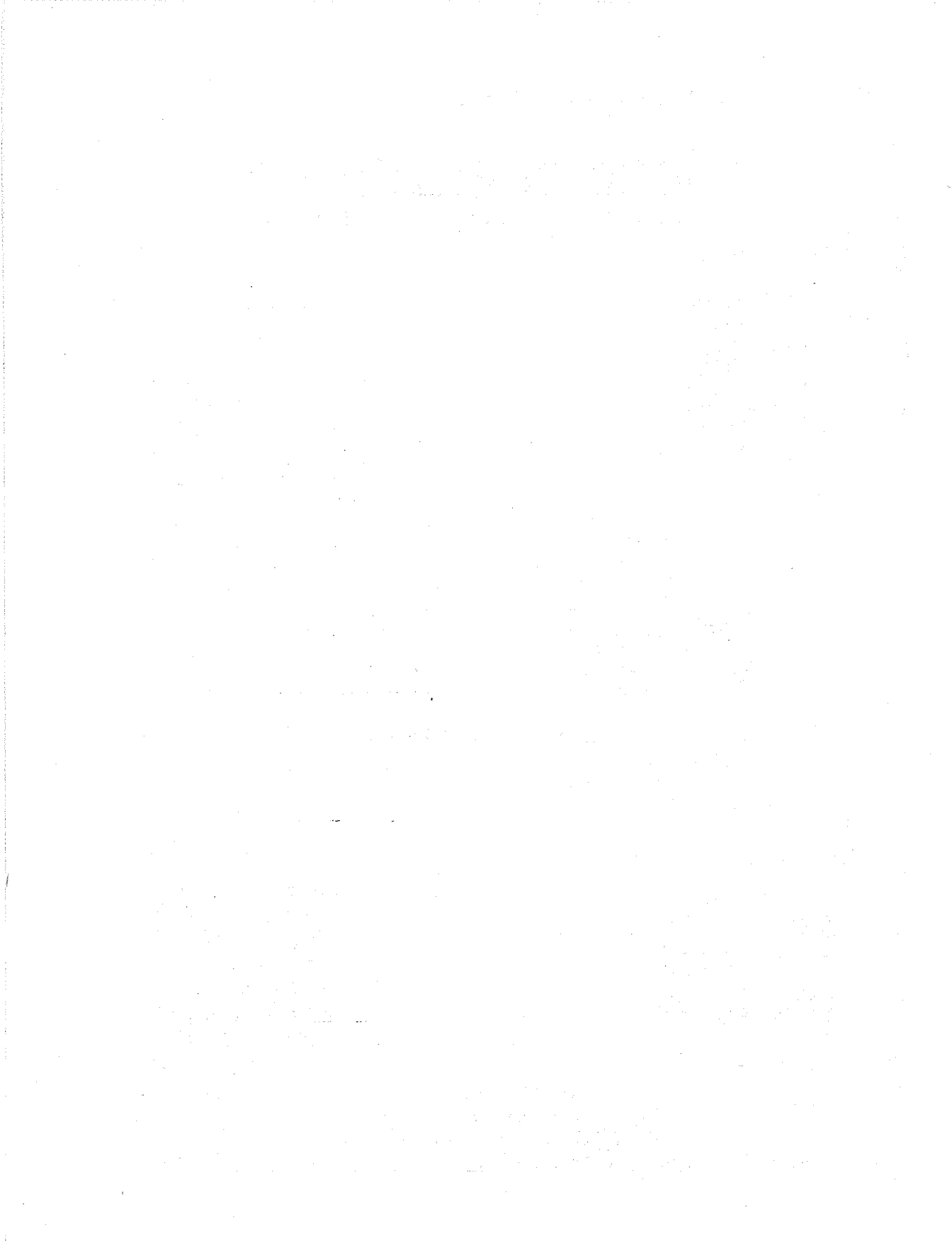


Electrotecnia

Teórica





Ficha técnica

















Título : Manual de Electrotecnia – Componente teórica

Curso : Curso de Formação em Electrónica e Comunicações

Autor : Paulo Peixoto

Data : Outubro - 2002

Listagem de Conteúdos

-  Noções matemáticas
-  História da Electricidade
-  Capítulo 1 - Estrutura da matéria
-  Capítulo 2 - Propriedades e características gerais dos materiais
-  Capítulo 3 - Electrostática
-  Capítulo 4 - Corrente Contínua
-  Capítulo 5 - Electroquímica
-  Capítulo 6 - Magnetismo e campo magnético
-  Capítulo 7 - Efeito magnético da corrente
-  Capítulo 8 - Electromagnetismo
-  Capítulo 9 - Circuitos magnéticos
-  Capítulo 10 - Corrente alternada
-  Capítulo 11 - Análise de circuitos em C.A.
-  Capítulo 12 - Potência e energia
-  Capítulo 13 - Transformador monofásico
-  Capítulo 14 - Introdução aos circuitos trifásicos

Introdução

No decurso desta disciplina iremos abordar noções fundamentais de electrotecnia /electrónica que, futuramente, serão úteis para novas disciplinas como é o caso de electrónica básica, electrónica analógica e electrónica digital.

Abordaremos, inicialmente, os temas a nível teóricos analisando leis, definições e deduções, partindo posteriormente para a componente prática, onde constataremos os conceitos adquiridos. No decorrer dos vários temas teremos ainda uma terceira componente, teórico-prática, onde resolveremos exercícios para uma melhor compreensão destes.

Este manual foi realizado com vista a ser uma fonte de informação na disciplina e, posteriormente como meio de consulta sempre que o quotidiano o exija. A principal preocupação foi por um lado, abordar cada tema de um modo simples e intuitivo, por outro não os simplificar demasiado, de forma a que as análises destes não sejam unicamente superficiais, fugindo á linha dos objectivos propostos. Este apertado caminho nem sempre foi fácil de alcançar. Einstein disse uma vez:

