corpo, o que torna necessário recorrer ao manual técnico do equipamento para saber o valor correto.

Os resistores, a exemplo de qualquer outro componente eletrônico, apresentam pequenas variações nos valores, mesmo que a aparência seja idêntica e que os valores nominais sejam iguais. Esse fato ocasionou a indicação da tolerância, ou seja, quanto o valor do resistor pode variar acima e abaixo do valor nominal apresentado pelo fabricante. Os resistores mais comuns são fabricados dentro da com tolerância de 5 ou 10% e possuem quatro faixas coloridas. Os resistores mais precisos, com tolerância de 2, 1% ou menos, são marcados com cinco faixas coloridas para permitir um dígito a mais de precisão.

Código de Cores de Resistores de Quatro Faixas

Observe a cor da faixa que está mais próxima do extremo. Essa é a primeira cor a ser considerada na leitura e representa o primeiro dígito do valor da resistência do resistor. A segunda faixa apresenta uma cor a qual representa o segundo dígito. A terceira cor representa o fator multiplicativo. Observe o seguinte exemplo:

Marrom = 1

Preto = 0

Vermelho = 2

O valor desse resistor será 1000 Ω, pois o fator multiplicativo é 100.

Código de Cores de Resistores de Cinco ou Seis Faixas

Tendo em vista que um resistor de precisão apresenta cinco faixas coloridas, sendo que a última faixa normalmente é marrom ou vermelha, pode haver uma confusão a respeito de onde é o lado certo para iniciar a leitura, já que a primeira faixa que representa o valor do resistor também pode ser marrom ou vermelha. Verifique, então, a faixa que está mais afastada das outras. Essa é a última faixa de cor.

Os três primeiros dígitos são os algarismos significativos, o que confere maior precisão à leitura. O quarto dígito é o elemento multiplicador. O quinto dígito é a tolerância e o sexto, quando existir, é a referência do coeficiente de temperatura, ou seja, como a resistência varia de acordo com a temperatura ambiente. Este último valor é dado em PPM (partes por milhão).

Abaixo mostramos a tabela de cores dos resistores.

Cores	1º anel (1º digito)	2º anel (2º digito)	3º anel (Multiplicador)	4º anel (Tolerância)
Prata	**-**	**-**	**0,01**	**10%**
Ouro	-	-	0,1	5%
Preto	**0**	**0**	**1**	**-**
Marrom	01	01	10	1%
Vermelho	**02**	**02**	**100**	**2%**
Laranja	03	03	1000	4%
Amarelo	**04**	**04**	**10 000**	**4%**
Verde	05	05	100 000	-
Azul	**06**	**06**	**1 000 000**	**-**
Violeta	07	07	10 000 000	-
Cinza	**08**	**08**	**-**	**-**
Branco	09	09	-	-

Código de cores dos resistores

Resistores SMD ("Surface Mounting Technology" – Montagem em Superfície)

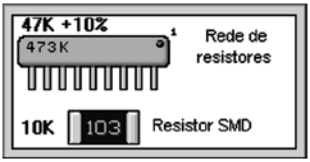
Quanto menor for o equipamento, obviamente menores serão seus componentes internos. Os resistores SMD são soldados na superfície da placa e, por serem muito pequenos, possuem números impressos no corpo.

As redes de resistores (vários resistores dentro de um mesmo encapsulamento) também obedecem a essa metodologia.

Veja na figura a seguir que o resistor SMD apresenta o código 103, que significa 10 mais três zeros ao lado, ou seja 10 kΩ.

NOTA: Essa regra também se aplica a capacitores. Por exemplo, 302 significa 30 mais dois zeros ao lado, ou seja, 3.000 μF = 3 nF = 3.000 pF.

Para saber se os valores de resistores de valores elevados devem ser usados, faça um multiteste com a escala apropriada, de até 10 Mohms até 20 Mohms e assim por diante.



Rede de resistores e resistor SMD

O "Choque Elétrico"

Quando alguém descalço, por exemplo, pega em um condutor elétrico com uma certa voltagem (V) em relação ao terra, haverá uma corrente elétrica atravessando o corpo dessa pessoa, a fim de que os elétrons (cargas) passem do potencial V para o potencial zero (A Terra não tem energia potencial elétrica, ou seja, Vt = 0).

O pior caso é quando a corrente elétrica atravessa o corpo entre os braços, pois nesse caso passa pelo tórax e afeta o coração e o pulmão.

Quando a corrente elétrica que atravessa o corpo é de 1 mA (1 miliampère = 10^{-3} ampères), a pessoa sente apenas uma sensação de cócegas ou um leve "formigamento".

Quando essa corrente elétrica é de 10 mA, a pessoa perde o controle dos músculos, o que já torna difícil conseguir abrir a mão e livrar-se do contacto. A corrente elétrica de 10 mA a 3 A é mortal quando ela atravessa o coração, pois modifica o seu ritmo e, como conseqüência, ele pára de bater. Se a intensidade da corrente elétrica que atravessa o corpo for superior a 3 A, ela pode parar completamente o coração.

Quando cessa a corrente elétrica, o coração pode voltar a bater novamente, porém o tempo que o corpo ficou sem circulação sangüínea pode causar danos cerebrais irreversíveis.

Pilhas e Baterias

As pilhas e as baterias são dispositivos empregados para transformar energia química em energia elétrica a partir de reações que ocorrem entre seus componentes internos.

A pilha foi inventada pelo italiano Alexandre Volta, durante uma série de experimentos com vários tipos de placas metálicas e soluções ácidas. Uma das experiências consistia em aproximar uma placa de zinco de uma outra, no caso, de cobre, separadas por uma tela impregnada de ácido sulfúrico.

Volta observou que, nessas condições, circulava uma corrente elétrica muito fraca entre os elementos da composição. Para intensificar a corrente, ele dispôs os elementos em camadas, cuja parte superior era constituída por uma chapinha de cobre (o pólo ou eletrodo positivo) e a parte inferior, por uma de zinco (o pólo ou eletrodo negativo). O conjunto tornou a corrente mais forte e passou a ser chamado de pilha de Volta.

Para se construir uma pilha semelhante à de Volta, pegue uma pequena vasilha de vidro, duas barras ou varetas (uma de cobre e outra de zinco) e um pouco de ácido sulfúrico diluído em água (para obter o eletrólito). Ao se colocar o eletrólito na vasilha de vidro e mergulhar nela as duas varetas de metal separadas, haverá uma diferença de potencial entre o pólo positivo (ponta da vareta de cobre) e o pólo negativo (ponta da vareta de zinco).

Todos os geradores eletroquímicos desenvolvidos com base na pilha de Volta são constituídos essencialmente de dois eletrodos e um eletrólito, mesmo que sejam diferentes entre si por muitas outras características. Dependendo do trabalho que desenvolvem e de suas propriedades específicas, os geradores eletroquímicos podem ser classificados em dois grupos:

- Geradores eletrolíticos primários, que não podem ser recarregados;
- Geradores eletrolíticos secundários, que podem ser recarregados.

Os geradores eletrolíticos primários são aqueles que produzem um único processo de descarga, pois suas reações químicas internas são irreversíveis. Dessa maneira, no final de um determinado período de uso, o gerador se esgota, pois seus componentes internos se degradam completamente.

Os geradores primários simples são chamados de pilhas. Por outro lado, ao conjunto de duas ou mais pilhas (ou células) e aos geradores do segundo grupo dá-se o nome de bateria. As baterias incluem todos os modelos de equipamentos que permitem cargas e descargas repetidas.

Essas cargas e descargas são possíveis porque as transformações químicas que se verificam no interior dos geradores podem ser revertidas quando se aplicam determinadas tensões e correntes elétricas sobre seus terminais.

No grupo de geradores primários, destacam-se os seguintes tipos de pilhas:

- Pilha de zinco-carbono;
- Pilha alcalina;
- Pilha de mercúrio;
- Pilha de prata;
- Pilha de lítio.

No grupo de geradores secundários, existem dois tipos que possuem muitas aplicações:

- Bateria de chumbo;
- Bateria de níquel-cádmio.

Capacidade e Durabilidade das Pilhas e Baterias

Capacidade = corrente de descarga X duração da descarga

O valor da capacidade é expresso em ampère-hora (Ah) e miliampère-hora (mAh). A carga acumulada por uma pilha ou uma bateria pode ser expressa na forma de densidade de energia, definida em watt-hora por quilo de peso ou em watt-hora por centímetro cúbico (cm^3) de volume.

A pilha ou a bateria utilizada para alimentar um determinado circuito deve ser escolhida levando-se em consideração que quanto mais alto for o nível mínimo de tensão que o circuito exige (nível-limite), mais curta será a vida útil da pilha ou da bateria usada para alimentá-lo.

Como as baterias tendem a recarregar-se quando estão desligadas, ocorre o que se denomina de "recuperação da tensão", que ocorre nos aparelhos de funcionamento intermitente. Nesses casos, as pilhas de zinco-carbono apresentam uma apreciável recuperação de tensão, a ponto de dobrar seu período de vida útil em relação a uma carga constante. Nas mesmas condições, as pilhas alcalinas aumentam seu período de duração em 20%. Outro fator importante na determinação da duração das pilhas é o tipo de eletrólito (seco ou líquido) que elas utilizam, pois o tipo líquido pode sofrer evaporação ou vazamento durante a estocagem, o que diminui a duração ou danifica a pilha permanentemente.

A temperatura também influi na duração das pilhas, pois as reações químicas internas diminuem a baixas temperaturas.

Tipos de Pilhas

As pilhas mais usadas atualmente são as de zinco-carbono, as quais possuem a forma de um cilindro, cujo volume determina a quantidade de energia que elas podem fornecer. Seu pólo negativo é formado pelo invólucro externo. O cilindro central de carbono, coberto por um capuz metálico e isolado do invólucro, constitui o pólo positivo. Essas pilhas fornecem uma tensão de 1,5 V.

As pilhas alcalinas são formadas por um anodo de zinco com superfície ampla e por um catodo de óxido de manganês de densidade elevada. Elas se diferenciam das de zinco-carbono, principalmente, pela composição do eletrólito, que é de hidróxido de potássio, e por apresentarem quase o dobro da capacidade de energia, com uma duração sete vezes maior e uma impedância interna muito mais baixa. Por isso são altamente eficientes nas aplicações que requerem longos períodos de alimentação com correntes elevadas.

A tensão nominal das pilhas alcalinas é de 1,5 V, e sua voltagem permanece constante durante um período mais longo, o que garante uma operação mais estável do equipamento que alimenta. São particularmente usadas para alimentação de jogos eletrônicos, filmadoras, gravadores e toca-fitas, além de equipamentos de iluminação de emergência. Em relação às pilhas zinco-carbono, seu custo é mais elevado.

Existem outros tipos de pilhas, os quais não serão comentados neste livro.

Baterias (Acumuladores) de Chumbo

São constituídas por uma série de células individuais interligadas, cujo número depende da tensão que se deseja obter. A célula elementar é formada por dois eletrodos à base de chumbo, imersos num eletrólito constituído por uma solução de ácido sulfúrico em água. O eletrodo positivo contém óxido de chumbo PbO_2, enquanto o negativo contém chumbo em forma esponjosa. Quando uma carga flui entre o catodo e anodo, desencadeiam-se reações químicas no interior da bateria, onde tanto o óxido de chumbo como o chumbo em estado puro são atacados pelo ácido sulfúrico, o que resulta em sulfato de chumbo e água.

Quando a quantidade de ácido é baixa e a de sulfato é alta o suficiente para cobrir completamente os eletrodos, as reações internas diminuem, e a tensão na bateria decresce, chegando a níveis tão baixos que se torna impossível continuar alimentando a carga externa. Nesse caso, dizemos que a bateria está descarregada.

O processo inverso é chamado de carga. Quando a bateria recebe tensão de um gerador externo que provoca a passagem de corrente no seu interior, mas no sentido contrário ao da descarga, o sulfato de chumbo se combina com a água, liberando sobre os eletrodos o chumbo e o óxido de chumbo originais e devolvendo à solução de eletrólito o ácido sulfúrico anteriormente consumido. Se, porém, a operação de carga se estender além do tempo necessário à eliminação dos sulfatos dos eletrodos, a corrente interna fará decompor a água em oxigênio e hidrogênio.

Na bateria, a capacidade de fornecimento de energia é determinada principalmente pela quantidade de óxido de chumbo contida no anodo, que pode ser facilmente combinado com ácido sulfúrico para produzir chumbo. O catodo contém aproximadamente a mesma quantidade de chumbo existente no anodo, mas sua eficiência durante as reações de carga e descarga é superior. A tensão de cada célula elementar tem um valor nominal de 2 V.

As baterias de chumbo são as mais econômicas entre os diversos tipos de baterias. Elas podem realizar cerca de 200 ciclos de carga/descarga completos e atingir até 500/600 ciclos com descarga de 60%. Quando descarregadas, tendem a acumular sulfato, o que reduz seu período de vida, mas em condições convenientes de estocagem chegam a durar de seis meses a oito anos.

É no campo automobilístico que são mais empregadas, nos modelos de seis células ligados em série, com uma tensão nominal de 12 V.

Baterias de Níquel-Cádmio

Essas baterias também apresentam o mesmo processo de carga e descarga que observamos nas de chumbo, mas com diferenças significativas quanto ao funcionamento.

Uma bateria elementar de níquel-cádmio é formada por dois eletrodos separados por um isolante, enrolados um sobre o outro e imersos num eletrólito. O eletrodo positivo ou anodo é constituído de níquel e tem sobre a superfície externa um composto mais ativo, à base de hidróxido de níquel. O eletrólito é constituído por uma solução de hidróxido de potássio.

Quando entre os dois eletrodos se interpõe uma resistência de descarga, uma diferença de potencial é produzida e surge uma corrente, que dá início ao processo de descarga da bateria.

No decorrer do processo de carga, a bateria é submetida a uma tensão externa inversa, e os hidróxidos dos eletrodos se decompõem, liberando cádmio, níquel e água. Depois de um determinado tempo, a bateria fica exatamente como nas condições iniciais.

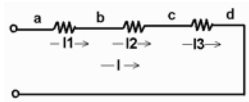
As baterias de níquel-cádmio custam quase o triplo das de chumbo, mas oferecem vantagens. Podem ser conservadas em estoque tanto carregadas quanto recarregadas, sem que sua durabilidade seja afetada. Alguns modelos podem realizar 30 mil ciclos de cargas e descargas.

Em geral, essas baterias são indicadas quando há necessidade de um modelo leve e portátil, de longa duração e que dispense manutenções periódicas.

Circuitos com Ligação em Série, em Paralelo e Mista

Circuito com Ligação em Série

No circuito em série, as resistências ao longo dele são percorridas por uma mesma corrente, conforme mostra a figura a seguir.



Circuito com ligação em série

Observe na figura que a ddp total externa (Vab) é igual à soma das ddps em cada resistência, ou seja:

Vad = Vab + Vbc + Vcd e I = I1 = I2 = I3 (Ve = Vd)

A resultante equivalente de resistências ligadas em série é a soma de todas as resistências, que nesse caso específico é:

i*Re = i*R1 + i*R2 + i*R3

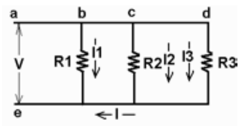
Re = R1 + R2 + R3

Note que no caso de impedâncias é necessário se operar com vetores, o que modifica o resultado acima apresentado.

Observe ainda que as resistências em série dividem o circuito em um número de ddp igual ao número de resistências. Veja na figura anterior que a ddp V foi divida em três ddps (Vab, Vbc e Vcd), cuja soma é igual a V. Esse tipo de circuito é denominado de "divisor de tensão" devido à propriedade acima apresentada.

NOTA: O conceito de ligação de resistências e impedâncias em série se aplica também ao cálculo da fonte equivalente quando as fontes estão ligadas em série.

Circuito com Ligação em Paralelo



A figura acima mostra um circuito com suas resistências ligadas em paralelo. Note que, nesse caso, Vae = Vbe = Vce = Vde.

I = I1 + I2 + I3

A resultante equivalente de resistências em paralelo é a soma dos inversos de todas as resistências, que nesse caso específico é:

Vae = Vbe = Vce = Vde

Vae/Re = Vbe/R1 + Vce/R2 + Vde/R3 = Vae/R1 + Vae/R2 + Vae/R3

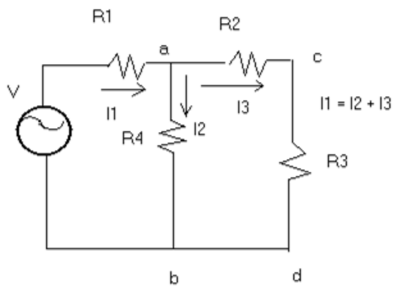
1/Re = 1/R1 + 1/R2 + 1/R3

NOTA: O conceito de ligação de resistências e impedâncias em paralelo também é valido para a ligação mista de fontes. Observe ainda que, em se tratando de impedâncias, você precisa trabalhar com vetores.

As resistências em paralelo dividem o circuito em um número de corrente igual ao número de resistências. Veja na figura anterior que a corrente I do circuito foi divida em três correntes (Ibe, Ice e Vde), cuja soma é igual a I. Esse tipo de circuito é denominado de "divisor de corrente" devido à propriedade acima apresentada.

Circuitos com Ligação Mista

O circuito misto é uma combinação das ligações em série e em paralelo, conforme mostra a figura seguinte.



Circuito com ligação mista

Para resolver um circuito desse tipo, você deverá resolvê-lo por partes, primeiramente os circuitos em série e separadamente os em paralelo. No final deste capítulo analisaremos um circuito misto.

Nas instalações elétricas prediais, esse circuito misto é o mais encontrado, pois representa a disposição dos pontos de energia, onde se deve considerar a resistência interna de cada um desses pontos e também a resistência dos condutores.

NOTA: O conceito de ligação mista de resistências também é valido para a ligação mista de fontes. Na figura anterior, acdb é uma malha.

Leis de Kirchhoff

Gustav Kirchhoff estabeleceu duas leis que auxiliam na resolução de circuitos complexos, que muitas vezes não pode ser conseguida através da resistência equivalente.

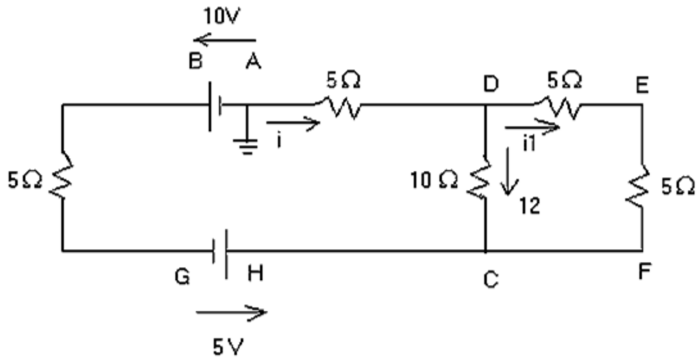
1ª Lei: A soma das correntes que chegam a um nó do circuito é igual à soma das correntes que se afastam.

2ª Lei: A soma dos produtos das correntes pelas resistências em cada malha do circuito é igual à soma algébrica das forças eletromotrizes dessas malha.

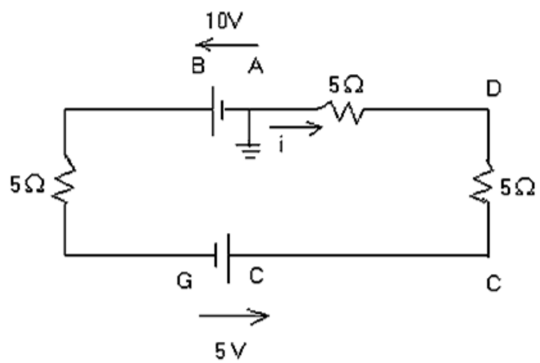
NOTAS: Malha é um circuito fechado percorrido em um sentido, por exemplo, o sentido horário. No circuito anterior, "a,c,d,b" é uma malha.

Exemplo Numérico para Fixação do Aprendizado

Calcule a corrente i, i1 e i2, bem como os potenciais elétricos nos pontos A, B, C, D, E, F, G e H do circuito a seguir.



Podemos simplificar o circuito acima ao substituirmos as resistências em série entre DE e EF, as quais estão em paralelo com a resistência entre DC, conforme ilustra a próxima figura.



Observe que entre os pontos H, C e F não existem resistências, de forma que esses três pontos possuem o mesmo potencial elétrico, que é o potencial elétrico do terminal positivo da bateria GC.

Note ainda que o potencial elétrico do ponto A é zero, pois ele está aterrado. Portanto, estando A aterrado, o potencial elétrico do ponto B é de +10 V, devido à bateria AB.

Por esse circuito simplificado, temos:

5i + 5i - 5 + 5i - 10 = 0

15i = 15

i = 1 A

Lembre-se de que uma corrente elétrica que flui sobre uma resistência provoca uma ddp entre os terminais da resistência, sendo que o sentido dessa ddp (do potencial mais baixo para o potencial mais alto) é o mesmo sentido da corrente elétrica.

O potencial elétrico do ponto D (VD) é:

VD = 1*5 = 5 V

A ddp entre os pontos D e C é:

VDC = 5*1 = 5 V

A diferença de potencial entre os pontos A e C é:

VAC = 5V + 5V = 10 V

Como o potencial elétrico do ponto A é nulo, então o potencial elétrico do ponto C é 10 V.

VCG = 10 V - 5 V = 5 V, pois a ddp produzida pela bateria (VGC) possui sentido contrário à ddp entre AC (VAC). Como VC é 10 V e a ddp entre VCG é 5 V, então VG é igual a 5 V.