“ Façam as coisas tão simples quanto possível, mas não mais simples.”

Votos de um excelente sucesso!



Noções matemáticas

1. Notação científica

Em ciência é usual escrever números muito grandes ou muito pequenos, quer quando utilizamos determinadas constantes, quer quando efectuamos cálculos numéricos. Por este motivo, é útil e recomendável a utilização da notação científica.

REGRA

A forma padrão para a notação científica é :

$$a \times 10^n$$

onde **a** é um número maior ou igual a 1 e menor que 10, e **n** é um número inteiro.

Exemplos

Notação Standard	Notação científica
93 000 000	$9,3 \times 10^7$
384 000 000 000	$3,84 \times 10^{11}$
12 000 000	$1,2 \times 10^7$
0.000 0034	$3,4 \times 10^{-6}$
0.000 000 000 00234	$2,34 \times 10^{-12}$
0.000 000 0157	$1,57 \times 10^{-8}$

2. Múltiplos e submúltiplos

Em engenharia torna-se imprescindível a utilização dos múltiplos e dos submúltiplos das unidades utilizadas, assim teremos:

NOME	SÍMBOLO	FACTOR PELO QUAL A UNIDADE SÉ MULTIPLICADA
exa	E	$10^{18} = 1\ 000\ 000\ 000\ 000\ 000\ 000$
peta	P	$10^{15} = 1\ 000\ 000\ 000\ 000\ 000$
tera	T	$10^{12} = 1\ 000\ 000\ 000\ 000$
giga	G	$10^9 = 1\ 000\ 000\ 000$
mega	M	$10^6 = 1\ 000\ 000$
quilo	k	$10^3 = 1\ 000$
hecto	h	$10^2 = 100$
deca	da	10
deci	d	$10^{-1} = 0,1$
centi	c	$10^{-2} = 0,01$
mili	m	$10^{-3} = 0,001$
micro	μ	$10^{-6} = 0,000\ 001$
nano	n	$10^{-9} = 0,000\ 000\ 001$
Pico	p	$10^{-12} = 0,000\ 000\ 000\ 001$
femto	f	$10^{-15} = 0,000\ 000\ 000\ 000\ 001$
atto	a	$10^{-18} = 0,000\ 000\ 000\ 000\ 000\ 001$

Tabela 1 – Múltiplos e submúltiplos

Exemplos

$$\begin{aligned}
 1\text{ Km} &= 1000\text{ m} = 1 \times 10^3\text{ m} \\
 1\ \mu\text{m} &= 0.000\ 001\text{ m} = 1 \times 10^{-6}\text{ m} \\
 1\text{ mg} &= 0.001\text{ g} = 1 \times 10^{-3}\text{ g} \\
 33\text{ Kg} &= 33\ 000\text{ g} = 33 \times 10^3\text{ g} \\
 5\text{ nm} &= 0.000\ 000\ 005\text{ m} = 5 \times 10^{-9}\text{ m}
 \end{aligned}$$

3. Trigonometria

As razões trigonométricas ser-nos-ão úteis ao longo da disciplina, uma vez que, iremos ter necessidade de utilizar o seno e o cosseno de um ângulo para cálculo de grandezas electromagnéticas e eléctricas.

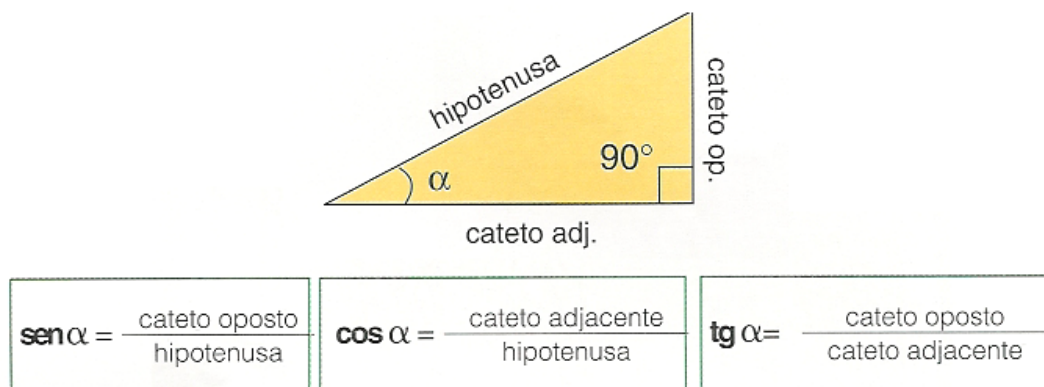


Figura 1 – Razões trigonométricas

Exemplos

No triângulo $\Delta [ABC]$ rectângulo em B, tem-se $\overline{AB} = 5$ cm, $\overline{BC} = 12$ cm e $\overline{AC} = 13$ cm.

Pretende-se calcular o $\text{sen } \hat{A}$, $\text{cos } \hat{A}$ e $\text{tg } \hat{C}$.

$$\text{sen } \hat{A} = \frac{\overline{BC}}{\overline{AC}} = \frac{12}{13} = 0,923$$

$$\text{cos } \hat{A} = \frac{\overline{AB}}{\overline{AC}} = \frac{5}{13} = 0,385$$

$$\text{tg } \hat{C} = \frac{\overline{AB}}{\overline{BC}} = \frac{5}{12} = 0,417$$

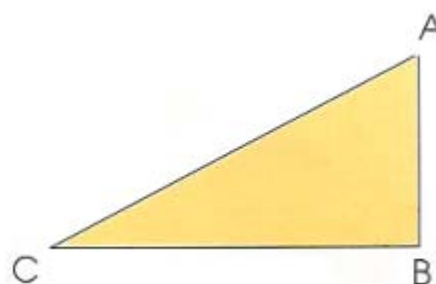


Figura 2 – Triângulo [ABC] rectângulo em B

4. Sistemas de equações

No desenrolar da disciplina iremos utilizar sistemas de equações para a determinação de grandezas eléctricas. Tomemos como exemplo o seguinte sistema de 3 equações com 3 incógnitas, I_1 , I_2 e I_3 .

$$\begin{cases} I_1 + I_3 = I_2 \\ 4.I_2 + 12 - 24 + 1.I_1 = 0 \\ 18 - 2.I_3 - 12 - 4.I_2 = 0 \end{cases}$$