VBG = 10 V - 5 V = 5 V (VB = 10 V e VG = 5 V)

Observe que, se calcularmos VB aplicando a lei de Ohm, teremos:

VBG = 5 + 1*5 = 10 V, que comprova os cálculos anteriores.

i1 = i2 = VDC/10 = 5/10 = 0,5 A

VDE = 0,5*5 = 2,5 V

VE = VAD + VDE = 5 + 2,5 = 7,5 V

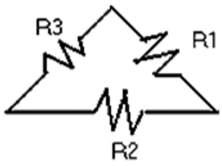
VEF = 0,5*5 = 2,5 V

VAF = VAD + VDE + VEF = 5 + 2,5 + 2,5 = 10 V

VF = 10 V, o que comprova que realmente esse ponto possui o mesmo potencial do ponto C, conforme já havíamos deduzido anteriormente.

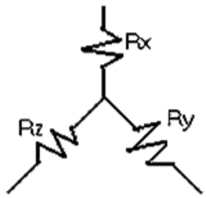
Circuitos "Delta" e "Estrela"

As resistências podem estar dispostas conforme mostra a próxima figura. Este tipo de circuito é denominado de "circuito delta" (ou circuito π, ou ainda circuito triângulo).



Circuito delta

Existe um outro tipo de disposição de resistências, conforme mostra a próxima figura. Este tipo de circuito é denominado "circuito estrela".



Circuito estrela

Em se tratando de circuitos complexos, é possível a conversão de circuitos delta em circuito estrela, conforme apresentado a seguir.

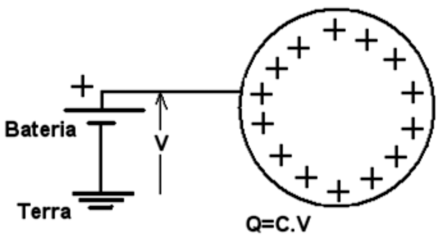
Conversão de circuito delta em circuito estrela

Teremos então Rx = R3*R1/(R1 + R2 + R3), Ry = R1*R2/(R1 + R2 + R3) e Rz = R2*R3/(R1 + R2 + R3).

Essa conversão poderá ajudá-lo a simplificar um circuito complexo.

Capacitores

O capacitor tem como função armazenar cargas elétricas. Observe a figura a seguir.

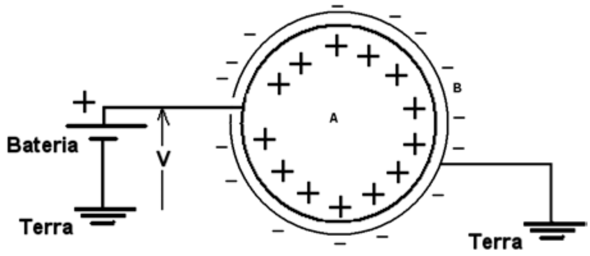


Indução de cargas

Quando se conecta o terminal positivo da bateria na bateria de esfera metálica, os elétrons livres irão fluir para esta e atingir o equilíbrio elétrico, que acontece quando o potencial de energia elétrica no condutor é igual ao potencial elétrico do terminal positivo da bateria (+V).

Se denominarmos de C a capacidade eletrostática da esfera metálica interna (quanto maior a capacidade eletrostática, maior será a capacidade desse corpo de adquirir cargas), podemos definir um relacionamento entre Q (carga total recebida pela esfera interna) e a voltagem da bateria (V), conforme mostra a fórmula a seguir apresentada:

Q = C*V



Esquemático de um capacitor

Note que a esfera metálica interna está envolvida por uma outra esfera metálica ligada ao terra. Nesse caso, a carga acumulada será maior do que C*V, pois, à medida que a esfera interna se mantém carregando positivamente, essas cargas positivas vão induzindo cargas negativas na esfera externa, de tal forma que a esfera interna só consegue atingir o potencial V de equilíbrio quando recebe uma carga Q1 > Q.

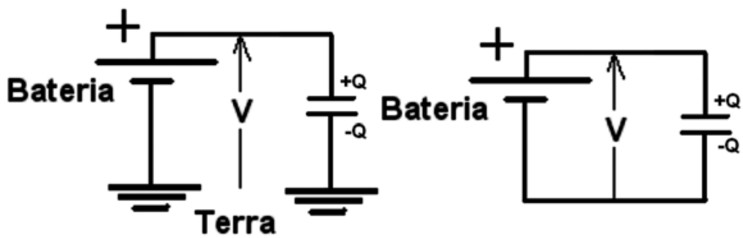
As esferas interna e externa recebem o nome de armaduras do capacitor.

Para aumentar ainda mais a eficiência desse sistema de armazenamento de cargas (capacitor), é inserido um material isolante (dielétrico) entre as duas armaduras do capacitor, por exemplo, papel, mica, óleo, etc.

O que realmente acontece é que sairão elétrons da esfera interna para a bateria, até o ponto de equilíbrio V. Nesse ponto de equilíbrio, o potencial elétrico da esfera interna é V, enquanto o potencial elétrico da esfera externa possui o mesmo potencial do terra (teoricamente zero).

Na prática, os capacitores geralmente são planos e representados de acordo com o mostrado na próxima figura.

Observe ainda que tanto faz você ligar a armadura B (negativa) ao terra, estando o borne negativo ligado ao terra, como ligá-lo ao borne negativo da bateria. Em ambos os casos, a ddp entre as armaduras do capacitor será V.



Ligação de um capacitor a uma bateria

A capacidade eletrostática de um capacitor é definida como:

C= Q/V, onde V é a ddp entre as armaduras do capacitor

No sistema SI (Sistema Internacional de Unidades), a capacidade de um capacitor é medida em farad (F).

A vantagem da utilização de capacitores planos é devida ao fato de o campo elétrico estabelecido entre as armaduras ser uniforme.

A capacidade eletrostática de um capacitor plano cujo dielétrico é o vácuo pode ser calculada conforme a seguir:

C = εo*A/d, onde eo é a permissividade elétrica absoluta do vácuo = $8{,}8*10^{-12}$ (F/m no sistema SI), A é a área das armaduras e d é a distância entre as armaduras

Tendo em vista que o campo elétrico entre as armaduras do capacitor plano é uniforme, podemos dizer que:

V = E*d, onde E é o valor do campo elétrico e d é a distância entre as armaduras

Daí temos que:

εo*A/d = Q/V = Q/(E*d)

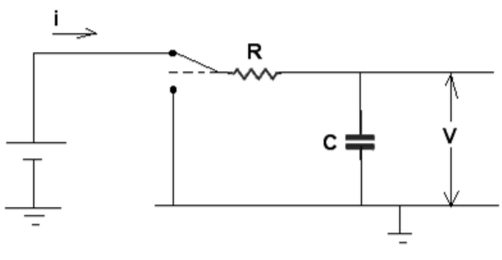
Então E = Q/(εo*A).

Se denominarmos s como a densidade elétrica superficial das armaduras do capacitor, então E = σ/εo.

Quando se insere um material dielétrico entre as armaduras do capacitor a sua capacidade eletrostática é:

C = k*εo*A/d, onde o coeficiente k é denominado constante dielétrica do material dielétrico.

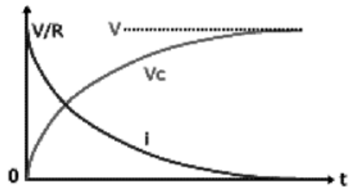
Existe um período de tempo necessário para um capacitor se carregar, ou descargar. Imagine, conforme mostra a próxima figura, que o capacitor está inicialmente descarregado e a chave aberta.



Período de tempo para carga e descarga de um capacitor

Quando se aciona a chave para a posição superior (t = 0), o circuito é fechado e demonstra-se que a corrente no circuito é obtida através de $i = (V/R).e^{-t/RC}$, e a tensão no capacitor por $V_c = V.(1 - e^{-t/RC})$.

A próxima figura mostra o gráfico de i no circuito e V nos terminais do capacitor em função do tempo.



i e V em função do tempo

Observe que enquanto a tensão nos terminais do capacitor cresce exponencialmente até o capacitor ficar completamente carregado, quando então a tensão alcança seu valor máximo V. se estabilizar em V, a corrente no circuito decresce exponencialmente de i = V/R até zero.

Por outro lado, quando se abre o circuito (chave na posição inferior) o capacitor se descarrega (chave na posição inferior) e a tensão no capacitor decresce exponencialmente de V até zero, enquanto a corrente no circuito, deceresce de i = V/R até zero.

Tendo em vista que R é dado em Ohm e C em Farads, o produto RC das equações de carga e descarga do capacitor possui dimensão de segundo. Esse produto é denominado de constante de tempo do circuito, o qual determina o desempenho do capacitor referente a sua carga e descarga.

Apesar de que de acordo com as equações acima detalhadas o tempo para carga (ou descarga) do capacitor é infinito, na prática se adota o valor de cinco constantes de tempo para determinar o tempo de carga (ou descarga) do capacitor. Na realdidade nesse momento o capacitor está com 99,2% de sua capacidade máxima de armazenamento de carga.

NOTA: A força elétrica entre duas cargas elétricas (Q1 e Q2) no vácuo distanciadas de d é $Fe = Ko*Q1*Q2/d^2$. Ko é a "Constante de proporcionalidade", na qual o vácuo é de $9*10^9$ (no sistema SI). Existe a seguinte relação entre Ko e εo:

$Ko = 1/(4*\pi*\varepsilon o)$

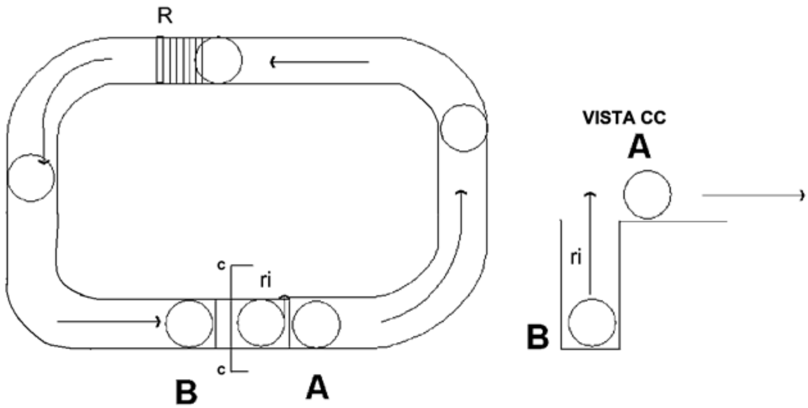
A energia armazenada no capacitor é obtida por:

$W = C.V^2/2$ (Joule)

Os capacitores ligados em série e em paralelo possuem capacitâncias equivalentes calculadas de modo inverso ao cálculo das resistências em série e em paralelo. A capacitância equivalente de n capacitores em série vale: $1/C_e = 1/C_1 + 1/C_2 + 1/C_3 ... + 1/C_n$. A capacitância equivalente de n capacitores em paralelo vale: $C_e = C_1 + C_2 + C_3 ... + C_n$.

Geradores e Receptores de Energia Elétrica, Força Eletromotriz (f.e.m) e Força Contra-Eletromotriz

Vamos fazer a analogia entre um circuito elétrico, e a figura abaixo, a qual representa o movimento de bolas em um plano inclinado. Observe, que para a colocação das bolas na parte mais alta da rampa, é necessário se aplicar trabalho nas mesmas, a fim de transporta-las da parte mais baixa da rampa, para a parte mais alta da mesma.



Analogia em relação a um gerador

Este trabalho corresponde à energia que um gerador dor de energia elétrica opera de modo similar ao acima apresentado, pois ele fornece energia às cargas elétricas, estabelecendo uma diferença de potencial entre seus terminais. Ou seja, o gerador realiza, sobre cada carga elétrica Q um trabalho T, elevando o seu potencial elétrico.

Observe, que as bolaspassar pela região R os obstEste fato é análogo ao que ocorre com as cargas quando passam através de uma resistência. Note, também, que a energia fornecida às bolas para elevação das mesmas precisa ser suficiente para vencer as perdas ocorridas durante esta referida elevação. Raciocínio idêntico pode ser aplicado para as cargas que atravessam o gerador de energia, onde existe uma perda de energia, devido à resistência interna do gerador.

A relação entre o trabalho realizado sobre a carga (Q) e o valor dessa carga é denominada de força eletromotriz (f.e.m.) do gerador, cujo símbolo é "ε", ou seja:

$\varepsilon = T/Q = \Delta E/Q$, onde ΔE é a energia aplicada em joules

Em outras palavras, podemos definir força eletromotriz como a energia não elétrica (com exceção da energia térmica) transformada em energia elétrica, ou vice-versa, por unidade de carga.

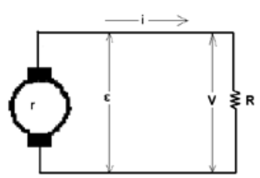
Para você entender melhor o acima exposto, imagine um gerador elétrico movido a energia hidráulica, de forma que cada 500 joules de energia hidráulica originem o deslocamento de 5 coulombs de carga elétrica. Nesse caso, a f.e.m. será:

f.e.m (do gerador) = 500/5 = 100 joules/coulombs = 100 V

A força eletromotriz de um gerador é, portanto, a diferença de potencial que ele poderia fornecer se não houvesse perdas dentro do próprio gerador (resistência interna do gerador).

Já vimos que a queda de tensão sobre uma resistência em um condutor é igual a i*R.

A f.e.m. do gerador mostrado na figura a seguir ocasiona uma corrente elétrica que circula tanto pela resistência externa do circuito, no caso R, quanto pela resistência do gerador (interna) de f.e.m, no caso r.



f.e.m em um circuito fechado de corrente elétrica

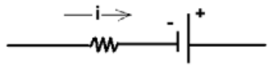
A energia produzida pelo gerador é consumida pelo circuito, portanto:

ε - i*R - i*r = 0

ε = V + i*r, onde V é a ddp aplicada ao circuito externo.

Como na prática r é muito pequeno, é costume desprezá-lo. Daí a f.e.m = U, o que gera confusão, pois nesse caso a f.e.m. do gerador é igual à ddp no circuito.

A representação simbólica de um gerador (sentido convencional de corrente) é feita a seguir.



Símbolo de um gerador elétrico

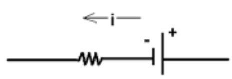
Por outro lado, os dispositivos ou aparelhos que transformam energia elétrica em outras formas de energia são denominados de receptores. Por exemplo, os motores elétricos, que transformam a energia elétrica em energia mecânica, os aparelhos eletrônicos, que transformam a energia elétrica em energia sonora e luminosa, e os acumuladores ou pilhas recarregáveis, que transformam a energia elétrica em energia química, são receptores de energia elétrica.

Nos receptores, a força eletromotriz atua no sentido oposto, ou seja, não é o receptor que realiza o trabalho sobre as cargas elétricas. Pelo contrário, são as cargas elétricas que realizam o trabalho sobre o dispositivo.

Por exemplo, a corrente elétrica é que gera o movimento do eixo de um motor, que aciona os componentes eletrônicos, geradores de luz, som e imagem, e que desencadeia as reações químicas que recarregam os acumuladores ou pilhas recarregáveis.

Note que, assim como nos geradores, a corrente elétrica também flui através dos receptores, e nesse caso fica sujeita à resistência interna de seus componentes.

A próxima figura mostra a representação simbólica de um receptor elétrico.



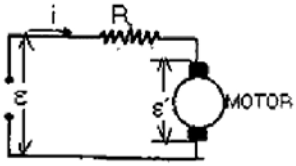
Símbolo de um receptor elétrico

Como no receptor são as cargas que realizam o trabalho, define-se uma grandeza análoga à força eletromotriz, chamada de força contra-eletromotriz (f.c.e.m.), representada por "ε'", sendo que:

ε' = T/Q (V)

Apesar de as definições de força eletromotriz e força contra-eletromotriz serem iguais, pois as grandezas envolvidas são as mesmas, existe a diferença anteriormente detalhada.

Observe a próxima figura.



Força contra-eletromotriz de um motor elétrico

Chamando de r a resistência interna do receptor, a diferença de potencial nos terminais de um receptor é:

$\varepsilon - i*R - \varepsilon' - i*r = 0$

$\varepsilon' = \varepsilon - i*R - i*r$

$\varepsilon' = \varepsilon - V - i*r$

Lembre-se de que a diferença de potencial nos terminais de um receptor corresponde ao trabalho que as cargas realizam sobre ele, mais a perda devida à sua resistência interna.

Finalmente, um dispositivo que transforma a energia elétrica apenas em calor não se trata de um receptor, pois nesse caso não existe a força contra-eletromotriz. Ele é, simplesmente, um resistor.

Potência e Energia Elétrica

Quando se executa um movimento ou se produz calor, luz, radiação, etc., estamos consumindo energia. A quantidade de energia consumida por segundo para a produção do acima referido é denominada de potência.

No caso específico do consumo de energia elétrica por segundo, trata-se de potência elétrica.

Existe a seguinte relação entre potência (P), tensão (V) e corrente (I):

P = f.e.m.*I, que, em termos práticos, significa P = V*I (em watt – W)

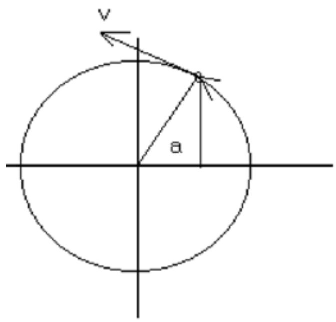
Como V = I*R, então:

$P = I^2*R$

Velocidade Angular, Período, Freqüência e Ondas Senoidais

Velocidade angular é o deslocamento na unidade de tempo de um corpo em movimento circular.

Observe a figura a seguir.



Velocidade angular

A velocidade angular (w) pode ser definida como o ângulo que um corpo em movimento circular atinge no período de tempo de um segundo. Suponha que o corpo com velocidade tangencial v (no caso do movimento circular, a velocidade tangencial é perpendicular ao raio do círculo) consiga realizar 60 voltas em um segundo. Se isso acontecer, lembrando que 360 graus corresponde a 2π radianos, então a velocidade angular desse corpo será de 2π*60 radianos por segundo.

Generalizando, a velocidade angular de um corpo em movimento circular pode ser calculada com esta fórmula:

w = 2π*n, onde n é o número de voltas por segundos

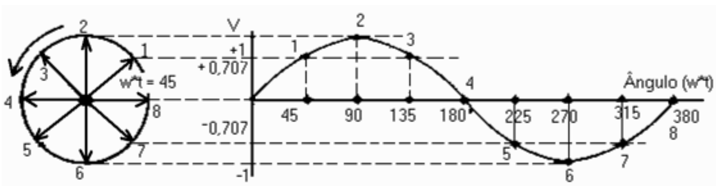
Observe que, após o período de tempo de 1/60 segundos, o corpo iniciará uma nova volta. Decorridos 2/60 segundos, ele iniciará uma terceira, e assim sucessivamente. Concluímos com isso que, após o período de tempo de 1/60 segundo, esse corpo irá repetir a mesma trajetória já executada no período de tempo anterior, também de 1/60. Esse período de tempo mínimo necessário para que um corpo em movimento circular percorra toda a sua órbita é denominado de período (T). Com base no que foi dito acima, n = 1/T.

A freqüência (f) de um corpo em movimento circular pode ser definida como o número de voltas que esse corpo consegue realizar por segundo. No caso do nosso exemplo, sua freqüência é de 60 voltas por segundo, ou seja, 60 hertz (Hz).

Note que, apesar de estarmos estudando o caso de um movimento circular, o conceito de freqüência pode ser aplicado de modo generalizado. Por exemplo, se o movimento repetitivo de sobe e desce de uma mola é de 150 vezes por segundo, então a freqüência desse movimento será de 150 Hz.

Pelo acima exposto, concluímos que f = 1/T, e como w = 2π*n, então w = 2π*/T = 2π*f, e T = 2π/w.

Observe a figura a seguir.



Representação de uma onda senoidal em função da velocidade angular

Suponha que na parte esquerda da figura acima o raio do círculo seja unitário e que esteja se deslocando no sentido anti-horário, com uma determinada velocidade angular (w). A ponta desse raio, representada pela seta, irá se colocar em todas as posições do círculo durante o seu movimento, a partir do ângulo de zero grau. O posicionamento dessa seta pode ser calculado para um determinado período de tempo (t), supondo-se que esse período começa a ser medido a partir de sua posição no ângulo zero pelo ângulo que o raio faz a partir desse ângulo zero, através da seguinte relação:

$\theta = w*t$

É possível representar esse movimento circular através de um gráfico senoidal, conforme mostra a parte direita da figura, que mostra no eixo X os ângulos (w*t) e no eixo Y, o valor do seno de cada um desses ângulos.

NOTA: Poderíamos, também, representar um movimento circular, por exemplo, através da função co-seno.

Observe que o valor máximo da ordenada y é 1 e que, por exemplo, quando $w*t = n*2\pi + \pi/4$ ($\pi/4 = 45°$), sendo n um número inteiro, o valor da ordenada y é 0,707, que é o valor do seno de 45°.

Aplicando-se o acima exposto, a representação de qualquer fórmula com ciclos repetitivos, com determinada freqüência, pode ser representada segundo esta fórmula:

$Y = Ym*sen(w*t)$, onde Y é o valor instantâneo da ordenada Y, e Ym é o valor máximo da ordenada Y (nesse caso, maior, menor ou igual a 1).

Magnetismo

Campo magnético

Alguns materiais conseguem atrair pedaços de ferro, propriedade denominada de "magnetismo".

A magnetita, cuja fórmula química é Fe_3O_4, é um desses materiais magnéticos encontrados livres na natureza, também denominados de "ímãs naturais".

Quando se aproxima um pedaço de ferro, principalmente, tanto a uma das extremidades (pólos) de um ímã em forma de barra quanto a outra, o pedaço de ferro é atraído e adere ao ímã.