Resolvendo o sistema, começamos por substituir I_2 na 2.^a e 3.^a equações pelo valor da 1.^a equação:

$$\begin{cases} I_2 = I_1 + I_3 \\ 4.(I_1 + I_3) - 12 + 1.I_1 = 0 \\ 6 - 2.I_3 - 4.(I_1 + I_3) = 0 \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} \text{---} \\ 5.I_1 + 4.I_3 = 12 \\ -4.I_1 - 6.I_3 = -6 \end{cases}$$

Utilizando o **método da adição**, multiplicamos ambos os termos da 2.^a equação por 4 e os da 3.^a equação por 5, teremos:

$$\begin{cases} \text{---} \\ 20.I_1 + 16.I_3 = 48 & (\times 4) \\ -20.I_1 - 30.I_3 = -30 & (\times 5) \\ \hline 0.I_1 - 14.I_3 = 18 \end{cases} \quad I_3 = -1,286$$

Substituindo o valor de I_3 na 3.^a equação, virá:

$$-4.I_1 - 6 \times (-1,286) = -6 \Rightarrow I_1 = \frac{-6 \times (-1,286) + 6}{4} \Rightarrow I_1 = 3,43$$

Finalmente, substituindo na 1.^a equação os valores de I_1 e I_3 :

$$I_2 = 3,43 + (-1,286) \Rightarrow I_2 = 2,14$$

As soluções s sistemas são :

$$\begin{cases} I_1 = 3,43 \\ I_2 = 2,14 \\ I_3 = -1,286 \end{cases}$$



História da electricidade



A história da electricidade foi marcada pela evolução técnica e pelos desenvolvimentos científicos, estendendo-se a variados campos da ciência e a inúmeras aplicações de ordem prática. Faremos aqui uma pequena abordagem a essa história, rica de acontecimentos e descobertas, desde os seus primórdios na antiguidade grega até ao princípio do século XX.

A palavra Electricidade provém do latim *electricus*, que significa literalmente “produzido pelo âmbar por fricção”. O filósofo, astrónomo e matemático grego Tales de Mileto (634 a.C. - 548 a.C.), ao esfregar um pedaço de âmbar numa pele de carneiro, observa que este atrai pedaços de palha, testemunhando uma manifestação de electricidade estática.



Figura 1 - O âmbar é uma resina fóssil, de uma espécie de pinheiro já desaparecida

Teofrasto de Ereso (séc. 3 a.C.), outro filósofo grego, descobre que diversos materiais diferentes dos utilizados por Tales de Mileto possuíam as mesmas características.

No início do primeiro milénio, Seneca Lucio Anneo (nasceu em Cordova, Itália, em 5 a.C., morreu em Roma em 65 d.C.), um escritor e filósofo latino distingue três tipos de raios, nomeadamente: "raios que incendeiam, os que destroem e o que não destroem".

Em 1600, William Gilbert dedica-se ao estudo destes fenómenos e verifica que outros corpos possuem a mesma propriedade do âmbar. Designa-os com o nome latino “*electricus*”. Mais tarde publica a obra que o irá imortalizar – “*De Magnete*”

A partir do século XVII, começam estudos para uma melhor percepção do fenómeno da electricidade, nomeadamente a electrificação por atrito demonstrada por uma máquina inventada por Otto von Guericke em 1672.

Os marcos na história da descoberta e controlo da electricidade começam por volta de 1729 com a descoberta por Stephen Gray da condução da electricidade, distinguindo entre condutores e isolantes eléctricos, bem como da indução electrostática.

Em 1733, Charles François de Cisternay du Fay e o padre Nollet distinguem duas espécies de electricidade (a vítrea e a resinosa) e enunciam o princípio da atracção e repulsão das cargas eléctricas.

Em Outubro de 1745, o holandês Ewald Georg von Kleist descobre que a electricidade é controlável e inventa a garrafa de Leiden (as primeiras experiências tomam lugar em Leiden, Holanda), a precursora do condensador. O condensador é descoberto independentemente por Ewald Georg von Kleist e por Pieter von Musschenbroek. O condensador consistia numa máquina com a capacidade para armazenar cargas eléctricas e era constituído por dois corpos condutores separados por um isolante fino.