Apesar de o pedaço de ferro ser atraído por ambas as extremidades do ímã, essas extremidades possuem propriedades magnéticas opostas, e por isso uma delas é denominada "pólo norte", e a outra, "pólo sul".

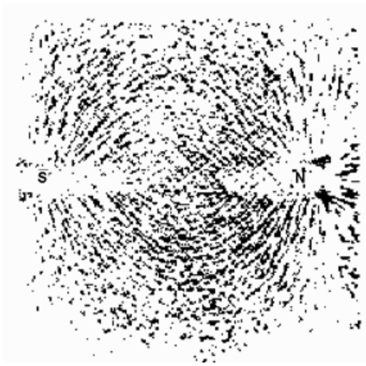
Experimente aproximar duas barras de ímãs, ambas penduradas em um pedaço de fio. Você poderá observar que as barras imantadas irão girar até que os pólos norte e sul das duas barras se atraiam. Esta é regra fundamental da teoria do magnetismo: "Pólos de nomes contrários se atraem, enquanto pólos de mesmo nome se repelem".

A bússola, inventada há muito tempo pelos chineses, utiliza essa regra fundamental. Ela é uma agulha imantada que pode girar livremente e sempre aponta para a direção norte-sul da Terra, devido ao fato de que a Terra pode ser vista como um gigantesco ímã, com um pólo norte e um pólo sul magnéticos

Por convenção, o pólo norte da agulha da bússola aponta para o pólo norte da Terra. Observe que na realidade é o contrário, ou seja, o pólo sul da agulha imantada da bússola é que é atraído pelo norte terrestre.

Existem também ímãs em forma de ferradura, os quais concentram as linhas de força de forma mais adequada.

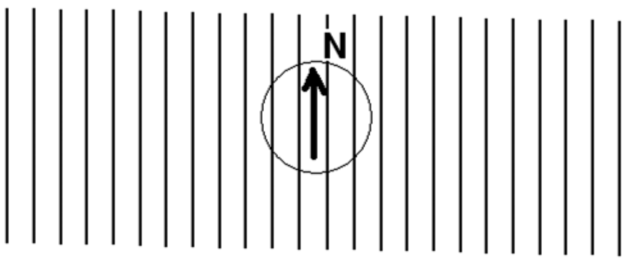
A figura a seguir mostra o que acontece quando se colocam limalhas de ferro sobre a superfície de um papel e se aproxima um ímã no verso dele.



Constatação das linhas de força de campo magnético

Observe na figura que as limalhas de ferro se espalham pela superfície do papel, mostrando as linhas de força do campo magnético do ímã.

O campo magnético é definido como o espaço ao redor de um ímã cujas características ficam alteradas, e ocorrem os fenômenos de atração e repulsão. Quando se coloca uma agulha imantada em um campo magnético, ela irá se posicionar na tangente a uma das linhas de força do campo magnético, que passa pelo ponto onde a agulha imantada está situada, conforme mostra a próxima figura.



Posicionamento de uma agulha imantada inserida dentro de um campo magnético

Da mesma forma que uma carga elétrica origina um campo elétrico, no qual para cada ponto se associa um vetor denominado vetor campo elétrico ($\vec{E}$), também se associa para cada ponto de um campo magnético, um vetor denominado vetor indução magnética, também conhecido simplesmente por vetor campo magnético ($\vec{B}$).

Vale salientar, conforme veremos a seguir, que existem várias maneiras de se produzir um campo magnético (e não apenas através de um imã), como, por exemplo, através de um condutor onde circula uma corrente elétrica.

Fluxo Magnético

Imagine a existência de um pólo magnético com valor unitário inserido em um ponto de um campo magnético. A força que o campo irá exercer sobre esse pólo é definida como a intensidade do campo magnético nesse ponto.

O fluxo magnético (ϕ) devido a um campo magnético é definido de acordo com a seguinte expressão:

$\phi = H*A*Cos(\theta)$, onde H é o campo magnético, A é a superfície da área atravessada pelo campo magnético e θ é o ângulo entre a normal ao plano da superfície de área A e o vetor H.

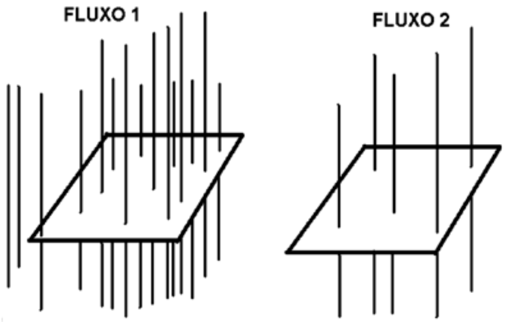
A unidade de fluxo magnético no SI é o weber (Wb), em homenagem ao físico alemão W. Weber. Medindo-se B em tesla (T) e A em m^2, teremos:

$1\ Wb = 1\ T.\ m^2$

Observe que, à medida que o ângulo θ se aproxima de 90°, o fluxo magnético aumenta. De modo inverso, quando θ se aproxima de zero, o fluxo magnético diminui. Isso ocorre porque no primeiro caso haverá mais linhas de indução atravessando a superfície.

Você pode interpretar o fluxo magnético como o número de linhas de indução do campo magnético que atravessam essa superfície. Quanto maior for esse número, maior será o valor de ø.

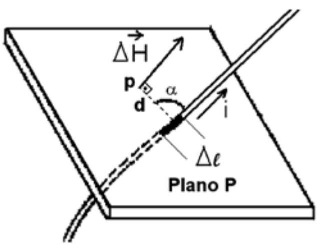
Observe na próxima figura que, apesar de possuírem a mesma área, o fluxo magnético 1 é maior do que fluxo magnético 2, pois o primeiro apresenta uma maior quantidade de linhas de indução sobre a mesma área considerada.



Comparação entre dois fluxos magnéticos

Lei de Biot-Savart

Imagine um condutor no vácuo, percorrido por uma corrente i, conforme mostra a figura a seguir.



Vetor de indução magnética elementar

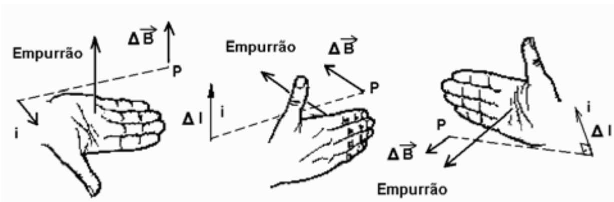
Considere um pedaço minúsculo desse condutor (Δl). Sendo que a distância entre Δl e um ponto (p) é igual a d, e α é o ângulo entre Δl e d, a lei de Biot-Savat determina o vetor de indução magnética elementar ΔH, devido ao fato de a corrente i. O vetor campo magnético apresenta as seguintes características no ponto p:

- **Direção:** perpendicular ao plano determinado por d e α (Plano P).
- **Intensidade:** ΔB = k'_0*(i*Δl*sena)/d2), onde k'_0 é a constante de proporcionalidade, a qual depende do meio em que a corrente elétrica trafega (no caso, o vácuo). $k'_0 = \mu_0$ / (4*π). μ_0 é "permeabilidade magnética do vácuo", uma constante universal semelhante à permissividade elétrica (ε_0). No sistema SI, μ_0 = 4*π*10^{-7} (T*m/A – Tesla*metro/Ampère)

NOTA: Tesla (T) é a unidade de campo no sistema SI em homenagem ao físico iugoslavo Nicolas Tesla.

- **Sentido:** determinado pela regra da mão direita nº 1: "Coloque a mão direita com os quatro dedos, excluindo o polegar, no plano P, com os quatro dedos apontando de Δl para o ponto p. Coloque o dedo polegar apontando para o sentido da corrente. O sentido do campo magnético no ponto p será conhecido, se você empurrar a sua mão de trás para frente".

A figura a seguir mostra o descrito considerando-se três diferentes situações.



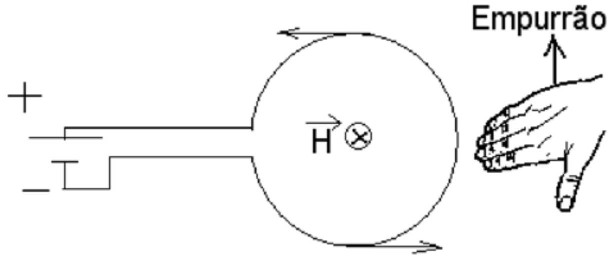
Determinação do sentido do vetor de indução magnética elementar

Levando-se em consideração o valor da permeabilidade magnética no vácio temos que:

$$\Delta B = \frac{\mu_0}{4\pi} \cdot \frac{i \Delta l Sen(\alpha)}{r^2}$$

Campo magnético de uma Espira Circular

A figura abaixo mostra uma espira circular com centro no ponto O, possuindo raio R.



Espira circular e vetor campo magnético

O vetor campo magnético (H) no ponto O possui direção perpendicular ao plano da espira, determinado por R e α = 90º), sentido de acordo com a regra da mão direita número 1 (entrando no papel), e intensidade calculada da seguinte forma:

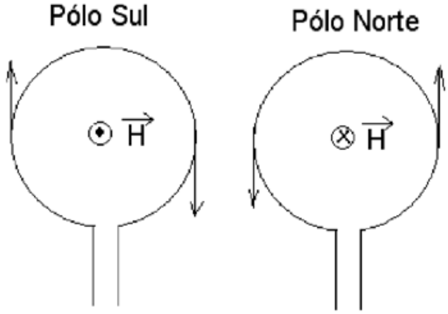
$$\Delta B = \frac{\mu_0}{4\pi} \cdot \frac{i\Delta l}{R^2}$$

O valor da intensidade total do campo magnético no ponto é O é a somatória dos ΔB, ou seja:

$B = \sum \Delta B = \sum \left(\frac{\mu_0}{4\pi} \cdot \frac{i\Delta l}{R^2} \right)$. Entretanto, nesse caso Δl= 2πR. Daí:

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

As linhas de indução do campo magnético saem do pólo norte e chegam no pólo sul. Pode-se utilizar o artifício de que para o caso das linhas de indução em uma espira, se a corrente estiver fluindo no sentido horário (olhando-se de frente para espira), o pólo será sul. No caso contrário (sentido da corente no sentido anti-horário, o pólo será norte. A próxima figura ilustra o acima descrito.



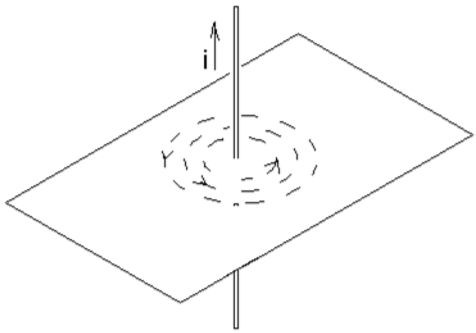
Determinação do sentido do vetor campo magnético em uma espira

No caso da existência de N espiras justapostas (bibina chata) a intensidade do vetor campo magnético no ponto O é:

$$B = N.\frac{\mu_0}{2}.\frac{i}{R}$$

Campo Magnético de um Condutor Reto

Um condutor reto percorrido por uma corrente i proporciona um campo magnético ao seu redor, conforme mostra a próxima figura.



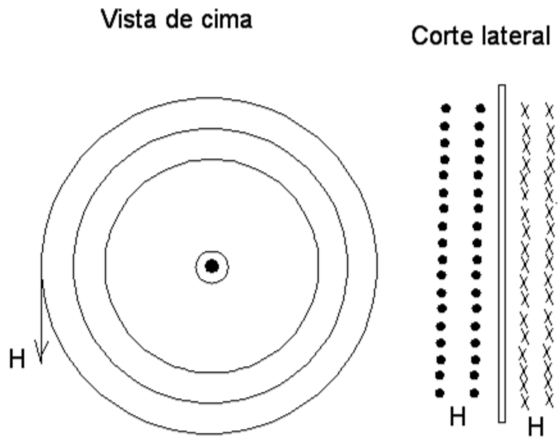
Linhas de indução do campo magnético criado a partir da passagem de uma corrente através de um condutor reto

Conforme você pode observar, as linhas de indução são circunferências concêntricas localizadas em planos perperdiculares ao contutor reto. Para você conhecer o sentido do campo magnético imagine sua direita sobre o condutor com dedo polegar apontando para o sentido da corrente. Os outros quatro, os quais estão enrolados em trono do condutor determinam a o sentido do campo magnético.

O campo magnético em um ponto (p) localizado a uma distância (d) do condutor reto é determianado da seguinte forma:

- **Direção:** Tangente à linha Ed indução que passa no ponto p.
- **Sentido:** Determinado de acordo com a regra da mão direita número 1.
- **Intensidade:** A intensidade do campo magnético é mesma para todos os pontos localizados à mesma distância do condutor reto ($B = \frac{\mu_0}{2\pi}.\frac{i}{d}$).

A figura a seguir mostra o campo magnético criado pela passagem de uma corrente em condutor reto.

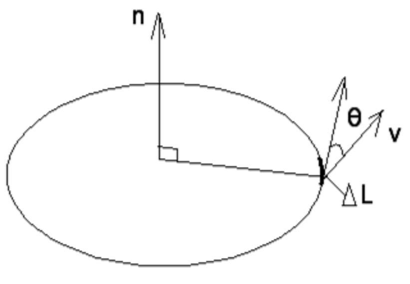


Campo magnético ao redor de um condutor reto percorrido por uma corrente

Na figura acima o ponto significa dizer que a linha de indução está nio sentido saindo do papel, enquanto o (x) significa dizer que a linha de indução está no sentido entrando no papel.

Circulação (ou circuitação) (c) de um vetor é um conceito que auxilia os cálculos matemáticos para encontrar a intensidade do campo magnético. Esse conceito diz que em um percurso plano fechado, existindo um vetor (V) no plano do percurso fecahdo, o elemento de circulação do vetor em relação ao deslocamento Δl é dado por:

$$\Delta c\left(\vec{V}\right) = V \Delta l \cos(\theta)$$



O sentido da normal é determinado através da regra da mão direita número 1 com o polegar no sentido do percurso.

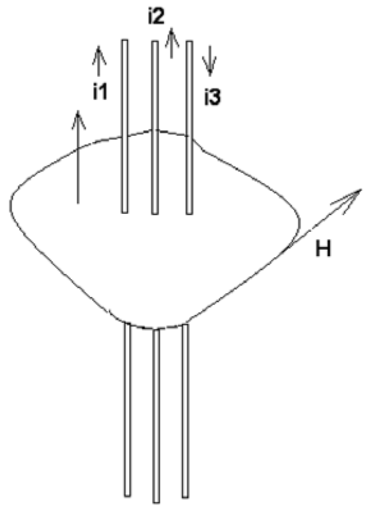
Circulação de um vetor

O valor total da circulação do vetor é a somatória de todos os elementos de circulação de (V), ou seja:

$$C\left(\vec{V}\right) = \sum \Delta c\left(\vec{V}\right)$$

Lei de Ampère

A figura a seguir mostra um percurso fechado atravessado por três condutores retos com corentes i_1, i_2, e i_3, as quais proprocionam os vetores campo magnético $\vec{H}$ em todos os pontos desse percurso fechado.



Vetores campo magnético no percurso fechado

A lei de Ampère afirma que: "A circuitação do vetor $\vec{B}$ em um precurso fechado é proporcional à soma algébrica das correntes enlaçadas pelo circuito, ou seja, $C\vec{B} = \mu_0 \sum i$."

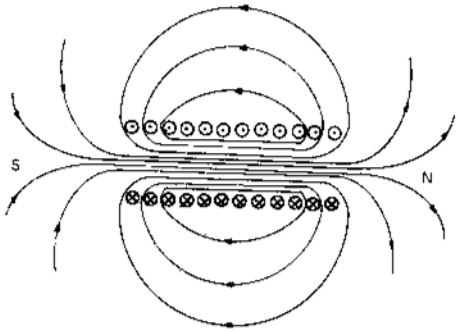
Na equação da lei de Ampère o sinal da corrente é positivo se o sentido o for o mesmo da normal ao plano (determinado pela regra da mão direita número 1), e negativo em caso contrário. Nesse caso de através da figura acima temos:

$$C\vec{B} = \mu_0 (i_1 + i_2 - i_3)$$

Se considerarmos apenas um condutro reto atravessando o percurso fechado, podemos encontrar a mesma equação anterior para o campo magnético, uma vez que sendo θ = 0º (figura abaixo), temos $C(\vec{B}) = B\sum(\Delta l)$. Tendo em vista que o circuito fechado é uma circunferência com raio (r), $\sum(\Delta l) = 2\pi r$, desta forma $C(\vec{B}) = B2\pi r$. Por outro lado, pela lei de Ampère temos que $C\vec{B} = \mu_0 i$. Então $B2\pi r = \mu_0 i$, o que nos permite dizer que $B = \frac{\mu_0}{2\pi} \cdot \frac{i}{r}$, que é mesma equação mostrada anteriormente.

Campo Magnético de um Solenóide

Um solenóide é uma bobina de fios condutores isolados, enrolados em torno de um núcleo de ferro laminado, como você pode observar na figura seguinte.

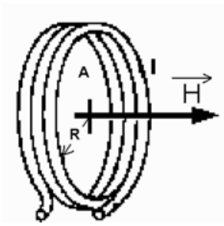


Solenóide e seu campo magnético

Devido à disposição dos campos magnéticos somados de cada um desses condutores, o resultado disso é que a bobina, quando se eletriza, possui todas as características de um ímã.

Note que, na realidade, o vetor de indução magnética elementar é a resultante de todas os componentes do vetor de indução existentes no ponto p.

Observe ainda que, se o condutor estiver em forma de espiral circular, conforme mostra a figura a seguir, o campo magnético resultante ficará na direção perpendicular ao plano da espiral, com sentido dependente da direção da corrente.



Campo magnético de um solenóide

As extermidades do solenóide podem ser denominados de plos norte, e sul. Aplicando-se o artifício da circuitação juntamente com a lei de Ampère obtem-se:

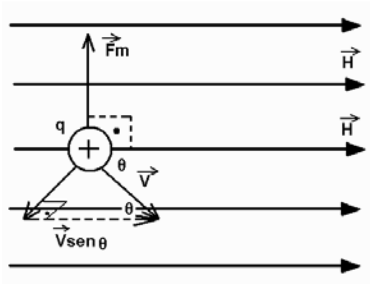
$B = \mu_0 . \frac{N}{l} i$, onde (N) é o número de espiras e (l) é comprimento do solenóide.

Força Magnética

Força Magnética sobre Carga Móvel em Campo Magnético Uniforme

Uma carga em movimento cria, no espaço em torno dela, um campo magnético. Imagine, agora, uma carga elétrica se movimentando dentro de um campo magnético. Nesse caso existe uma interação entre o campo originado pela carga em movimento e o campo magnético existente. Como conseqüência, a carga em movimento fica sujeita a uma força magnética (.

Observe a figura a seguir, que mostra uma carga q se deslocando dentro de um campo eletromagnético uniforme.



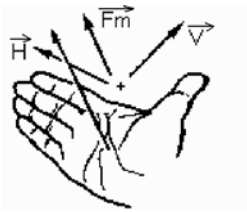
Força eletromagnética de uma carga em movimento dentro de um campo elétrico uniforme

A força magnética sofrida pela carga q será:

F_m = H*q*v*senθ, onde H é o valor do campo magnético, q é o valor da carga, v é a velocidade de deslocamento da carga q, e θ é o ângulo entre o vetor deslocamento da carga q e o vetor campo magnético.

A direção da força magnética é perpendicular ao plano definido pelos vetores v e H. O sentido pode ser determinado pela regra da mão direita nº 2, mostrada a seguir:

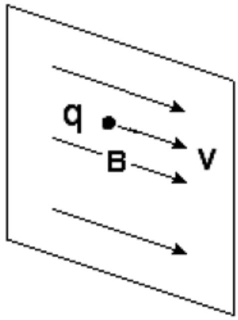
“Coloque a mão direita exatamente como descrito na regra da mão direita nº 1, apontando o polegar no sentido do vetor velocidade e os outros dedos no sentido do vetor H. O sentido da força eletromagnética para a carga q positiva é o mesmo sentido do empurrão (de dentro para fora), conforme mostra a seguinte figura.”



Regra da mão direita nº 2

NOTA: Se a carga q for negativa, o sentido da força eletromagnética será contrário ao sentido da força eletromagnética para a carga positiva.

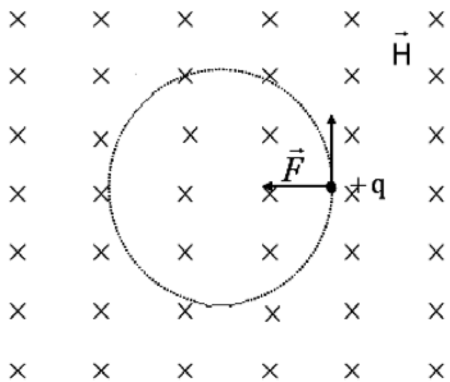
Quando uma carga em movimento penetra em um campo magnético, ela sofre uma modificação na sua trajetória em função da direção de sua velocidade e da força magnética que atua na mesma. A próxima figura mostra que se o vetor velocidade uniforme v é paralelo ao vetor indução magnética, a carga não sofre modificação na sua trajetória e continua em movimento retilíneo uniforme.



Vetor v paralelo ao vetor campo magnético. Nesse caso a carga continua em movimento retilíneo uniforme

No caso acima referido θ = 0º, o que proporciona $F_m = Hqvsen(\theta) = 0$ pois sen(0) = 0.

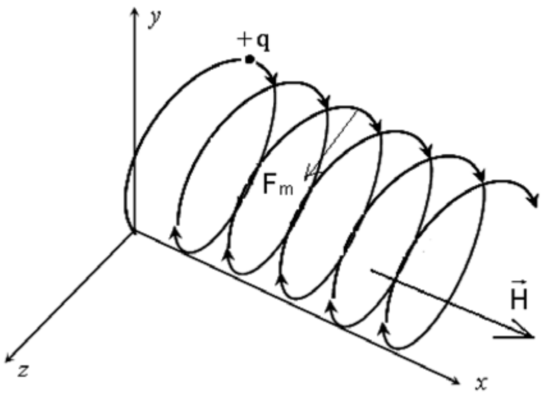
Quando o vetor v é perpendicular ao vetor H (θ = 90º), Fm apresenta seu valor máximo ($F_m = Hqv$), pois sen(90) = 1. Como F_m é perpendicular ao vetor v, podemos dizer que F_m é a fôrça centrípeta que proporciona um movimento circular uniforme à carga, conforme mostra a próxima figura.



Vetor v perpendicular ao vetor campo magnético. Nesse caso a carga fica em movimento circular uniforme

Admitindo-se que a massa da carga é m, que r é o raio da circunferência (trajetória da carga), e sabendo-se que $F_m = ma_{cp} = mv^2/R$, temos que $Hvq = mv^2/R$. Então $R = mv/Hq$.

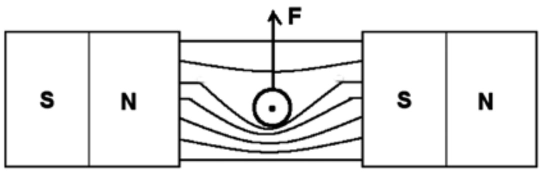
Finalmente, se o vetor v é oblícuo ao vetor H, podemos decompor o vetor na direção paralela a H ($\vec{v}_{||}$) e na direção perpendular a H ($\vec{v}_{||}$), uma vez que $\vec{v} = \vec{v}_{||} + \vec{v}_{\perp}$. Enquanto a componente $\vec{v}_{||}$ é responsável por deixar a carga em movimento retilíneo uniforme, a componente $\vec{v}_{||}$ é responsável por trazer a caraga para movimento circular uniforme. A resultante desses dois movimentos é um movimento uniforme em forma de hélice cilíndrica. Entretanto, podemos afirmar que F_m é perpendicular a v, tratando-se portanto de uma fôrça centrípeta.



Vetor v oblícuo ao vetor campo magnético. Nesse caso a carga fica em movimento helocoidal cilíndrico uniforme

Força Magnética sobre Condutor Reto em Campo Magnético Uniforme

Imagine um condutor elétrico dentro de um campo magnético percorrido por uma corrente elétrica, conforme mostra a próxima figura. Aplique a regra da mão direita nº 1 para constatar que esse condutor ficará sujeito a uma força eletromagnética, no sentido indicado na figura.



Força eletromagnética atuando sobre um condutor localizado dentro de um campo magnético percorrido por uma corrente elétrica

Levando-se em consideração que Δq é o elemento de carga transportado durante o intervalo de tempo Δt, temos que i = Δq/Δt. Portanto, $F_m = H\Delta qvsen(\theta) = Hi\Delta tvsen(\theta)$. Entretanto, sendo l o comprimento do condutor, temos que v = l/Δt. Então, F_m = H.i.l.sen(θ).

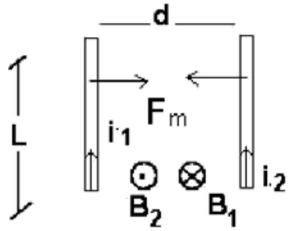
Você pode utilizar a regra da mão direita número 2 para encontrar o sentido da força magnética que atua sobre o condutor.

Força entre Condutores Paralelos

Admitindo-se a existência de dois condutores extensos e retos paralelos no vácuo, distanciados um do outro de uma distância d, através dos quais fluem as correntes i_1 e i_2, conforme mostra a próxima figura, a corrente i_1 gera o vetor campo nagnético H_1 ($H_1 = \frac{\mu_0}{2\pi}.\frac{i_1}{d}$) nos pontos onde está localizado o outro condutor. Como H_1 é perpendicular a I_2, a força magnética ao longo de todo o comprimento desse condutor (l) possui intensidade igual $H_1.i_2$.l. Daí, $Fm = \frac{\mu_0}{2\pi}.\frac{i_1.i_2}{d}.l$

Observe na figura abaixo que se a corrente i_2 possui o mesmo sentido da corrente i_1, haverá atração entre os dois condutores. Caso contrário, haverá repulsão.

Raciocínio idêntico pode ser aplicado para encontrar a força magnética que age sobre o outro condutor.



Esquemático representativo de forças magnéticas atuando em dois condutores paralelos

Substâncias Magnéticas

Imagine a existência de três solenóides com núcleos de ferro, aço temperado e cobre, respectivamente. Inserindo-se a mesma corrente nos três solenóides, nota-se que a intensidade do campo magnético originado no interior do solenóide com núcleo de aço temperado é muito maior do que a do campo magnético no solenóide sem núcleo (H_0), e que a intensidade do campo magnético solenóide com núcleo de ferro apesar de também ser maior do que a intensidade de campo magnético H_0, é menor do que a intensidade de campo magnético do solenóide com núcleo de aço temperado. Por outro lado o solenóide com núcleo de cobre apresenta intensidade de campo magnético ligeiramente menor que H_0. Existem três grupos de substâncias com relação ao magnetismo:

Diamagnéticas: Levando-se em consideração o acima exposto, o cobre pode ser considerado uma substância diamagnética, uma vez que apresentou uma contribuição para o enfraquecimento da intensidade do campo magnético originado no interior do solenóide, em relação a H_0. Outro exemplo de substância diamagnética é o bismuto.

Paramagnéticos: Substâncias que apresentam apenas uma pequena contribuição para o aumento do campo magnético originado no interior do solenóide, em relação a H_0. Exemplos de substâncias paramagnéticas são: manganês, cromo, estanho, alumínio, platina, etc.

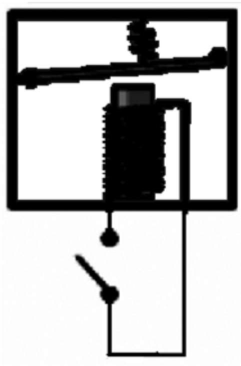
Ferromagnéticas: Substâncias que apresentam grande contribuição para o aumento do campo magnético originado no interior do solenóide, em relação a H_0. Exemplos de substâncias ferromagnéticas são: ferro, cobalto, níquel, gadolíneo, disprósio e ligas especiais, especialmente o aço temperado. Essas substâncias tornam a intensidade do campo magnético no interior do solenóide centenas de milhares de vezes maiores do que H_0.

Histerese Magnética

Quando se imanta uma substância ferromagnética (por exemplo, o núcleo de um solenóide) ela permanece imantada, mesmo após a corrente cessar, originando uma intensidade de campo magnético residual (imantação). O motivo dessa imantação, é que devido á passagem da corrente elétrica, os elétrons ficaram orientados de forma a produzir um campo magnético. Para desimantar essa substância, precisamos inserir uma corrente no solenóide com sentido contrário ao da corrente aplicada anteriormente. Portanto, essas substâncias são utilizadas para a fabricação de imãs permanentes.

Eletro-Imã

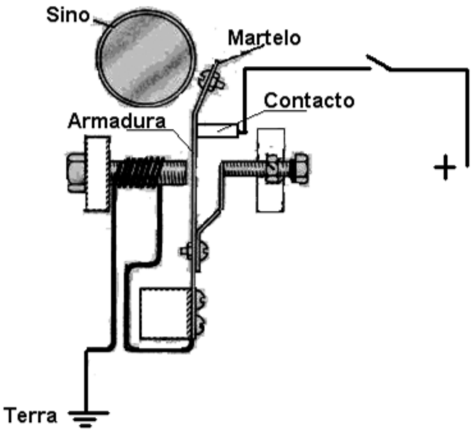
Um eletro-imã pode ser obtido através de ferro doce (ferro inicialmente aquecido e, em seguida, esfriado lentamente), no qual é enrolado um condutor, conforme mostra a figura abaixo.



Esquemático de um eletro-imã

Quando a corrente passa pelo enrolameto o ferro torna-se imantado, porém ao cessar a corrente o ferro torna-se novamente desimantado. Por outro lado se a corrente possuir sentido contrário ao da corrente anteriomente inserida nesse sistema a polaridade do ferro imantado é invertida em relação à situação da corrente anterior. A armadura é a parte do eletro-imã que é atraída quando o ferro doce está imantado, e que se desprende quando cessa a corrente.

Um exemplo da aplicação de eletro-imã é em campainhas, conforme ilustra a Próxima figura.



Esquemátco de uma campainha

Quando se aciona o contacto da campainha o circuito é fechado em C e a corrente flui entre X e Y, o que ocasiona a imantação do eletro-imã, atraindo assim a armadura na qual está fixado o martelo M, o qual incide sobre o sino. Entretanto quando a armadura é atraída o circuito torna-se aberto em C, o que ocasiona a liberação da armadura para a sua posição original. Tovadia, após isto, a armadura é novamentge atraída e o processo acima descrito é reiniciado.

Influência da temperatura sobre a Imantação

Após um metal, por exemplo, ferro, ser atraído por um imã ele torna-se imantado, enquanto está sendo atraído pelo imã. Entretanto, se colocarmos o ferro atraído em fogo, após o mesmo adquirir determinada temperatura, ele perde suas propriedades magnéticas e deixa de ser atraído pelo imã.

A temperatura a partir da qual o material perde suas propriedades magnéticas é denominado ponto Curie, em homenagem ao físico francês Pierre Curie.

Indução Eletromagnética

Toda vez que o fluxo magnético que atravessa um circuito varia com o tempo, surge nesse circuito uma f.e.m. induzida. Esse fenômeno é chamado de indução eletromagnética, e o circuito onde ele ocorre é chamado de circuito induzido. Nesse caso se colocarmos um amperímetro em série nesse circuito, observamos, no amperímetro, uma corrente induzida, a qual cessa, quando cessa a variação do fluxo magnético.

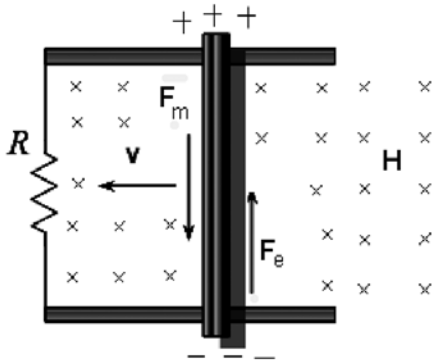
Corrente Induzida

Você pode gerar uma corrente elétrica utilizando um ímã. Para comprovar isso, aproxime as extremidades de uma bobina a um amperímetro de grande sensibilidade. Uma vez que não existe um gerador de tensão nesse circuito, o ponteiro do instrumento indicará intensidade zero.

Se, porém, você aproximar da bobina um dos pólos de um ímã, o ponteiro do amperímetro sofrerá um desvio, revelando que uma corrente percorre o circuito. Se você parar o deslocamento do ímã, o ponteiro retorna a zero e assim permanece enquanto você não voltar a mover o ímã.

Se você afastar o ímã da bobina, o ponteiro voltará a se deslocar, mas para o lado oposto, ou seja, esse movimento do ímã também provoca uma corrente, porém que circula em sentido contrário ao percorrido enquanto o ímã se aproximava. Portanto, sempre que um circuito é atravessado por um campo magnético externo que, por qualquer razão, varia com o tempo, é gerada uma corrente induzida nesse circuito.

A figura a seguir mostra um circuito fechado, porém com um dos seus lados podendo se mover, o qual está sendo atravessado por um campo magnético uniforme. Estando o condutor móvel em movimento, os elétrons desse condutor obviamente também estarão se deslocando em relação ao campo magnético, o que origina uma forma magética nos elétrons desse condutor móvel, cujo sentido pode ser determinado através da regra da mão direita número 2.

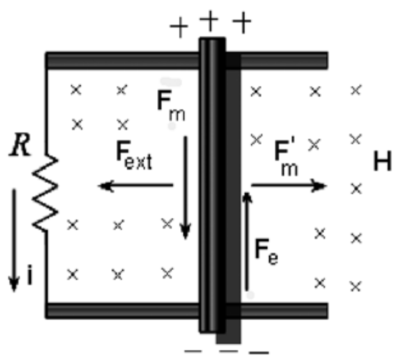


Esquemático de obtenção de circuito induzido

A força magnética atuando sobre os elétrons os desloca para uma das extermidades do condutor móvel. Entretanto como esse condutor torna-se um dipolo elétrico o movimento dos elétrons devido à fôrça magnética cessa, quando a ddp gerada pelo campo elétrico for suficiente para produzir uma fôrça elétrica nos elétrons com a mesma intensidade da força magnética. Entretanto, como o condutor está contacto com o rstante do circuito, os elétrons são atraídos pelo potencial mais alto da outra extremidade do condutor móvel, ocasionado a geração de uma corrente induzida, a qual pode ser medida através do amperímetro. Note que essa ddp corresponde à fem de um gerador elétrico, que nesse caso é denominada de fem induzida (e).

Sabendo-se que o campo elétrico uniforme U = E.d, onde U = e (fem) induzida), E é a intensidade do campo elétrico e d é distância entre o ponto considerado e a fonte, que nesse caso é l (comprimento do condutor móvel), temos que no interior do condutor móvel o campo elétrico é E = U/d. Como $F_m = F_e$ temos Hqv = qE, portanto e = e/l = Hv, e conseqüente e **= H.v.l.**

Enquanto o condutor permanece com velocidade v, haverá uma corrente induzida no circuito. Por outro lado, a corrente i no condutor móvel dentro do campo magnético H, proporciona uam força magnética nesse condutor (F'_m), conforme mostra a figura a seguir.



Conjunto de forças atuando no condutor móvel

Portanto, para se conseguir uma velocidade constante para o condutor móvel, precisamos aplicar uma força externa (F_{ext}) no condutor móvel, a qual deve possuir o mesmo valor da força magnética.

Concluímos, então, que para se obter uma corrente induzida é necessário a aplicação de uma fôrça externa, a fim de que a energia elétrica possa ser gerada devido à aplicação do trabalho realizado pela força externa.

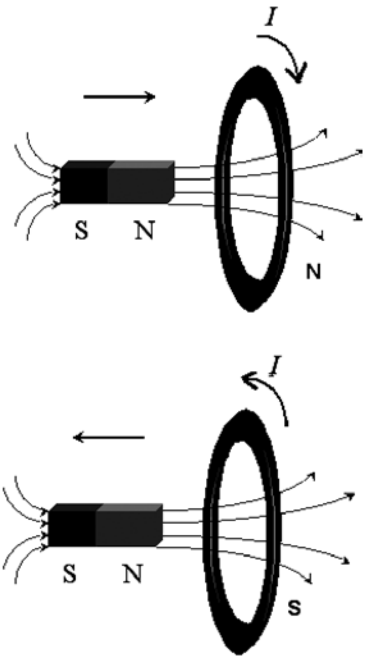
Observe que se invertermos o sentido de deslocamento do condutor móvel, a corrente induzida fluirá em sentido oposto ao da corrente anteriormente obtida.

Podemos afirmar que somente haverá corrente induzida se o fluxo magnético que atravessa o circuito fechado varia em relação ao tempo, (aumentando-se ou diminuindo-se o fluxo magnético), conforme veremos mais a frente.

Sentido da Corrente Induzida – Lei de Lenz

Lei de Lenz: "O sentido da corrente induzida é tal que por seus efeitos, opõe-se à causa que lhe deu origem."

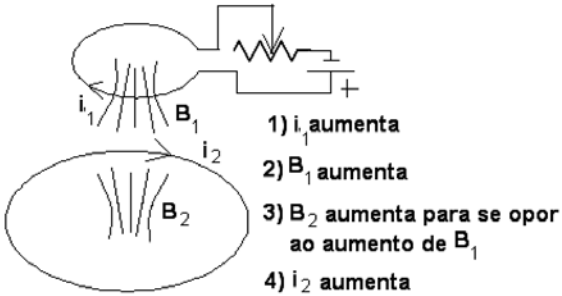
A figura abaixo esclarece melhor a lei Lenz. Quando o pólo norte se aproxima do solenóide, é gerada uma corrente induzida no circuito fechado do solenóide de forma que é criado um polo norte na extremidade A solenóide, a fim de se opor ao aumento do fluxo magnético que penetra no núcleo no solenóide, o que proporciona a geração da corrente induzida. Por outro lado, quando se afasta o pólo norte do imã é criado um pólo sul na extremidade A do solonóide, a fim de que a corrente induzida, agora no sentido inverso ao sentido da corrente induzida criada anteriormente, se oponha à diminuição do fluxo magnético no interior do núcleo do solenóide.



Determinação do sentido da corrente induzida

Note que, do mesmo modo ocorrido no item anterior, foi preciso um trabalho externo para gerar a corrente induzida. Nesse caso foi o trabalho gerado para afastar ou aproximar o imã do solenóide.

A próxima figura mostra outra maneira para obtenção de corrente induzida em circuito fechado.



Geração de corrente induzida via variação do fluxo magnético do circuito indutor

Quando, no circuito denominado indutor (1), se diminui a resistência do reostato, o fluxo magnético que atravessa o circuito induzido (2) aumenta, ocasionando neste a geração de uma corrente induzida a fim de opor a esse aumento do fluxo magnético. O sentido da corrente é invertido quando se diminui o fluxo magnético que atravessa o circuito induzido (aumentando-se a resistência do reostato).

Lei de Faraday – Neumann

Lei de Faraday – Neumann: "A f.e.m. induzida média em circuito é igual ao quociente da variação do fluxo magnético pelo intervalo de tempo que ocorre, com sinal trocado".

Sendo $\Delta\emptyset$ a variação de fluxo magnético ocorrida num intervalo de tempo Δt, temos a seguinte expressão de acordo com a Lei de Faraday – Neumann:

$$e = -\Delta\emptyset / \Delta t$$

Para representar o valor instantâneo da f.e.m. induzida (e) temos:

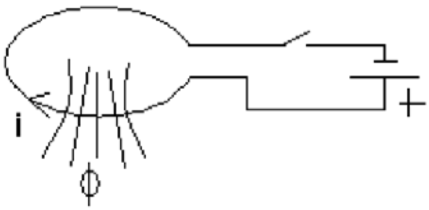
$$e = \lim_{\Delta t \to 0} -\frac{\Delta\phi}{\Delta t}$$

ou seja,

$$e = -\frac{\delta\phi}{\delta t}$$

Auto-Indução

Observe na figura abaixo, que a corrente elétrica origina o campo magnético H, o qual produz o fluxo magnético Φ.



Esquema para obtenção de auto-indução

Temos a seguinte expressão matemática obtida experimentalmente:

$\Phi = L.i$

O valor do coeficiente L na expressão acima, denominado de indutância, depende da configuração do circuito e do meio no qual se encontra o circuito.

Ao variarmos a resistência do reostato, o fluxo magnético que atravessa o circuito também varia, ocasionado uma corrente auto-induzida, ou seja, uma corrente induzida no próprio circuito, que nesse caso é ao mesmo tempo circuito indutor e circuito induzido.

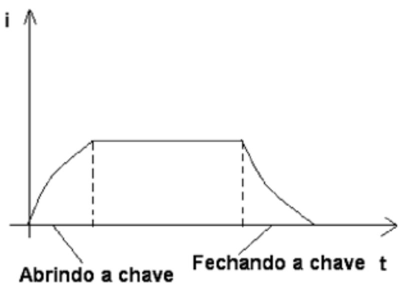
Pela lei de Faraday-Neumann a f.e.m. induzida é:

$$e = -\frac{\Delta\phi}{\Delta t} = -L\frac{\Delta i}{\Delta t}$$

A f.e.m. auto-induzida instantânea é dada por:

$$e = -L\frac{\delta i}{\delta t}$$

Quando se fecha a chave do circuito, a corrente não desaparece instantaneamente. Da mesma forma, quando se abre a chave, a corrente no circuito não surge imediatamente, conforme podemos observar através da próxima figura.



Variação da corrente no circuito ao fechar ou abrir a chave

Note que o intervalo de tempo necessário para o surgimento de uma corrente constante no circuito, ou para seu desaparecimento, depende da indutância L e da resistência elétrica do circuito. É bom lembrar que a faísca que surge nos contactos da chave de um circuito que apresenta indutância acontece devido ao exposto acima.

Correntes de Foucault

As correntes induzidas não surgem apenas em condutores na forma de fio. Um grande volume condutor também está sujeito às correntes induzidas geradas através de um campo magnético variável. Essas correntes induzidas podem surgir em grande número de percursos fechados dentro do volume condutor. Em cada um desses percursos fechados surge uma f.e.m. responsável pela corrente induzida, que nesse caso é denominada de corrente de Foucault, em homenagem a Léon Foucault.

As correntes de Foucault produzem aquecimento no volume condutor devido às dissipações de energia.

Os fornos de indução estão baseados nessas correntes. Outra aplicação possível para elas é na frenagem de trens rápidos. Por exemplo, os trens do metrô de São Paulo utilizam a corrente de Foucault para frenagem. Para tal, ela é obtida através de um eletro-imã localizado próximo ao trilho, quando o operador precisa frear o trem, ele aciona um circuito que passa pelas espiras do eletro-imã. Dessa forma o campo magnético do eletro-imã gera correntes de Foucault nos trilhos e o resultado é a dissipação da energia de rotação das rodas do trem.