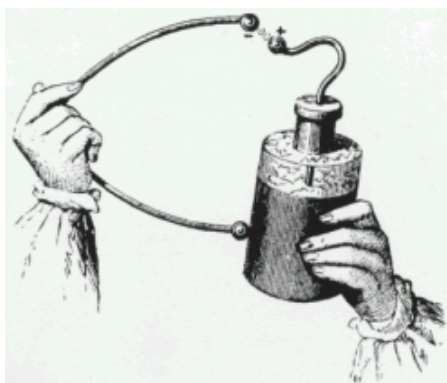


Figura 2 – A garrafa de Leiden

Em 1750, Benjamin Franklin descobre que os relâmpagos são o mesmo que descargas eléctricas e propõe a ideia de pára-raios que afastariam os raios das habitações, tornando estas mais seguras e menos sujeitas a fogos. Em 1752, Franklin apresenta os resultados da sua experiência com "papagaios de seda" à Royal Society.

Por influência de Franklin, um dos seus grandes apoiantes nas pesquisas sobre electricidade, Joseph Priestley publica em 1767 uma obra com o título 'The History and Present State of Electricity' onde faz uma compilação das teorias da época, que vai levá-lo a entrar para a Royal Society.

Charles Augustin de Coulomb publica em 1785, estudos sobre medição das forças de atracção e repulsão entre dois corpos electrizados (Lei de Coulomb), inventando aquilo que veio a ficar conhecido por balança de Coulomb.

Em 1788, James Watt constrói a primeira máquina a vapor, importante invento impulsionador da 1ª Revolução Industrial. Em sua honra, foi dado o seu nome à unidade de potência eléctrica - watt [W].

Em 1799, é fundado o Royal Institution of Great Britain que vem apoiar o campo de investigação da electricidade e magnetismo.

Nesse mesmo ano Alessandro Volta prova que a electricidade pode ser produzida utilizando metais com diferentes polaridades separados por uma solução salina. Volta utilizou discos de cobre e zinco separados por feltro embebido em ácido sulfúrico para produzir este efeito.

Alessandro Volta ajuda a explicar a experiência de Luigi Aloisio Galvani em 1786, colocando entre dois metais a perna de uma rã morta produzindo contracções nesta. Ao agregar estes discos uns por cima dos outros, Volta cria a primeira Pilha Eléctrica, a primeira forma controlada de electricidade contínua e estável. Em sua honra, foi dado o seu nome à unidade de medida de potencial eléctrico - volt [V].



Figura 3 – Pilha de Volta

Em 1802, Humphry Davy experimenta no campo da electrólise e separa o sódio e o potássio. Dez anos mais tarde, Joseph Baptiste Fourier apresenta a sua teoria sobre a condução do calor através de corpos sólidos.

Em 1815, a refacção da luz é explicada por Augustin-Jean Fresnel que estabelece também a teoria da luz polarizada.

Em 1819, Hans Christian Oersted detecta e investiga a relação entre a electricidade e o magnetismo (electromagnetismo).

André Marie Ampère desenvolve em 1820 o estudo e estabelece as leis do electromagnetismo. Em sua honra, foi atribuído o seu nome à unidade de medida de intensidade de corrente eléctrica - ampere [A].

Também em 1820, Pierre Simon Laplace, que desenvolveu uma importante actividade científica em variados domínios, formula o cálculo da força magnética. Neste mesmo ano, Jean Baptiste Biot enceta estudos que viriam a resultar na Lei de Biot-Savart sobre campos magnéticos.

Em 1827, Joseph Henry começa uma série de experiências electromagnéticas e descobre o conceito de indução eléctrica, construindo o primeiro motor eléctrico. No mesmo ano, Georg Simon Ohm, ao trabalhar no campo da corrente eléctrica desenvolveu a primeira teoria matemática da condução eléctrica nos circuitos. O trabalho não recebeu o merecido reconhecimento na sua época, tendo a famosa Lei de Ohm permanecido desconhecida até 1841, ano em que recebeu a medalha Copley da Royal Britannica. Em sua honra, o seu nome foi atribuído à unidade de resistência eléctrica - ohm [Ω].

George Green publica em 1828 a sua obra mais importante intitulada 'Experiência de aplicação da análise matemática à teoria da electricidade e ao magnetismo' que resultou de um estudo mais aprofundado do trabalho desenvolvido por Poisson.