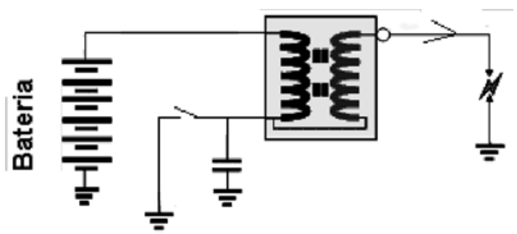
Bobinas de Indução

Os automóveis mais antigos se baseavam na bobina de indução (bobina de Ruhmkorff) para a obtenção da queima de combustível em momento oportuno.

A bobina de indução consegue gerar altas ddps uma vez que é basicamente constituída por um solenóide com fios grossos com espiras (denominado enrolamento primário).

O núcleo cilíndrico do solenóide é constituído por arames de ferro justapostos, porém isolados uns dos outros para evitar as correntes de Foucault.

Acima do solenóide está o que se denomina de enrolamento secundário, conforme detalha a próxima figura, o qual é constituído por fios de cobre finos formando um circuito aberto.

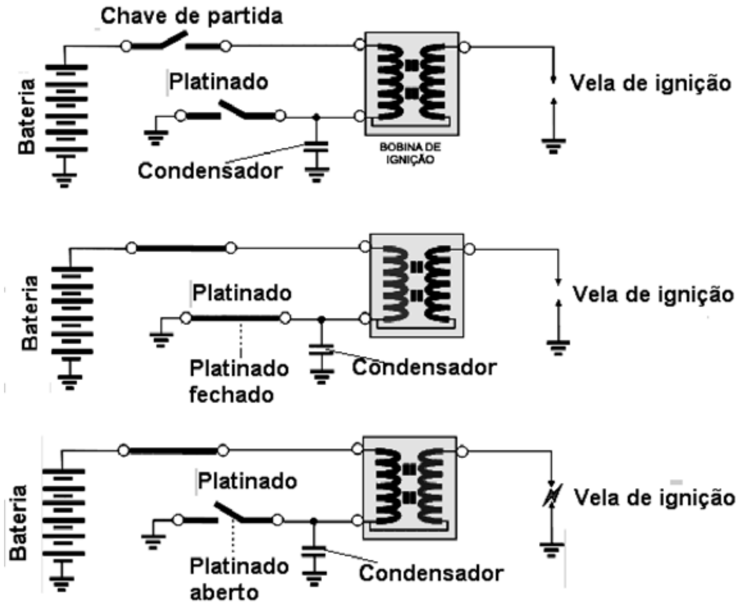


Esquema de uma bobina de indução

O capacitor em série com chave impede o faiscamento na chave.

Para se obter fluxo variável do campo magnético, a chave é aberta e fechada interruptamente, o que gera uma elevada ddp nos terminais do enrolamento secundário, conforme você pode observar na próxima figura. Apesar da existência de ar (isolante) entre os terminais do enrolamento secundário, a grande ddp provoca a passagem da corrente através do ar, ocasionado uma faísca. Esta faísca é responsável pela queima do combustível. O capacitor em série com chave impede o faiscamento na chave, o que retardaria a interrupção da corrente no circuito e, conseqüentemente a f.e.m. induzida seria reduzida.

A próxima figura mostra o esquema do circuito existente nos automóveis com motores a explosão.



Esquema do circuito da bobina de indução para queima do combustível nos automóveis com motores à explosão.

Observe na figura acima que a chave do circuito é o platinado que abre e fecha o circuito aproveitando o próprio movimento do automóvel. Note que o circuito é fechado através da terra (o pólo negativo da bateria é aterrado utilizando-se a carcaça metálica do automóvel). A saída positiva do enrolamento secundário é conectada ao distribuidor, o qual fornece a alta ddp necessária, no momento certo, ao cilindro onde será queimado o combustível. A queima do combustível é obtida através da faísca que surge na vela devido a alta ddp gerada na bobina, em relação a terra, e que está presente no pólo positivo da vela (parte inferior direita da figura acima).

NOTA: Nos automóveis mais modernas a bobina de ignição é substituída por um circuito eletrônico.

Força Magnetomotriz (f.m.m.)

A força magnetomotriz (f.m.m.) é equivalente à força eletromotriz, o fluxo magnético é equivalente à corrente elétrica, e a relutância magnética é equivalente à resistência elétrica.

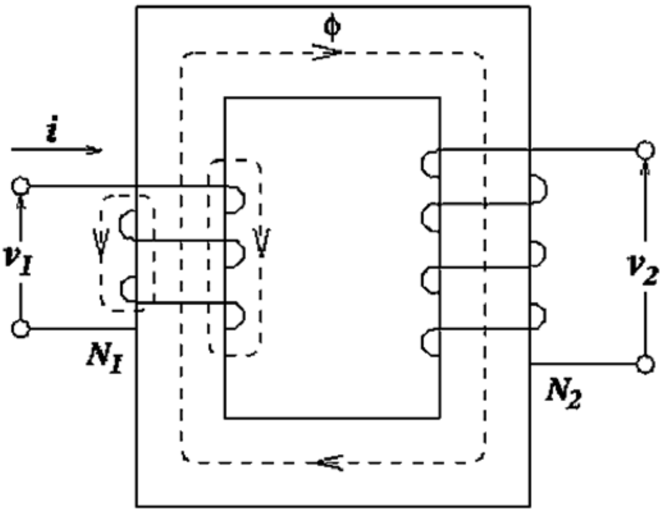
Sabemos que a diferença de potencial elétrico (ou força eletromotriz) entre dois pontos é igual ao produto da intensidade do campo elétrico pela distância, ou seja, $Va - Vo = \Delta V = E*d$, e que a intensidade de campo elétrico pode ser expressa em volts por metro (V/m). Por analogia, no magnetismo a grandeza N.I (em que N é o número de espiras e I é a corrente elétrica sobre as espiras) é chamada de força magnetomotriz (algumas vezes, também, potencial magnético), cuja unidade é o Ampère-espira. A intensidade de campo magnético pode ser expressa pela unidade ampère-espira por metro (A/m).

NOTA: A palavra espira da unidade ampère-espira pode não ser mencionada, ficando apenas ampère. É usado o mesmo símbolo da unidade de corrente (A).

Transformador

Tanto a bobina (ou indutor) quanto o transformador (ou trafo) são componentes formados basicamente por fios enrolados em espiras. A bobina tem apenas um enrolamento, enquanto o transformador possui dois ou mais enrolamentos.

A próxima figura mostra o esquema de um transformador no qual podemos observar o enrolamento primário, chamado assim porque recebe a corrente de excitação que produz o fluxo magnético. O enrolamento que se concatena com o fluxo magnético gerado a partir do enrolamento primário é o enrolamento secundário. Observe que qualquer um dos dois enrolamentos pode ser excitado, sendo isso uma questão puramente de conveniência, e, portanto, qualquer dos dois pode ser primário ou secundário.



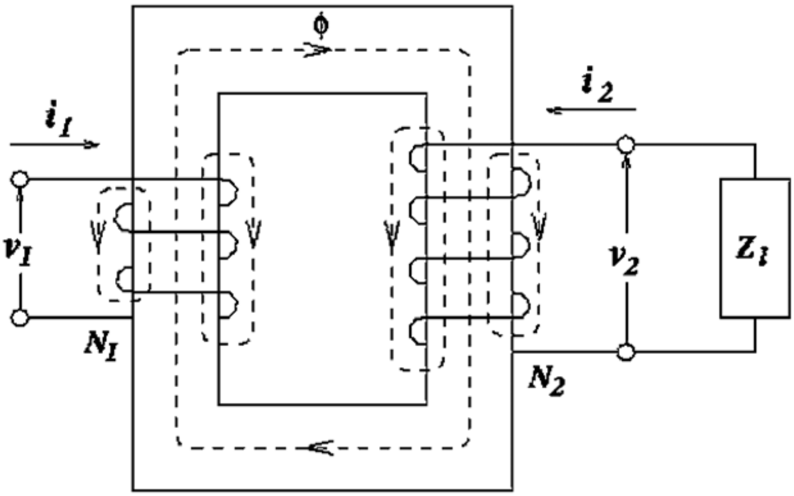
Transformador com enrolamento secundário aberto

Se ligarmos o enrolamento primário a uma fonte de tensão alternada, o fluxo magnético produzido no núcleo induzirá tensão tanto no enrolamento primário como no secundário. Considerando-se a resistência desprezível, como na análise do reator, a tensão induzida no enrolamento primário será igual, em cada instante, à tensão aplicada.

A diferença entre a tensão induzida no primário e no secundário se deve ao diferente número de espiras. Ao considerarmos N_2 como o número de espiras do enrolamento secundário, e N1 o número de espiras do enrolamento primário, então, se N_2 é maior que N1, o transformador será do tipo elevador, no qual a tensão induzida no secundário é maior que a do primário, na proporção do número de espiras. A proporcionalidade entre tensões e espiras é determinada pela seguinte expressão matemática:

$(V_1/V_2) = (N_1/N_2) = a$, em que a representa a relação de espiras ou a relação de transformação

A próxima figura mostra o esquema de um transformador com carga, ou seja, utilizado para alimentação elétrica de algum dispositivo.



Transformador com carga

Quando a corrente de carga circula no enrolamento secundário, a f.m.m. que ela gera é cancelada por uma f.m.m. igual e oposta no enrolamento primário, produzida por um aumento apropriado da corrente primária.

Desta forma, igualando-se, então, as f.m.m. devido às correntes de carga, temos:

$i_2*N_2 = i_1*N_1$

Ou seja:

$(i_2/i_1) = (N_1/N_2)$

Portanto:

$(i_2/i_1) = (N_1/N_2) = (V_1/V_2)$

Dessa expressão concluímos que a elevação da tensão é acompanhada pela diminuição da corrente e vice-versa. Assim, podemos obter a relação:

$V_1 i_1 = V_2 i_2 = P$ (Potência)

Por essa equação concluímos que a potência aparente fornecida ao primário é igual à potência aparente fornecida à carga (transformador ideal).

Um transformador pode ter mais de um primário ou mais de um secundário.

Além das tradicionais aplicações dos transformadores que encontramos no nosso dia-a-dia, com o intuito de se diminuir a perda de energia elétrica grandes transformadores são utilizados nas linhas de transmissão entre as usinas geradoras e os centros consumidores. Sabemos que P = V.I., para se transmitir altas potências através de grandes distâncias, o melhor é aumentar a voltagem e, conseqüentemente, diminuir a corrente, o que reduz a perda de energia devido a resistência interna dos condutores que constituem a linha de transmissão.

Corrente Alternada

A tensão de uma bateria carregada, por exemplo, é contínua, ou seja, é sempre a mesma em qualquer período de tempo. Se a fonte de tensão é contínua, a corrente que surgirá em uma carga inserida em um circuito sobre a ddp dessa fonte também será contínua.

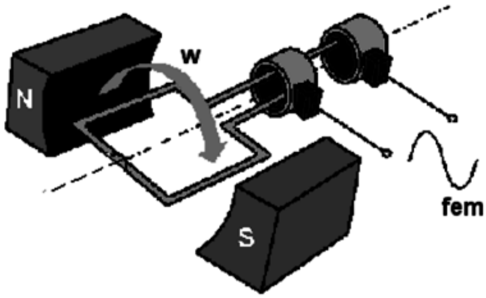
A corrente alternada acontece quando a fonte de tensão varia seu valor em relação ao tempo. Por exemplo, a tensão da energia elétrica de nossas residências é alternada com freqüência de 60 Hz, ou seja, ela varia de forma senoidal, 60 vezes por segundos (ciclos de 1/60 segundo). Se, numa hipótese, a tensão máxima da tensão alternada for de 380 V e sua freqüência for de 60 Hz, a sua tensão instantânea (em um determinado período de tempo) poderia ser representada conforme a seguir:

$V_i = V*sen(2*\pi*f*t)$

$V_i = 380*sen(2*\pi*60*t)$

A próxima figura mostra um campo magnético uniforme atravessando uma espira de área A com movimento circular uniforme (com velocidade angular = w) em torno do eixo X-Y. É n a normal ao plano da espira e θ é o ângulo entre essa normal, e o vetor indução magnética H.

Admitindo-se que no tempo t = 0 a espira esteja posicionada perpendicularmente às linhas de indução, nesse momento θ = 0, portanto nesse instante o fluxo campo magnético que atravessa a espira é o máximo possível ($\phi_{max} = H.A$).



Produção de corrente alternada

Como a espira está girando, decorrido um determinado período de tempo t, θ = w.t, e $\phi = \phi_{max}\cos(wt)$. Lembre-se que w = 2π.f = 2π/T, em que f é a freqüência de rotação e T é o período de tempo (Período) referente a uma rotação.

A próxima figura mostra o gráfico de θ versus t.

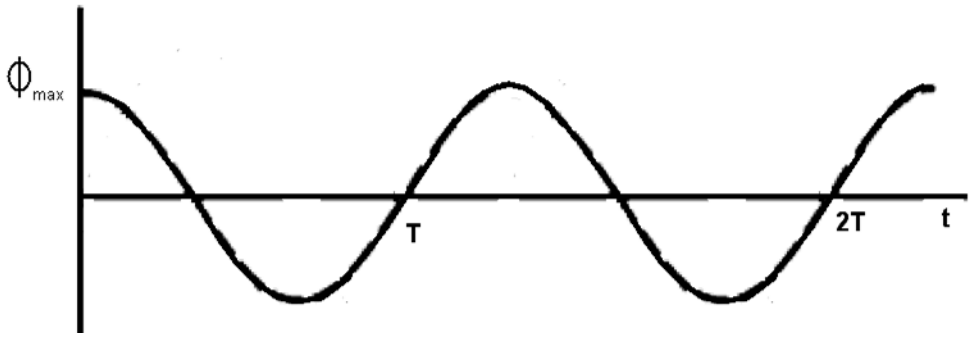


Gráfico de θ versus t

Devido ao campo magnético variável a f.e.m. induzida nos terminais da espira é:

$$e = -\frac{\delta\phi}{\delta t} = -\frac{\delta\phi_{max}\cos(wt)}{\delta t} = -(-\phi_{max}wsen(wt)) = \phi_{max}wsen(wt)$$

Observe que o valor máximo da expressão acima é $e = \phi_{max}w$, portanto,
$e = e_{max}sen(wt)$.

A próxima figura mostra o gráfico de e (f.e.m. induzida nos terminais da espira) versus t.

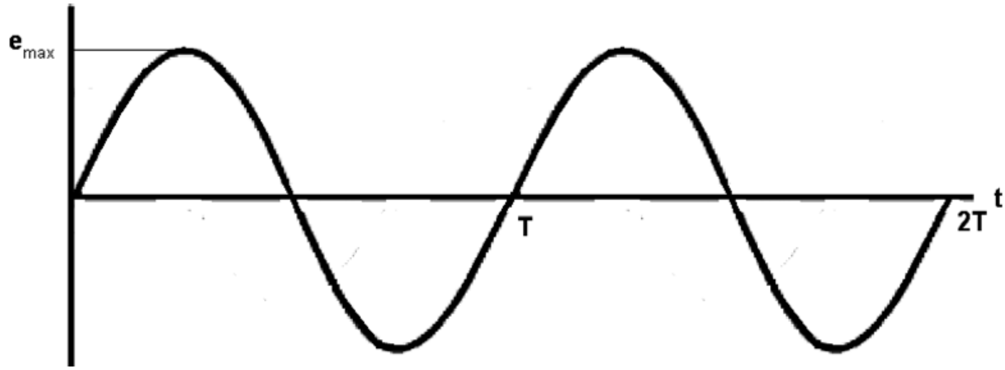


Gráfico da f.e.m. induzida em função do tempo

Se conectarmos os dois terminais da espira através de um resistor (R), temos $i = \frac{e_{max} sen(wt)}{R}$. Portanto, $i_{max} = \frac{e_{max}}{R}$,e a corrente instantânea é $i = i_{max} sen(wt)$.

Lembre-se de que quando uma corrente alternada atravessa um circuito, os elétrons livres oscilam no condutor com amplitudes que variam de acordo com a freqüência da corrente alternada. A corrente alternada das concessionárias de energia elétrica no Brasil é de 60 Hz.

Se a corrente alternada possuir freqüência muito alta a oscilação dos elétrons pode gerar o chamamos de ondas eletromagnéticas (detalhes mais a frente).

Valor Médio e Valor Eficaz

Por tratar-se de corrente alternada do tipo senoidal, seu valor médio é nulo (note que nesse caso a área da parte positiva do gráfico dessa corrente alternada é igual à área da parte negativa).

No caso de corrente alternada, define-se o seu valor eficaz como o valor de uma corrente contínua (I_{ef}) que produziria a mesma quantidade de calor em um mesmo intervalo de tempo em uma determinada resistência e em relação à quantidade de calor produzida pela corrente alternada que flui sobre essa mesma resistência.

Esse valor é conhecido também como valor médio quadrático, que nos EUA é conhecido como I_{rms} ("root mean square"), calculado pela seguinte fórmula:

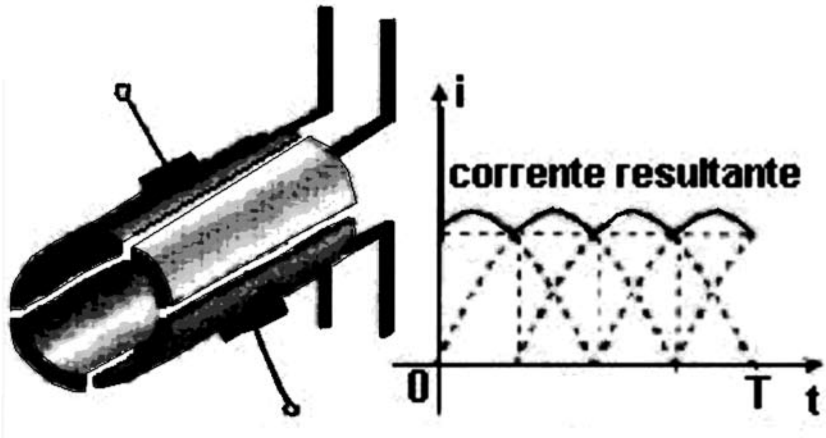
$I_{ef} = I_m/(2^{1/2}) = I_m/1,414$, em que I_m é o valor máximo da corrente alternada

Alternador e Dínamo

A geração de corrente alternada pode ser obtida através de um alternador. Quando o conjunto de espiras (armadura) gira, seus terminais soldados a anéis metálicos giram também esses anéis metálicos, os quais estão em contacto com as escovas (geralmente grafite). É chamado coletor o conjunto constituído pelos anéis e escovas. As escovas estão ligadas ao circuito que recebe a corrente alternada produzida nesse processo.

As usinas geradoras de eletricidade não são mais que gigantescos alternadores onde se aproveita a energia da queda d'água (turbina), no caso de hidrelétricas, ou do vapor, no caso das termoelétricas, para girar as gigantescas armaduras.

Os alternadores mais sofisticados podem fornecer corrente induzida quase contínua. Nesses alternadores os anéis são substituídos por comutadores que proporcionam a produção da corrente em um único sentido.



Gerador com comutadores

O comutador nada mais é que um anel metálico composto por vários setores separados uns dos outros. No lado esquerdo da figura acima vemos um comutador constituído por dois setores. Quando a armadura percorre a metade do ciclo, seus terminais trocam seus contatos nos setores do comutador que estão ligados ao circuito externo. Dessa forma a corrente induzida permanece com o mesmo sentido, conforme você pode observar através da parte esquerda da figura acima (a). Se o comutador possuir vários setores, conforme mostra a parte direita da figura acima (b), a corrente induzida ainda é pulsante, porém está mais próxima da corrente do tipo contínua. Note que para aumentar o número de setores é preciso também aumentar o número de armaduras.

Impedância

Diferentemente do que ocorre em circuitos com tensão contínua, nos quais só existem resistências e apenas estas se opõem à passagem da corrente elétrica, em circuitos com tensão alternada os capacitores e indutores também se opõem à passagem da corrente elétrica. Esse tipo de oposição à passagem da corrente elétrica alternada é denominado "impedância" (ou reatância).

A impedância relativa aos capacitores é denominada de impedância capacitiva, enquanto a relativa aos indutores é denominada impedância indutiva.

Ao se aplicar uma corrente alternada em um condutor elétrico ocorre outro tipo de oposição à passagem da corrente devido às variações dos valores instantâneos dessa corrente alternada. Essa oposição é denominada "reatância".

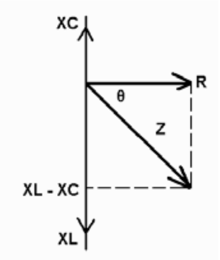
A reatância ocorre, por exemplo, quando a corrente alternada atravessa enrolamentos (motores, transformadores, reatores). Nesse caso, trata-se de uma reatância indutiva, que pode ser calculada conforme apresentado a seguir:

$X_L = w*L = 2\pi*f*L$, em que X_L é a reatância indutiva (em ohms), w é a velocidade angular e L é a indutância (em henrys)

Quando a corrente alternada atravessa capacitores, então a oposição à passagem dessa corrente é definida como uma reatância capacitiva, que pode ser calculada de acordo com a seguinte relação:

$X_C = 1/(w*C) = 1/(2\pi*f*C)$, em que X_C é a reatância capacitiva (em ohms) e C é capacidade do capacitor (em farads)

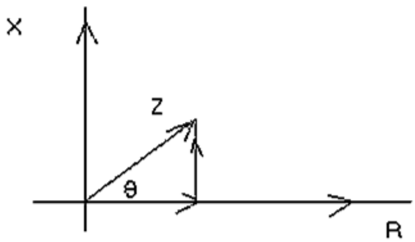
NOTA: Os vetores X_C e X_L possuem sentidos inversos, sendo que X_C está adiantado em 90° e X_L está atrasado em 90° em relação ao vetor corrente alternada, conforme é possível observar na próxima figura.



Sentidos dos vetores XC e XL

Quando a resistência está em série com a capacitância e/ou com a indutância, a impedância é a resultante da soma vetorial das duas reatâncias e da resistência ôhmica, conforme detalha a fórmula a seguir:

Impedância $|Z| = [R^2 + (X_L - X_C)^2]^{1/2}$



$Tg(\theta) = X/R$

Caso esteja a resistência (R) em paralelo com a indutância e/ou com a capacitância (X), então a impedância resultante é:

$$Z = R \pm jX$$

$$\frac{1}{Z} = \frac{1}{R} + \frac{1}{jX}$$

$$R \times jX = Z \times jX + Z \times R$$

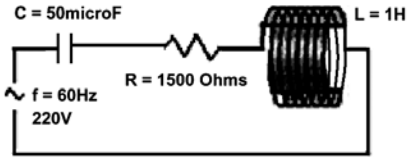
$$Z = \frac{R \times jX}{R + jX} = \frac{j(R \times X)}{R + jX} = \frac{[j(R \times X)] \times (R - jX)}{(R + jX) \times (R - jX)} = \frac{R \times X^2 + j(R^2 \times X)}{(R^2 + X^2) + j(-R \times X + X \times R)}$$

$$Z = \frac{R \times X^2 + j(R^2 \times X)}{R^2 + X^2}$$

$$|Z| = \frac{[R^2 \times X^4 + R^4 \times X^2]^{\frac{1}{2}}}{R^2 + X^2} = \frac{[(R^2 \times X^2) \times (R^2 + X^2)]^{\frac{1}{2}}}{R^2 + X^2} = \frac{R \times X}{\sqrt{R^2 + X^2}} = \frac{(R \times X) \times \sqrt{R^2 + X^2}}{R^2 + X^2}$$

NOTA: (a + bj) x (c + dj) = (ac – bd) + (ad + bc)j

Considere o circuito apresentado na figura a seguir:



X_L = wxL = j2x3,14x60*1,0 = 377 Ω

X_C = [1/(wxC)] = 1/(377x50x10^{-6}) = 53 Ω

$$Z = \sqrt{R^2 + (X_L - X_C)^2} = 357{,}04\Omega$$

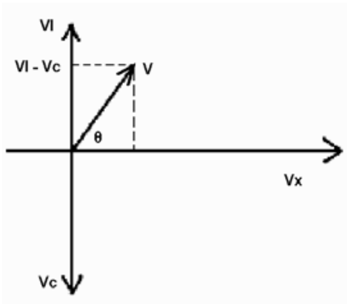
A corrente alternada no circuito é i = 220/357,04 = 0,62A.

Observe que as tensões aplicadas no capacitor, resistência, e indutor são:

Vc = 53x0,62 = 32,86Ω (atrasado 90º em relação à corrente)

Vr = 159x0,62 = 98,58 Ω (em fase com a corrente)

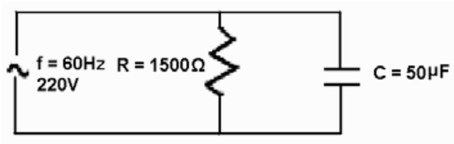
Vl = 377x0,62 = 233,74 Ω (adiantado 90º em relação à corrente)



A tensão resultante é a soma vetorial das tensões nos elementos acima:

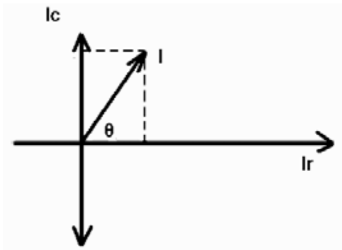
$$V = \sqrt{{V_R}^2 + (V_L - V_C)^2} \approx 220V$$

Considere agora o seguinte circuito:



Ir = 220/150 = 1,47A (Em fase com V)

Ic = 220/53 = 4,15A (Avançada 90º em relação à V)



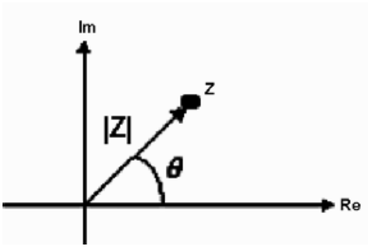
A corrente total será:

$$I = \sqrt{I_R^{\ 2} + I_C^{\ 2}} = 4,4A$$

O fator de potência (cos(θ)) é Ir/I=0,334. Note que se trata de um fator de potência muito baixo. A potência ativa é P = VxIxcos(θ) = 323,4W≈I^2xR.

Observe que se aplicarmos a expressão matemática $|Z| = \frac{(R \times X) \times \sqrt{R^2 + X^2}}{R^2 + X^2}$ acima deduzida, chegaríamos ao mesmo valor de I = 220/49,97 = 4,40A.

Podemos representar a impedância através de seu formato polar: Z = |Z|∠ θ, em que θ é o ângulo com a horizontal do segmento que une o ponto com a origem, conforme mostra a próxima figura.



Representação de um número complexo

Escrita em forma de número complexo, a corrente alternada instantânea seria definida pela seguinte expressão matemática:

Lembre-se de que se Z = a + jb, ou seja, |Z|∠ θ,

tgθ = b/a

A impedância é o número complexo Z = R + jX, ou na forma polar Z = |Z|(cosθ +jsenθ), em que j^2 = -1, θ é o ângulo (argumento) de defasagem entre a tensão aplicada e a corrente no circuito, |Z| é o módulo, R é a resistência elétrica e X é a resultante das reatâncias indutivas e capacitivas do circuito. Os engenheiros usam j no lugar do i para evitar confusão com o i de corrente.

Note que, por exemplo, se $Z_1 = 5 + j5 = (50)^{1/2} \angle 45$, e $Z_2 = 6 + j6 = (72)^{1/2} \angle 45$, temos que se $Z = Z_1 + Z_2$, $Z = 11 + j11 = (242)^{1/2} \angle 45 \neq (242)^{1/2} \angle 90$. Isso vale para todas as outras operações matemáticas.

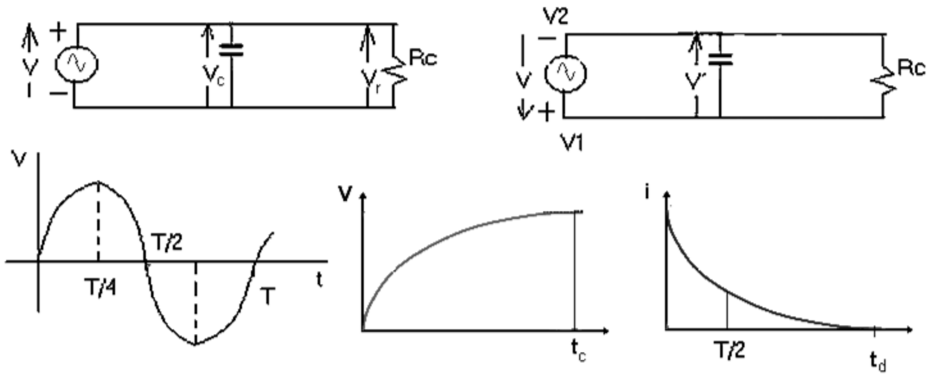
A potência aparente é o número complexo $P = Pr + jPx$, ou seja, $P = |P|(\cos\phi + j\text{sen}\phi)$, onde $|P|$ é o módulo da potência, ϕ é o ângulo de defasagem entre a tensão e a corrente, Pr é a potência real ou ativa (em Watts), Px é a potência reativa (em volt-ampére reativo).

O valor do $\cos\phi$ (fator de potência) é importante na determinação do aproveitamento da energia que está sendo gasta.

Capacitor com Tensão Alternada

De acordo com o que foi descrito anteriormente, o capacitor precisa de um determinado período de tempo para carregar (tc), bem como para descarregar (td), conforme você pode observar na parte inferior da próxima figura.

Imagine que o tempo de descarga do capacitor é maior do que a metade do período da voltagem alternada. Nesse caso a tensão instantânea na resistência de carga (Rc) deverá levar em consideração a perturbação inserida pela tensão reminescente entre as armaduras do capacitor (V'), conforme ilustra a parte superior da próxima figura.



Capacitor em tensão alternada

A resistência Xc oferecida pelo capacitor (impedância), conforme veremos mais à frente, é calculada através da seguinte fórmula:

$Xc = 1/(2\pi fC)$, em que C é capacitância (Q/V = capacidade de armazenar cargas) do capacitor e f é a freqüência da tensão (voltagem) alternada

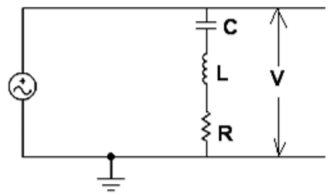
Veja na fórmula apresentada que quanto menor for a freqüência f, maior será a impedância do capacitor. No caso limite, quando a tensão é contínua, a ddp entre os terminais das armaduras do capacitor é a mesma ddp existente entre os terminais do gerador de tensão, e não haverá corrente através capacitor. Nesse caso, toda a corrente oriunda da fonte será aplicada sobre a resistência de carga (Rc).

Por outro lado, quanto maior for a freqüência f, menor será a impedância do capacitor. Nesse caso, quando a freqüência do gerador de tensão tende para o infinito, a impedância do capacitor tende para zero, o que significa dizer que toda a corrente irá fluir através do capacitor, e que a corrente sobre o resistor Rc será nula.

Os princípios descritos sobre o capacitor são utilizados para a elaboração de circuitos eletrônicos de filtros de freqüência, sintonizadores de freqüência, retificadores de tensão, entre outras inúmeras aplicações.

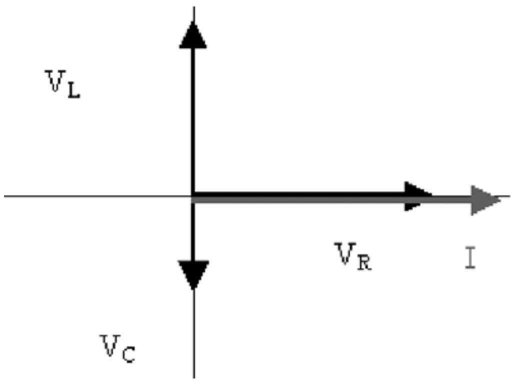
Circuito com R, L e C em Série

A tensão total aplicada aos terminais de R, L e C é a soma vetorial das tensões VC, VR e VL, conforme mostra a próxima figura.



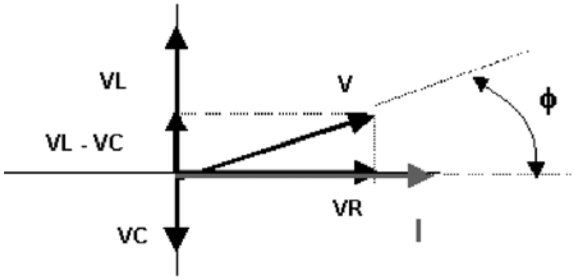
Circuito R, L, C Série

No diagrama fasorial, conforme ilustra próxima figura, a tensão na resistência está em fase com a corrente, a tensão na indutância está adiantada em 90°, enquanto a tensão no capacitor está atrasada em 90°. Consideremos que inicialmente a fase da corrente é nula.



Representação fasorial de R, L e C

Imaginemos que o circuito é indutivo ($V_L > V_C$). A tensão total e impedância totais podem ser obtidas através da soma vetorial das três tensões, conforme detalha a próxima figura.



Soma fasorial das tensões

Tendo em vista que V_L e V_C têm a mesma direção, porém sentidos opostos, nesse caso a resultante entre essa duas tensões será V_L - V_C com o sentido de V_L.

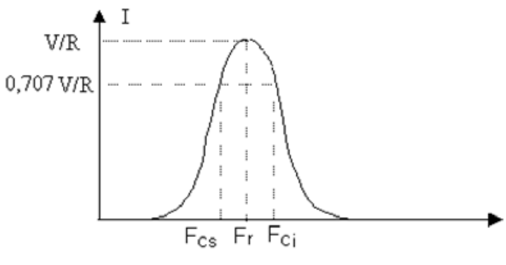
A tensão total é a soma da vetorial da tensão em R com a diferença entre V_L e V_C.

A voltagem total é $V = V_R{}^2 + (V_L - V_C)^2$ e a impedância total é $Z = R^2 + (X_L - X_C)^2$,

Quando $X_L = X_C$ a impedância será igual a R. Nesse caso o circuito é puramente resistivo, a corrente estará em fase com a tensão e o circuito está em ressonância. Portanto, para um circuito ser ressonante é preciso que $X_L = 2\pi*f*L = X_C = 1/(2p*f*C)$ e $f = 1/[2\pi*(L*C)^{1/2}]$, em que L é dado em Henries (H), C em Farads (F) e f em Hertz (Hz).

Se estiver o circuito em ressonância, o valor máximo da corrente é V/R, que, nesse caso, está em fase com a tensão.

Você pode concluir pelas equações acima que os valores das impedâncias X_L e X_C dependem do valor da freqüência (f) do gerador. A próxima figura mostra o gráfico da corrente em função da freqüência.



Voltagem versus freqüência

Abaixo da freqüência de ressonância, a impedância será capacitiva ($X_C > X_L$), a corrente está adiantada em relação à tensão, e a freqüência do gerador está abaixo da freqüência de ressonância.

Acima da freqüência de ressonância, a impedância será indutiva ($X_C < X_L$), a corrente está atrasada em relação à tensão, e a freqüência do gerador está acima da freqüência de ressonância.

A largura de faixa disponível para esse sistema LF = $F_{cs} - F_{ci}$, em que F_{cs}, é a freqüência de corte superior (para a qual a corrente no sistema é 70,7% do valor máximo da corrente) e F_{ci} é a freqüência de corte inferior (para a qual a corrente no sistema cai para 70,7% do valor máximo da corrente.

NOTA: Voltaremos a esse assunto no Capítulo II.

Motores Elétricos

Vimos anteriormente que um campo magnético exerce força sobre cargas elétricas em movimento. Como uma corrente elétrica é um fluxo de cargas elétricas em movimento num condutor, conclui-se que todo condutor percorrido por uma corrente elétrica, imerso num campo magnético, pode sofrer a ação de uma força.

Em um motor há dois eletroímãs e um impulsiona o outro. O eletroímã tem algumas vantagens sobre um ímã permanente: 1) podemos torná-lo mais forte; 2) seu magnetismo pode ser criado ou suprimido; e 3) seus pólos podem ser invertidos.

Um ímã permanente tem os pólos norte e sul definidos. Um eletroímã também os tem, mas a característica de cada pólo (norte ou sul) depende do sentido da corrente elétrica. Quando alteramos o sentido da corrente, a posição dos pólos também se altera (do norte para o sul e do sul para o norte).

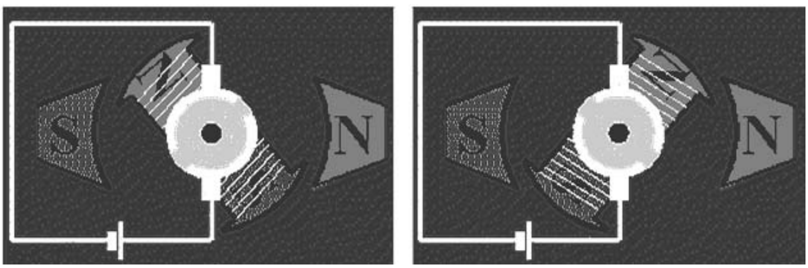
Motor de Corrente Contínua (CC)

Um dos eletroímãs de um motor tem uma posição fixa, está ligado à armação externa do motor, e é chamado de campo. O outro eletroímã está colocado no eixo de rotação e tem o nome de armadura. Quando o motor é ligado, a corrente chega à bobina do campo, determinando os pólos norte e sul. Há também o fornecimento de corrente ao ímã da armadura, o que determina a situação norte ou sul dos seus pólos. Os pólos opostos dos dois eletroímãs se atraem, como acontece nos ímãs permanentes.

O ímã da armadura, se estiver em movimento livre, gira para que seu pólo norte se aproxime do pólo sul do ímã do campo, e seu pólo sul do pólo norte do outro. Se nada mais acontecesse, o motor iria parar completamente. Entretanto, um pouco antes dos pólos opostos se encontrarem, a corrente é invertida no eletroímã da armadura (com o uso de um comutador), o que inverte, assim, a posição de seus pólos. O norte passa a ser o que está próximo ao norte do campo, e o sul passa a ser o que está próximo ao sul do campo. Eles, então, se repelem e o motor continua em movimento. Esse é o princípio de funcionamento do motor de corrente contínua.

A figura a seguir ilustra isso. Note que nas proximidades, por exemplo, do pólo SUL do ímã permanente, existe a inversão de polaridade do ímã da armadura, o que garante a continuidade da sua rotação.

NOTA: Com relação ao pólo NORTE do ímã permanente ocorre a mesma situação.

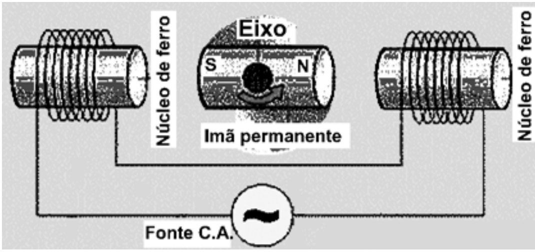


Princípio de funcionamento de um motor elétrico CC

Os motores elétricos modernos, utilizados em eletrodomésticos e em máquinas industriais, possuem um conjunto de espiras que são ligadas e desligadas e mantêm o motor sempre impulsionado.

Motor de Corrente Alternada (CA) Síncrono

Os motores também podem ser projetados para operar exclusivamente com corrente alternada. A figura a seguir mostra o esquema simplificado de um motor desse tipo.



Motor CA síncrono

O motor síncrono CA usa eletroímãs como estatores para fazer girar o rotor (que é um ímã permanente). O rotor gira com freqüência igual ou múltipla da freqüência CA da rede elétrica.

Esse motor é essencialmente idêntico a um gerador elétrico.

Um gerador elétrico utiliza o trabalho mecânico para produzir a energia elétrica, enquanto um motor usa a energia elétrica para produzir trabalho mecânico. O rotor, na ilustração anterior, é um ímã permanente que gira entre dois eletroímãs estacionários. Como os eletroímãs são alimentados por corrente alternada, seus pólos invertem suas polaridades conforme o sentido da corrente é invertido. O rotor gira, uma vez que o seu pólo norte é ”puxado” primeiramente para o eletroímã esquerdo e ”empurrado” pelo eletroímã direito. Cada vez que o pólo norte do rotor está a ponto de alcançar o pólo sul do eletroímã estacionário a corrente se inverte e esse pólo sul se transforma em pólo norte. Dessa forma, o rotor gira continuamente, completando uma volta para cada ciclo da corrente alternada.

Como sua rotação é perfeitamente sincronizada com as reversões da CA, esse motor é denominado “motor elétrico síncrono da CA”. Os motores da bomba d’água e de máquinas de lavar roupa, por exemplo, são desse tipo. Os motores CA síncronos são usados somente quando uma velocidade angular constante é essencial para o projeto.

Motor CA de Indução

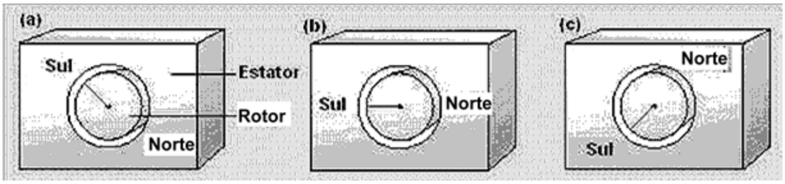
Alguns motores de corrente alternada possuem rotores que não são ímãs permanentes, nem eletroímãs convencionais. Esses rotores são feitos de metais não-magnéticos, como o alumínio, e não têm nenhuma conexão elétrica, porém seu isolamento elétrico não os impede de ficarem magnetizados (ou imantados).

Quando um rotor feito de alumínio é exposto a campos magnéticos alternados, correntes elétricas começam a fluir por ele, e essas correntes induzidas tornam o rotor magnético (indução eletromagnética). Esses tipos de motores, que usam esse fenômeno para tornarem seus rotores magnetizados, são chamados de “motores CA de indução”.

Os motores de indução são, provavelmente, o tipo o mais comum de motor CA. Eles estão embutidos em muitos eletrodomésticos (como ventiladores, motores de toca-discos, etc.) e podem ser observados em aplicações industriais, pois fornecem bom torque, começam a girar com facilidade, além de serem baratos.

Um motor de indução trabalha movendo um campo magnético em torno do rotor – o denominado "campo magnético girante".

O estator que cerca o rotor contém um eletroímã sofisticado. O estator não se movimenta, mas sim o campo magnético que ele produz. Utilizando espiras de curto circuito e capacitores (entre outros componentes) o estator pode criar pólos magnéticos que se deslocam em forma de círculo, movimentado-se em torno do rotor. Na ilustração a seguir é possível observar como o pólo norte do estator "gira" no sentido anti-horário em torno do rotor.



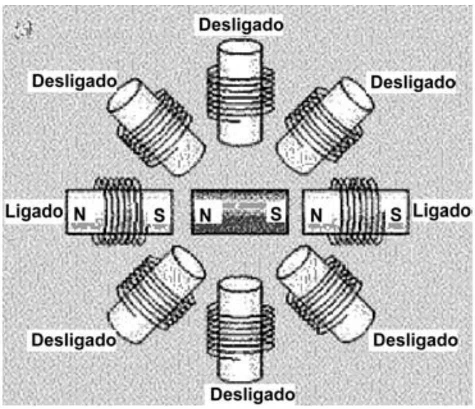
Motor CA de indução

Com isso conseguimos que o rotor fique constantemente girando, pois seus pólos, sul e norte, estão sempre sendo repelidos pelos pólos norte e sul, respectivamente, os quais também estão girando, conforme detalhado.