Em 1831, Michael Faraday descobre o fenómeno da indução electromagnética, e explica ser necessária uma alteração no campo magnético para criar corrente pois a sua mera existência não é suficiente. Faraday descobre que a variação na intensidade de uma corrente eléctrica que percorre um circuito fechado, induz uma corrente numa bobine próxima. É também observada uma corrente induzida ao introduzir-se um ímã nessa bobine. Estes resultados tiveram uma rápida aplicação na geração de corrente eléctrica.

Em 1834, Karl Friederich Gauss, um dos mais notáveis matemáticos de todos os tempos, produz com o contributo de Wilhelm Eduard Weber e a partir de estudos matemáticos, o primeiro telégrafo electromagnético bem sucedido.

Antigo aluno e amigo pessoal de Laplace, Siméon-Denis Poisson publica em 1835 uma obra sobre termodinâmica onde expõe a sua teoria matemática do calor e na qual aparece pela primeira vez a integral que leva o seu nome.

Em 1838, Samuel Finley Breese Morse conclui o seu invento do telégrafo, que passou a ser adoptado industrialmente. Cinco anos mais tarde, James Prescott Joule determina o equivalente mecânico do calor expressando o seu convencimento de que sempre que se emprega uma força mecânica se obtém um equivalente exacto em calor.

Em 1852, Gabriel Stokes dá a primeira explicação sobre o fenómeno da fluorescência observando o efeito da luz ultravioleta sobre o quartzo.

William Thompson (Lord Kelvin), cujos estudos científicos foram influenciados por Joule, inventa em 1858 um instrumento destinado a medir pequenas correntes eléctricas, o galvanómetro. Havia também já apresentado anteriormente um trabalho sobre termodinâmica onde estabelecia o principio da dissipação da energia. No ano seguinte, Gustav Robert Kirchhoff realiza análises espectrais da luz que viriam a formar a base da interpretação do raio luminoso e da teoria quântica.

Em 1860, Antonio Pacinotti constrói a primeira máquina de corrente contínua com enrolamento fechado em anel e nove anos mais tarde Zénobe Gramme apresenta a sua máquina dínamo-eléctrico, aproveitando o enrolamento em anel.

Na Gare du Nord em Paris, é instalado em 1875 um gerador para abastecer as lâmpadas da estação. Foram fabricadas máquinas a vapor para movimentar os geradores, incentivando quer a invenção de turbinas a vapor quer a utilização de energia hidroeléctrica. A primeira central hidroeléctrica é instalada nas cataratas do Niagara em 1886.

A distribuição de electricidade é feita inicialmente em condutores de ferro, seguindo-se o cobre e posteriormente, em 1850, fios isolados por uma goma vulcanizada.

Em 1873, é realizada pela primeira vez a reversibilidade das máquinas eléctricas, através de duas máquinas Gramme a funcionar, uma como geradora e a outra como motora. Neste mesmo ano é publicado o Tratado sobre Electricidade e Magnetismo por James Clerk Maxwell.

Este tratado, juntamente com as experiências levadas a efeito por Heinrich Rudolph Hertz em 1885 sobre as propriedades das ondas electromagnéticas geradas por uma bobine de indução, demonstra que as ondas de rádio e luz são ambas ondas electromagnéticas, diferindo estas duas apenas na sua frequência.

Três anos mais tarde, em 1876, Alexandre Graham Bell patenteia o primeiro telefone com utilização prática.

Thomas Alvas Edison faz, em 1879, uma demonstração pública da sua lâmpada da incandescência, pondo fim à iluminação tradicional (por chama de azeite, gás, etc.), que foi rapidamente substituída pela de origem eléctrica.

No mesmo ano, Ernst Werner von Siemens põe a circular o primeiro comboio movido a energia eléctrica na exposição de Berlim.

Na década subsequente ensaiam-se os primeiros transportes de energia eléctrica em corrente contínua. Máquinas eléctricas como o alternador, o transformador e o motor assíncrono são desenvolvidas ao ser estabelecida a supremacia da corrente alterna sobre a corrente contínua.

É instalado o primeiro serviço público de carros eléctricos em Berlim em 1881 e construída a primeira rede de distribuição eléctrica em corrente contínua em Godalming, Inglaterra.