Motor de Passo

Existem motores computadorizados como, entre outros, drives e CD-ROMs, que usam motores especiais nos quais seus rotores, em vez de girar continuamente, giram em passos discretos. Esses motores são denominados "motores de passo".

O rotor de um motor de passo é, simplesmente, um ímã permanente que é atraído, seqüencialmente, pelos pólos de diversos eletroímãs estacionários, de acordo com o que mostra a próxima figura.



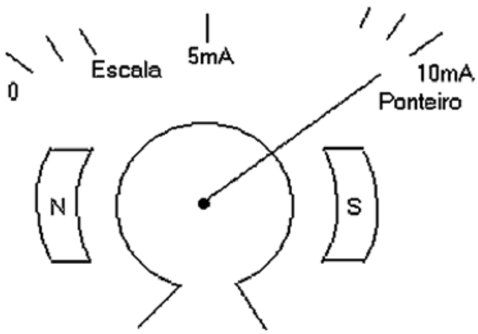
Motor CA de passo

Esses eletroímãs são ligados/desligados seguindo impulsos cuidadosamente controlados, de modo a movimentar, de um eletroímã para outro, os pólos magnéticos do rotor quando ele estiver ligado.

Instrumentos de Medição

Galvanômetro

O galvanômetro é basicamente uma bobina com liberdade para se movimentar em torno de seu eixo e com um ponteiro fixado em uma das extremidades desse eixo, na qual se observa a ação de um campo magnético criado a partir de ímãs colocados sobre ela, conforme mostra a próxima figura.



Galvanômetro

Quando não existe corrente circulando através da bobina, a posição do ponteiro coincide com o ponto zero da escala de medição.

Quando existe corrente elétrica circulando pela bobina, o campo magnético é criado por essa corrente ao redor da bobina de tal forma que o pólo norte desse campo fica posicionado onde está o pólo norte do ímã, e o pólo sul onde está localizado o pólo sul do ímã. Esse fato ocasiona a repulsão da bobina, pois pólos magnéticos do mesmo tipo se repelem.

Quanto maior for a corrente que circula na bobina, maior é o deslocamento da bobina ao redor de seu eixo e, conseqüentemente, do ponteiro.

A bobina possui uma corrente máxima admissível, denominada "corrente de fundo da escala". Essa corrente corresponde ao máximo deslocamento do ponteiro sobre a escala de medição (máximo valor de medição da corrente).

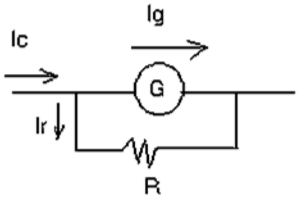
Quando ela é menor que a corrente de fundo da escala, o ponteiro irá se deslocar até determinado ponto intermediário da escala indicando, assim, a corrente que está fluindo através da bobina, que é a corrente que flui no circuito e cujo valor desejamos conhecer.

Atente para o seguinte fato: se a polaridade do campo magnético ao redor da bobina da bobina for alterado, haverá uma inversão no sentido do movimento do ponteiro (o ponteiro irá tentar se deslocar para um ponto localizado antes do início da escala de medição, chocando-se com o terminal de proteção da escala de medição).

Amperímetro

O amperímetro é um instrumento de medição de corrente apoiado em um galvanômetro, porém possui várias escalas, além da escala original do galvanômetro, que possibilitam a medição de várias faixas de corrente.

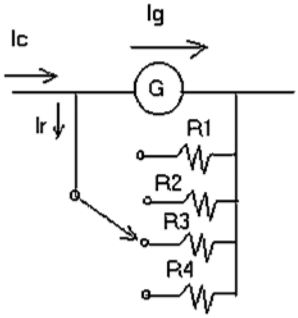
Essas escalas são obtidas através de um divisor de corrente, conforme mostramos a seguir.



Divisor de corrente ("Shunt")

Por exemplo, para obtenção de uma faixa de corrente dez vezes maior que a faixa de medição original do galvanômetro, R deve ser calculado de tal forma que o Ig máximo seja a corrente máxima suportada pelo galvanômetro, e Ir seja igual $10.Ig_{máximo}$ - Ig.

Na realidade, existem várias resistências de "shunt", conforme mostra a próxima figura. As escalas (resistências) são selecionadas através de uma chave seletora existente no amperímetro.

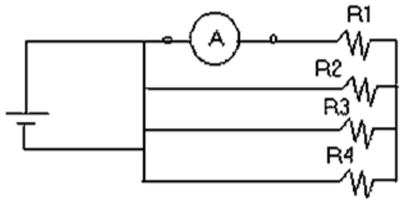


Resistências de "Shunt"

Note que nenhum instrumento de medição pode interferir nas características do circuito sob medição. Por esse motivo, a utilização do amperímetro não pode alterar os valores de tensão e corrente em nenhum ponto do circuito sob medição. Dessa forma, um amperímetro ideal teria resistência interna zero.

Utilização de um Amperímetro

O amperímetro é instalado em série no ponto do circuito cuja corrente desejamos medir, conforme mostra a próxima figura.



Utilização de um amperímetro

NOTAS: 1) Os equipamentos de teste que estamos mostrando são do tipo analógico. O uso de equipamentos de teste digitais segue o mesmo raciocínio apresentado para os equipamentos analógicos.

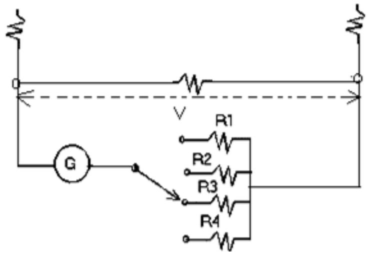
2) Existem amperímetros do tipo indutivo que calculam a corrente através da medição do campo magnético em torno do fio onde circula uma corrente alternada, associando o valor desse campo à corrente que flui. Eles são utilizados para medição de corrente alternada sem a necessidade de abrir o circuito.

Voltímetro

O voltímetro é um instrumento de medição de tensão também apoiado em um galvanômetro. No entanto, ele possui várias escalas que possibilitam a medição de diversas faixas de voltagem.

Considere um galvanômetro com resistência interna de 1 ohm e corrente de fundo de 10 mA. Pela lei de Ohm, temos a diferença de tensão entre os terminais do galvanômetro, quando a corrente de fundo é alcançada, de 0,01 A*1 ohm = 0,01 V. Dessa forma, poderíamos inserir uma escala de medição 0 a 0,01 V, transformando o galvanômetro em um voltímetro, porém essa faixa de medição de voltagem seria muito baixa.

O voltímetro é construído da mesma forma que um amperímetro, mas nesse caso utiliza-se um divisor de tensão em vez de um divisor de corrente, conforme mostra a próxima figura.



Voltímetro

Observe que o voltímetro é inserido em paralelo ao trecho do circuito cuja tensão desejamos medir.

Por se tratar de um divisor de tensão, temos que:

VR1 = (R1*V)/Rt, em que (Rt = R1 + Rint), VG = (Rint*V)/Rt e R1 = [(VRint)/VG] - Rint

Se desejarmos obter uma faixa de medição, por exemplo, de 0 a 10V, com a escala do galvanômetro de 0 a 10, R1 teria o seguinte valor:

R1 = [(10*1)/0,01] - 1 ≈ 1.000 ohms = 1 kΩ

Atente para o fato que quando você seleciona uma escala muito grande, a leitura de pequenos valores de tensão torna-se difícil. Por exemplo, em uma escala de 0 a 380 V, cada divisão da escala representa 38 volts, pois existem apenas dez divisões. Assim, para uma voltagem de 2 V, quase não existirá deslocamento do ponteiro.

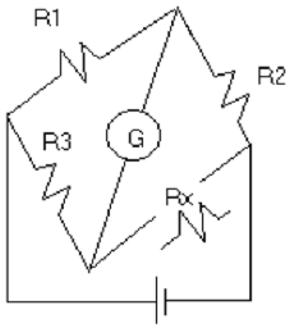
A resistência interna de um voltímetro ideal é infinita para que o voltímetro não receba corrente e, dessa forma, não interfira nas características do circuito sob medição.

Nota: 1) Existem voltímetros apropriados para medições de voltagem contínua e apropriados para medição de voltagem alternada. Os voltímetros geralmente possuem escalas separadas para medições de cada um desses tipos de voltagem.

2) A sensibilidade de um voltímetro analógico é definida em ohms/volt. Por exemplo, um voltímetro com a sensibilidade de 50.000 ohms/volt possui resistência interna de 500 mohms para uma escala com máximo de 10 V.

Ponte de Wheatstone

A ponte de Wheatstone é um instrumento que possibilita a medição de resistências.



Ponte de Wheatstone

Quando R1*Rx = R2*R3, a corrente que passa pelo galvanômetro é nula. A ponte de Wheatstone aproveita esse detalhe para calcular o valor de uma resistência desconhecida Rx, levando em consideração que as resistências R1, R2 e R3 possuem valores, pois:

Rx = (R2*R3)/R1

Para conhecer o valor de Rx, é necessário ajustar a resistência variável (reostato, potenciômetro), até se obter corrente zero no galvanômetro, e aplicar-lhe a fórmula referida.

Na realidade, o reostato se trata de uma década, que é um conjunto de diversas resistências com valores conhecidos. Dessa forma, cada ponto selecionado através do botão giratório da resistência variável indicará uma resistência conhecida.

Observe ainda que, como estamos interessados apenas em saber quando a corrente que passa no galvanômetro é zero, podemos utilizar qualquer galvanômetro com qualquer escala de fundo.

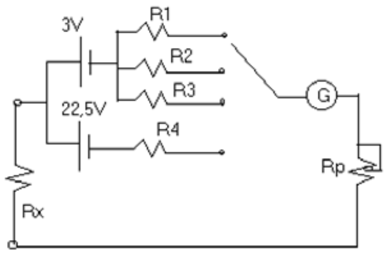
Ohmímetro

O ohmímetro aproveita um galvanômetro para medir resistências e inclui uma bateria (duas pilhas em série de 1,5V cada uma, por exemplo) que fornece corrente ao sistema. Observe que nem o amperímetro nem o voltímetro precisam de uma fonte de alimentação própria.

A próxima figura mostra um ohmímetro com quatro escalas. Cada escala utiliza uma resistência diferente. Observe que utilizando, por exemplo, a resistência R1, temos:

V = i*R1 + RG + Rx, em que RG é a resistência interna do galvanômetro e Rx é resistência cujo valor se deseja conhecer (que está sendo mostrada no instrumento).

Daí: R1 = (V/i) - RG - Rx



Ohmímetro

Geralmente, na escala x1 a resistência que surge no meio da escala possui o valor de 100 ohms.

Ao considerarmos um galvanômetro com resistência interna de 1 ohm, corrente de fundo de 10 mA e uma fonte de 3 V, é possível calcular o valor da resistência que deve ser colocada em série da seguinte forma (levando-se em consideração que o ponteiro deverá apontar para 100 ohms, localizado na metade do mostrador, portanto com corrente fluindo sobre a resistência Rx com o valor igual à metade da corrente de fundo):

R = (3/0,005) - 100 - 1 = 600 - 100 - 1 = 499 ohms

Lembre-se de que a escala do ohmímetro é invertida em relação às escalas do amperímetro e do voltímetro, pois quanto maior a corrente, menor é a resistência. Outro detalhe que deve ser observado é a dificuldade da leitura de altos valores de resistência, uma vez que a escala não é dividida linearmente. Por exemplo, adotando-se o valor de 100 ohms no centro da escala, sobra muito pouco espaço na parte esquerda da escala para representação de valores acima de 1 K, sendo que os valores entre 5 K e 10 K são quase coincidentes.

No entanto, incluindo-se uma chave seletora para a determinação de várias escalas, por exemplo, x1, x100, x1K, e x10K, esse problema será minimizado.

O potenciômetro Rp mostrado na figura anterior é utilizado para se ajustar a posição zero da escala, uma vez que com o decorrer do tempo as pilhas vão perdendo energia. Observe que o potenciômetro está em série com as outras resistências, e dessa forma é necessário diminuir esse valor da quantidade calculada para as resistências em série.

Finalmente, observe que para a escala x10K a fonte é de 22,5 e não de 3 V. Isso se deve da necessidade da corrente de fundo ser menor, ou a fonte de alimentação ser maior.

Vamos calcular a resistência de série para a escala x10K:

R = (3/0,005) - 10000 - 1 = 600 - 100 - 1 = -9401 ohms (Impossível)

Na realidade, tanto a corrente de fundo deve ser menor, como a fonte deve ser maior para a escala x10K. Pode-se adotar, por exemplo, a corrente de fundo igual a 7,5 mm e a fonte de 22,5 V.

Lembre-se de que para medir o valor de uma resistência, é preciso retirá-la do circuito (ou pelo menos retirar um dos lados), caso contrário você estará medindo o valor da resistência do circuito e não o valor da resistência desejada.

Multímetro (Multiteste)

Um multímetro (multiteste) é um único instrumento que possui várias funções de teste, pelo menos as funções de amperímetro, voltímetro e ohmímetro.

Existem dois tipos de multímetros: analógico e digital.

Os multímetros analógicos se baseiam na tecnologia descrita anteriormente, enquanto os multímetros digitais possuem um display de cristal líquido para exibição dos valores das leituras de teste.

A maneira de usar um multímetro digital é a mesma de um multímetro analógico. Ambos possuem pelo menos as escalas para exibição de valores de resistência, tensão contínua, tensão alternada e corrente contínua.

Existem multímetros com escala para medição de correntes alternadas utilizados pelos profissionais da área de eletricidade. Os profissionais da área de eletrônica raramente precisam lidar com correntes alternadas.

Apesar do multímetro digital ser mais moderno e apresentar uma leitura mais precisa, os multímetros analógicos ainda são muito usados, principalmente quando se deseja obter altos valores de voltagens (em aparelhos de TV, por exemplo), pois os multímetros digitais possuem uma resistência interna fixa, enquanto os analógicos possuem resistências internas variáveis, de acordo com a escala utilizada.

Dessa forma, para altos valores de voltagem, a corrente que flui para o multímetro causa um mascaramento da leitura obtida.

Atente ainda para o fato de que as medidas de tensão alternada levam em consideração freqüências entre 50 e 60 Hz, do tipo senoidal, portanto não são indicadas para obtenção de valores de voltagem em outras faixas de freqüência, nem em outros tipos de forma de onda, como, por exemplo, ondas quadradas.

Os multímetros apresentam conector preto com um símbolo “-” para encaixe da ponteira preta (ponta de prova preta). A ponteira vermelha deverá ser encaixada no conector apropriado. Nos multímetros analógicos a ponteira vermelha é encaixada no mesmo conector, para medição de resistência, corrente ou voltagem. Nos multímetros digitais, entretanto, existe outro conector para medição de corrente.

Existe uma identificação ao lado de cada um dos conectores de um multímetro.

É recomendável, se você não souber o valor da grandeza do componente que irá medir, posicionar o multímetro na escala mais alta e ir baixando a escala até que você encontre a melhor leitura do valor do componente sob medição.

Outra recomendação, se você estiver utilizando um multímetro analógico para medir resistências, é ajustar o zero do zero do ohmímetro, conforme já detalhamos anteriormente.

Finalmente, para medição de componentes eletrônicos com multímetro analógico, você deve usar a escala de resistência, e, com multímetro digital, você deve utilizar a escala de diodo (voltaremos a esse assunto na parte de eletrônica).

Osciloscópio

O osciloscópio é um instrumento de medição utilizado para obtenção da voltagem e freqüência de ondas, inclusive ondas de forma triangular, quadrada, dente de serra, etc.

(Além disso, o osciloscópio pode ser usado para medição de ruídos sobre corrente contínua - "ripple").

Exibem a forma da onda através de seu monitor de vídeo e possuem impedância padrão de 1 mohms, porém a utilização de uma ponta de prova multiplicadora eleva esse valor para 10 mohms e multiplica a leitura da voltagem por dez, de forma que a escala de 1 V passa a ser de 10 V. Os mais modernos (digitais) além de exibirem a forma da onda na tela, ainda exibem informações escritas dos valores de pico, RMS, freqüência, etc.

Os osciloscópios são diferenciados uns dos outros pela freqüência máxima que conseguem exibir. Atente para o fato que um osciloscópio apropriado para receber até uma determinada freqüência pode exibir uma freqüência maior, porém, nesse caso, a amplitude do sinal será exibida na tela com um valor menor do que o seu valor real.

Você pode utilizar esse aparelho da mesma maneira que você utiliza um voltímetro (basicamente o osciloscópio mede tensões).

Os osciloscópios possuem geralmente dois canais (entradas). Utilizando apenas um canal, posicione a chave seletora em "Ch1" e insira a ponta de prova no conector identificado com "Ch1".

Após ligar o aparelho, é necessário calibrá-lo a fim de que o eixo zero desenhado pelo osciloscópio coincida com o eixo zero da escala desenhada na tela do osciloscópio.

Para calibrá-lo, coloque a chave seletora de entrada do canal 1 na posição GND e gire o potenciômetro marcado com uma seta vertical até você conseguir coincidir o eixo desenhado pelo osciloscópio com o eixo permanente da escala.

Uma onda alternada pode estar acima de um nível de tensão contínuo (DC), denominado "offset".

Na mesma chave de entrada do canal 1, existem também as posições AC e DC. Para iniciar a exibição da onda na tela, selecione a posição DC se você desejar que o osciloscópio mostre o "offset". Na posição AC o osciloscópio não mostra o "offset". Nesse caso, o eixo da forma da onda coincide com o eixo X do osciloscópio.

Caso não tenha experiência no assunto, sugiro que selecione a posição DC.

Existem dois ajustes básicos:

1) Ajuste da amplitude, ou seja, volts/divisão (V/div), através da chave seletora de volts por divisão que regula o eixo Y (amplitude) da tela. Gire a escala de volts por divisão até obter o melhor posicionamento da onda com relação a sua amplitude.

2) Ajuste do período, ou seja, segundos por divisão (s/div), através da chave seletora de período que regula o eixo X da tela. Gire a escala de período até obter o melhor posicionamento da onda com relação ao seu período.

Se depois desse ajustes a forma da onda ficar deslizando sobre o eixo horizontal, gire o potenciômetro "sincronismo" (trigger) até obter o sincronismo, ou seja, até que a forma da onda fique parada.

Para saber a amplitude da onda, conte as divisões verticais. Por exemplo, se você tiver selecionado a chave seletora volts/divisão para 5 V e a voltagem máxima da onda ocupar duas divisões, o valor de pico de onda (Vp) é de 10 V. Para saber qual é freqüência da onda, conte as divisões horizontais referente a um período e calcule suja freqüência (freqüência = 1/período).

Por exemplo, se a chave seletora estiver posicionada em 0,25 ms, o período da onda (quatro divisões) é 1 ms, e sua freqüência será de 1.000 Hz.

Você pode utilizar os dois canais do osciloscópio de forma simultânea a fim de exibir ao mesmo tempo na tela duas formas de onda diferentes. Para isso você precisa calibrar separadamente cada um dos canais. Isso pode ser útil, por exemplo, quando você desejar comparar o sinal de entrada com o sinal de saída em um circuito.

Nota: Existem inúmeros tipos de instrumentos de medição, como, por exemplo, o capacímetro (para medir capacitância), o wattímetro (para medir potência), o terrômetro (para medir resistência de aterramento), o freqüencímetro (para medir freqüência), dentre outros.

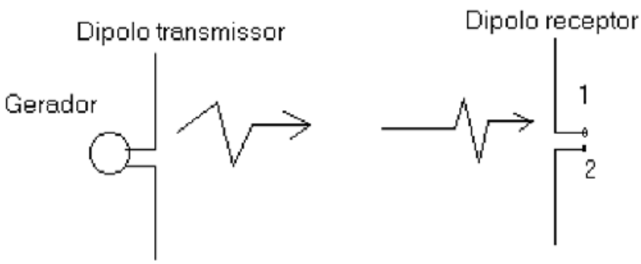
Ondas Eletromagnéticas

A energia denominada onda eletromagnética é constituída por um campo elétrico variável no tempo que induz um outro campo magnético (também variável no tempo) que, por sua vez, induz um outro campo desses, e assim sucessivamente. As ondas eletromagnéticas são geradas através de circuitos ou dispositivos eletro-eletrônicos e se propagam em meios de transmissão como, por exemplo, cabos coaxiais, guias de onda, fibras óticas, etc. Elas também estão presentes no espaço livre e podem ser introduzidas nesse ambiente através de dispositivos chamados de radiadores ou antenas.

A antena possibilita a transição de uma onda eletromagnética que se propaga confinada em um meio de transmissão para uma onda eletromagnética que se propaga no espaço aberto. Esse fenômeno de transição é denominado radiação ou irradiação.

Quando conectamos um gerador de rádio-freqüência a uma antena, é irradiada uma onda eletromagnética com a mesma freqüência do gerador. Essa onda é criada devido ao fluxo de corrente e a conseqüente variação do potencial elétrico na antena. Irradiada dessa maneira, essa onda pode ser detectada por outra antena localizada até determinada distância da antena transmissora, conforme ilustra a próxima figura.

Se medirmos a ddp entre os terminais 1 e 2, surgirá uma determinada tensão. Ao curto-circuitar os terminais 1 e 2, surgirá uma corrente.



Onda eletromagnética transmitida e recebida por antenas

A energia eletromagnética se propaga a partir da antena transmissora, levando a informação dessas oscilações que serão recebidas em forma de onda eletromagnética na antena receptora. Observe que cada oscilação completa com um período $T = 1/f$ (em que f é a freqüência da onda eletromagnética) e o fluxo de energia viaja uma distância $L = c^*T$ (em que c é a velocidade da luz no vácuo = 299.792.458 m/s). Essa distância de propagação (L) é denominada comprimento de onda (λ).

O processo de radiação pode ser explicado através das equações clássicas de Maxwell.

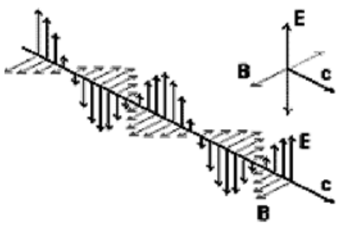
As equações de Maxwell (em homenagem a James Clerk Maxwell) descrevem os fenômenos eletromagnéticos. O alcance dos fenômenos regidos por essas equações é muito vasto, incluindo o estudo da propagação da luz (que também é um fenômeno de origem eletromagnética). Elas foram desenvolvidas há mais de um século, já passaram pelos mais severos testes experimentais e formam um dos sustentáculos da Física.

As equações de Maxwell anteciparam as descobertas experimentais que só viriam anos depois através de Hertz.

Foge ao escopo deste livro a explicação das equações de Maxwell, porém afirmamos que através delas é possível se deduzir que, se uma carga elétrica for acelerada (se houver uma variação da velocidade ou se ela mudar de direção), então essa carga elétrica emitirá energia sob a forma de ondas eletromagnéticas. São exemplos de ondas eletromagnéticas as radiações infravermelhas, as radiações que constituem a luz visível, as radiações X e as gama. Cada um desses tipos de radiações é caracterizado por uma freqüência.

Maxwell observou que a velocidade das radiações eletromagnéticas podia ser descrita em função das constantes conhecidas que descreviam as propriedades elétricas e magnéticas ($v = 1/(\mu^*\varepsilon)^{1/2}$).

Essas equações determinam o campo eletromagnético em uma região do espaço onde não existem cargas livres nem correntes elétricas, e admitem uma solução ondulatória, com o campo elétrico E, além de campo magnético B variando harmonicamente, um perpendicular ao outro e ambos perpendiculares à direção de propagação, definida pelo vetor c, que representa a velocidade da onda, conforme ilustra a figura a seguir.



Representação gráfica de uma onda eletromagnética se propagando no vácuo

A figura acima representa uma onda plano-polarizada, ou seja, todos os vetores E em todos os pontos do espaço pelos quais passa a onda eletromagnética são paralelos e estão no mesmo plano. O mesmo vale para os vetores B, que estão num plano perpendicular. Como os planos de vibração dos campos elétrico e magnético são sempre perpendiculares, para caracterizar uma onda eletromagnética qualquer é usual especificar a direção do plano do campo elétrico e a direção de propagação da onda.

De acordo com esse detalhamento define-se o plano de polarização de uma onda eletromagnética como o plano ao longo do qual o campo elétrico oscila. Para exemplificar, afirmamos que a luz produzida em uma lâmpada incandescente, por exemplo, é do tipo não polarizada, pois é constituída por um grande número de ondas, sendo que em cada uma delas o campo elétrico oscila segundo uma direção aleatória.

Se, por exemplo, a direção de propagação da onda no espaço é a direção do eixo x, os módulos dos campos elétrico e magnético são dados, respectivamente, por:

$$E = E_0 \cos [\, k (x - ct) \,]$$

e

$$B = B_0 \cos [\, k (x - ct) \,]$$

Nas equações acima $k = 2\pi/\lambda$ é o que denominamos "número de onda", sendo λ o comprimento de onda. Note, quando a onda eletromagnética está se propagando no espaço livre, os vetores que representam o campo elétrico (E) em todos os pontos do espaço por onde a onda passa são paralelos e estão no mesmo plano. O mesmo fato ocorre com os vetores referentes ao campo magnético (B), entretanto os vetores B ficam contidos em um plano perpendicular ao plano que contém os vetores E.

De acordo com a explicação acima, os planos que contêm os campos elétrico e magnético são sempre perpendiculares. Dessa forma, uma onda eletromagnética é caracterizada através da determinação da direção do plano do campo elétrico e da direção de propagação da onda.

O plano de polarização de uma onda eletromagnética é definido como o plano ao longo do qual oscila o campo elétrico. Existem três tipos de polarização: linear, circular e elíptica, de acordo com o tipo de movimento do vetor campo elétrico (ou magnético). A luz proveniente de uma lâmpada incandescente, por exemplo, é não polarizada, já que é constituída por um grande número de ondas, sendo que cada uma possui seu campo elétrico (ou magnético) oscilando em uma direção aleatória.

Em 1888, em Berlim, Heinrich Hertz gerou ondas elétricas utilizando uma haste metálica com um pequeno espaçamento que a dividia em dois. Aplicou, então, alta tensão entre as duas metades, e centelhas atravessaram o pequeno espaçamento gerando violentas oscilações de alta freqüência na região em torno do centelhamento. Ao captar as ondas com um circuito semelhante colocado a curta distância, Hertz provou que elas viajavam no ar. Conseguiu observar também o que Maxwell já havia previsto: que estas ondas viajavam com a velocidade da luz e apresentavam características de reflexão e difração, podendo ser focalizadas por refletores côncavos.

Principais Unidades de Medida

Unidade de **freqüência**	1 **hertz (Hz)** é a freqüência de um fenômeno periódico cujo período é de 1 segundo
Unidade de **intensidade de força**	1 **newton (N)** é a intensidade de uma força que aplicada a um corpo que tem uma massa de 1 quilograma lhe comunica uma aceleração de 1 metro por segundo quadrado
Unidade de **pressão**	1 **pascal (Pa)** é a pressão uniforme que exercida sobre uma superfície plana de área de 1 metro quadrado aplica perpendicularmente a essa superfície uma força total de intensidade de 1 newton
Unidade de **energia, trabalho, quantidade de calor**	1 **joule (J)** é o trabalho realizado por uma força de intensidade de 1 newton cujo ponto de aplicação se desloca em 1 metro na direção da força

Unidade de **potência, fluxo radiante**	1 **watt (W)** é a potência que dá lugar a uma produção de energia igual a 1 joule por segundo
Unidade de **quantidade de carga elétrica**	1 **coulomb (C)** é a quantidade de carga transportada em 1 segundo por uma corrente elétrica de intensidade igual a 1 ampère
Unidade de **potencial elétrico, força eletromotriz**	1 **volt (V)** é a diferença de potencial elétrico que existe entre dois pontos de um condutor elétrico que transporta uma corrente de intensidade constante de 1 ampère quando a potência dissipada entre esses pontos é igual a 1 watt
Unidade de **resistência elétrica**	1 **ohm (Ω)** é a resistência elétrica que existe entre dois pontos de um condutor quando uma diferença de potencial constante de 1 volt aplicada entre esses dois pontos produz, nesse condutor, uma corrente de intensidade 1 ampère (não há força eletromotriz no condutor)
Unidade de **capacitância elétrica**	1 **farad (F)** é a capacitância de um capacitor elétrico entre cujas armaduras aparece uma diferença de potencial elétrico de 1 volt quando armazena uma quantidade de carga igual a 1 coulomb
Unidade de **fluxo magnético**	1 **weber (Wb)** é o fluxo magnético que ao atravessar um circuito de uma só espira produz nela uma força eletromotriz de 1 volt quando se anula esse fluxo em 1 segundo por decaimento uniforme
Unidade de **indução magnética**	1 **tesla (T)** é a indução magnética uniforme que distribuída normalmente sobre uma superfície de área 1 metro quadrado produz, através dessa superfície, um fluxo magnético total de 1 weber
Unidade de **indutância**	1 **henry (H)** é a indutância elétrica de um circuito fechado no qual se produz uma força eletromotriz de 1 volt quando a corrente elétrica que percorre o circuito varia uniformemente à razão de 1 ampère por segundo

Relações entre as Principais Unidades de Medida

Grandeza	Nome	Símbolo	Expressão em outras unidades SI	Expressão em unidades básicas SI
Freqüência	hertz	Hz		s^{-1}
Força	newton	N		$m\ kg\ s^{-2}$
Pressão	pascal	Pa	$N\ m^{-2}$	$m^{-1}\ kg\ s^{-2}$
Energia, trabalho, quantidade de calor	joule	J	N m	$m^2\ kg\ s^{-2}$
Potência	watt	W	$J\ s^{-1}$	$m^2\ kg\ s^{-3}$
Quantidade de eletricidade, carga elétrica	coulomb	C		s A
Potencial elétrico, força eletromotriz	volt	V	$W\ A^{-1}$	$m^2\ kg\ s^{-3}\ A^{-1}$

Resistência elétrica	ohm	Ω	$V\ A^{-1}$	$m^2\ kg\ s^{-3}\ A^{-2}$
Capacitância elétrica	farad	F	$C\ V^{-1}$	$m^{-2}\ kg^{-1}\ s^4\ A^2$
Fluxo magnético	weber	Wb	$V\ s$	$m^2\ kg\ s^{-2}\ A^{-1}$
Indução magnética	tesla	T	$Wb\ m^2$	$kg\ s^{-2}\ A^1$
Indutância	henry	H	$Wb\ A^{-1}$	$m^2\ kg\ s^{-2}\ A^{-2}$

Exercícios do Capítulo I

1) Se a resistência de um condutor de cobre é de 60 Ω a 0° C, qual é a resistência desse mesmo condutor a 20° C, sabendo-se que para o cobre $\alpha = 0{,}004\ C^{-1}$ a 20° C?

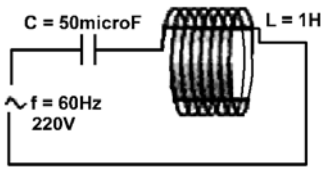
$R_{20} = 60*[1 + 0{,}004*(20 - 0)] = 64{,}8°\ C$

2) Qual a resistência de um condutor de cobre com seção transversal de 1,5 mm^2 com 500 m de extensão a 20° C?

$R_{15} = \rho * (L/S) = 0{,}0178\ (\Omega*\ mm^2/m) \times (500m/1{,}5\ mm^2) = 5{,}933\ \Omega$

$R_{20} = 5{,}933*\ [1 + 0{,}004*\ (20 - 15)] = 6{,}052\ \Omega$

3) Calcule a impedância do circuito da figura a seguir, admitindo-se que a freqüência da corrente alternada é de 60 Hz. Qual o valor dessa corrente?



$X_L = jw*L = j2*3{,}14*60*1{,}0 = j377\ \Omega$

$-X_C = -j[1/(w*C)] = -j1/(377*50*10-6) = -j53\ \Omega$

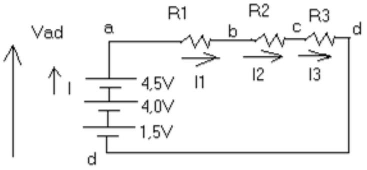
$Z = j377 - j53 = j324\ \Omega$

$|Z| = 324\ \Omega$

$I = V/|Z| = 220/324 = 0{,}68\ A$

4) Qual a resistência equivalente do circuito da figura a seguir?

Qual a corrente que a fonte em série da figura abaixo fornece ao circuito?



R1 = 20 Ω

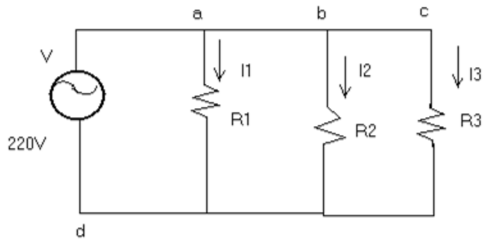
R2 = 30 Ω

R4 = 50 Ω

Re = 20 + 30 + 50 = 100 Ω

I = I1 = I2 = I3 = Vad/R = (1,5 + 4 + 4,5)/100 = 0,1 A

5) Qual a resistência equivalente do circuito da seguinte figura? Qual a intensidade da corrente total desse circuito?



R1 = 20 Ω

R2 = 20 Ω

R3 = 20 Ω

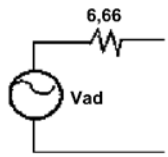
1/Re = 1/20 +1/20 +1/20 = 3/20; Re = 20/3 = 6,66 Ω

I1 = 220/20 = 11 A = I2 + I3

I = I1 + I2 + I3 = 33 A

Verificação:

Circuito equivalente:

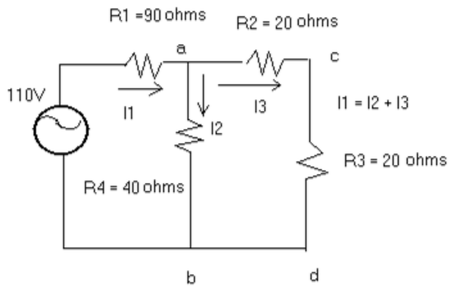


Vae = I*Re = 6,66*33 = 220 V. OK.

6) Qual a potência dissipada no circuito do exercício 5?

$P = P1 + P2 + P3 = I1^2*R1+ I2^2 *R2 + I3^2*R3 = 3*11^2 = 3*2420 = 7.620$ W

7) Qual a resistência equivalente do circuito da figura seguinte? Qual a corrente total do circuito (I1) e em cada braço do circuito?



Em primeiro lugar, vamos considerar a malha a,c,d,b.

R1 = 90 Ω

R2 = 40 Ω

R3 = 20 Ω

R4 = 20 Ω

R3 + R4 = 20 + 20 = 40 Ω

R3 + R4 está em paralelo com a resistência R2. Então a resistência equivalente de R2, R3 e R4 é:

1/Req1 = 1/40 +1/40 = 1/20, então Req1 = 20 Ω

R1 e Req estão em série. Daí Req = Req1 + R1 = 90 + 20 = 110 Ω

I1 = 110/110 = 1 A

A queda de tensão em R1 é 1*90 = 90 V

Vab = 110 - 90 = 20 V

I2 = 20/40 = 0,5

I1 = I2 + I3. Daí I3 = 1 - 0,5 = 0,5 V

A queda de tensão em R3 (Vac) é 0,5*20 = 10 V

Vab = Vac + Vcd; Vcd = 10 V

8) Aplique a segunda lei de Kirchhoff à malha "gerador,a,b" do circuito do exercício 7 para determinar o relacionamento entre I1 e I2.

I1*R1 +I2*R2 = 110

90*I1 + 40*I2 = 110

I1 = (11 - 4*I2)/9

9) Qual a potência transformada em calor na resistência R1 do exercício 7?

R1 = 90

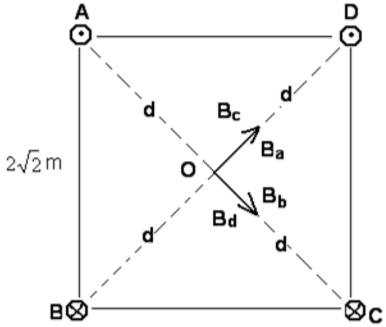
I1 =1

P = V*I = 90 W

10) Defina o que é freqüência.

A freqüência (f) de um corpo em movimento circular pode ser definida como o número de voltas que esse corpo consegue realizar por segundo. O conceito acima pode ser estendido para qualquer movimento repetitivo. Por exemplo, se uma mola sobe e desce 150 vezes por segundo, então a freqüência desse movimento será de 150 hertz.

11) Na figura abaixo, a, b, c e d são condutores retos, paralelos e extensos, e formam um quadrado. Cada condutor é percorrido por uma corrente de 10 A no sentido indicado. Sabendo-se que $\mu 0 = 4\pi.10^{-7}$ T.m/A, determine o vetor indução magnética resultante no ponto O eqüidistante dos três condutores.



A distância entre o ponto O e os pontos A, B, C, e D é:

$2d^2 = \left(2\sqrt{2}\right)^2 = 8$; d = 2 m.

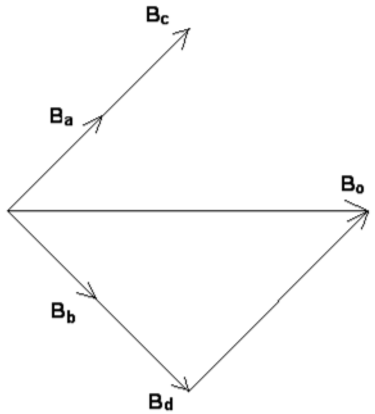
As correntes que passam pelos pontos A, B, C e D geram um campo magnético localizado no plano A, B, C, D, cuja direção é perpendicular a d, com sentido determinado através da regra da mão direita número 1.

Levando-se em consideração que $i_A = I_B = i_C = i_D$, a intensidade dos quatro vetores indução magnética são iguais e valem (calculado em relação à corrente i_A):

$$B_A = \frac{\mu_0}{2\pi} \cdot \frac{i_A}{d} = 10^{-6} = B_B = B_C = B_D \quad \text{(T)}$$

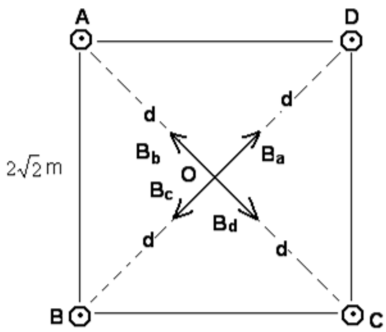
$$\vec{B}_O = \vec{B}_A + \vec{B}_B + \vec{B}_C + \vec{B}_D$$

A próxima figura mostra o esquema para o cálculo do vetor indução magnética no ponto O.



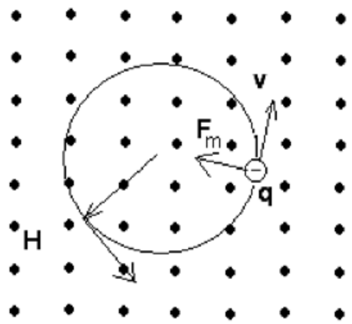
$$B_o^{\ 2} = (B_a + B)_c^{\ 2} + (B_b + B_d)^2 = 4.10^{-6} \quad \text{(T)}$$

12) Conside o mesmo exercício anterior, porém com os sentidos da correntes conforme mostra a figura abaixo. Qual o vetor campo magnético no ponto O?



Neste caso, o campo magnético em O é zero, pois $B_a + B_C = 0$, e $B_b + B_d = 0$.

13) Um elétron com energia cinética 20 eV (elétron-Volt) adentra perpendicularmente em um campo magnético uniforme com intensidade 10^{-5} T. Sabendo-se que o elétron possui carga $1{,}6.10^{-19}$ C e massa $9{,}1.10^{-31}$ kg e que 1eV = $1{,}6.10^{-19}$ J, calcule a energia cinética (Joules) do elétron dentro do campo magnético e descreva a trajetória desse elétron.



Se admitimos que o campo magnético uniforme possui direção perpendicular ao plano do papel e sentido conforme indicado na figura acima, a força magnética que atua no elétron possui direção perpendicular a v e B, sentido determinado de acordo com a regra da mão direita número 2 e intensidade $F_m = Bvq$. Nesse caso a força magnética atua como força centrípeta e o elétron possui movimento circular uniforme com raio R dentro do campo magnético.

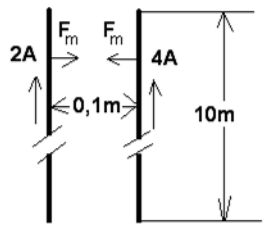
Como a energia cinética do elétron permanece constante dentro do campo magnético temos:

$E_c = 20.1{,}6.10^{-19} = 3{,}2.10^{-18}$ J.

Como $E_c = mv^2/2$, a velocidade do elétron é $(2E_c/m)^{1/2} = ((6{,}4/9{,}1).10^{13})^{1/2} \approx (7{,}03.10^{12})^{1/2} \approx 2{,}65.10^6$ m/s.

Por outro lado, como $F_m = ma_{cp} = m.v^2/R$, temos $Bvq = mv^2/R$. Então $R = mv/Bq = 1{,}507$ m.

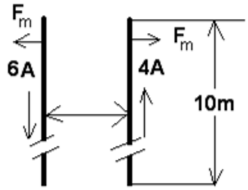
14) Dois condutores retos, extensos paralelos, distanciados 1m um do outro estão localizados no vácuo. Conforme indica a figura abaixo i_1 = 2A, e i_2 = 4A. Considerando-se primeiramente que i_1 e i_2 possuem o mesmo sentido, qual é a direção, sentido e intensidade da fôrça magnética agindo em cada metro dos condutores? Invertendo-se o sentido i_1 e triplicando-se a sua intensidade, qual é a direção, sentido e intensidade da fôrça magnética agindo em cada metro dos condutores?



$$Fm = \frac{\mu_0}{2.\pi} \cdot \frac{i_1.i_2}{r} l = \frac{4.\pi.10^{-7}}{2.\pi.0{,}1} \cdot \frac{2.4}{10} = 16.10^{-7}\text{N}$$

Obs: $\mu_0 = 4.\pi.10^{-7}$ T.m/A

A próxima figura mostra a nova situação, quando se inverte o sentido i_1.



$$Fm = \frac{\mu_0}{2.\pi} . \frac{i_1.i_2}{r} l = \frac{4.\pi.10^{-7}}{2.\pi.0,1} . \frac{6.4}{10} = 48.10^{-7} \text{ N}$$

15) Um resistor com resistência elétrica de 220 Ω está sob a ação de uma f.e.m. alternada com valor $e = e_{max} sen(wt)$. Ao admitirmos que e_{max} = 220 V e w = 2π.60 rad/s, $e_{EF} = \frac{e_{max}}{\sqrt{2}}$ qual a potência dissipada no resistor?

O valor da corrente eficaz é $i_{ef} = e_{EF}/R$. Portanto a potência média é:

$Pm = e_{EF}.i_{EF}=(e_{EF})^2/R$. Daí,

$$P_m = \frac{\left(\frac{e_{max}}{\sqrt{2}}\right)^2}{R} = \frac{(e_{max})^2}{2R} = 110W$$