Por esta altura, ficou célebre uma polémica que viria a ser conhecida pela 'guerra das correntes', com Edison por um lado, a liderar os defensores da corrente contínua e Nikola Tesla, criador da corrente alterna, a defender as virtudes desta nova modalidade de corrente, contando para isso com o importante apoio de George Westinghouse.

Antigo aluno de Maxwell, John Henry Poynting estabelece em 1884 a equação que determina o valor do fluxo da energia electromagnética, conhecida por vector de Poynting.

Em 1887, Albert Abraham Michelson realiza com o seu colega Edward Williams Morley a denominada experiência Michelson-Morley para estudar o movimento da Terra através do éter, meio que se julgava necessário para a propagação da luz e que existiria no espaço, utilizando para isso um instrumento inventado por si, o interferómetro.

Em 1892, Charles Proteus Steinmetz descobriu a histerese magnética, que descreve a dissipação de energia ocorrida num sistema, quando submetido a uma força magnética alternada. Desenvolveu as teorias no âmbito da corrente alterna que tornaram possível a expansão da indústria nos Estados Unidos da América.

Um ano depois, George Francis Fitzgerald e Hendrik Antoon Lorentz ao estudarem os resultados da experiência de Michelson-Morley, descobrem as contracções de Lorentz-Fitzgerald, fenómeno que ocorre nos corpos em movimento à medida que estes são submetidos a um acréscimo de velocidade.

O russo Alexander Stepanovich Popov constrói em 1895, um aparelho que podia detectar ondas de rádio e ser utilizado como receptor de sinais, nascendo assim a primeira antena.

Ainda no mesmo ano, John William Strutt (Lord Rayleigh) descobre o gás Argon existente no ar na percentagem de 1% e que é utilizado no enchimento de lâmpadas eléctricas.

Em 1897, Joseph Jone Thompson descobre o electrão, partícula de carga negativa presente no átomo.

Guglielmo Marchese Marconi aproveita estas ideias para dez anos mais tarde utilizar ondas de rádio no seu telégrafo sem fio. Em 1901 é transmitida a primeira mensagem de rádio através do Oceano Atlântico .

Oliver Heaviside prevê em 1902, a existência de uma camada ionizada da atmosfera, também conhecida por ionosfera, que permitia a transmissão de sinais de rádio à volta do mundo e sem a qual, de outro modo se perderiam no espaço.

Albert Einstein, um dos mais célebres físicos da História, apresenta em 1905 a sua teoria especial da relatividade que abriria novos caminhos para o desenvolvimento da física.

Em 1907, Ernest Rutherford, Niels Bohr e James Chadwick estabelecem a actual definição de estrutura do átomo, até então considerada a mais pequena porção de matéria não divisível.



Capítulo 1 – Estrutura da matéria

1.1 Constituição do átomo

O modelo atómico proposto por Bohr no início do século, embora actualmente não seja considerado inteiramente é contudo útil para a visualização da estrutura atómica.

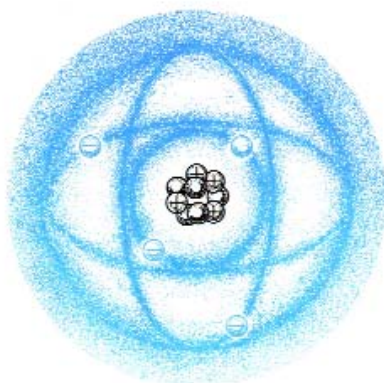


Figura 1.1 - O átomo e as suas partículas subatómica

Assim, Bohr considerou o átomo constituído por um **núcleo central** cuja carga eléctrica se convencionou **positiva**. Gravitando à volta desse núcleo, em orbitas definidas, existem partículas cuja carga eléctrica se considerou **negativa**, chamada **electrões**.

A massa do átomo encontra-se praticamente toda concentrada no núcleo; os electrões têm massa aproximadamente desprezável relativamente à massa do núcleo.

PARTÍCULA	SÍMBOLO	MASSA RELATIVA À UNIDADE DE MASSA ATÓMICA	CARGA (EM UNIDADES DE CARGA ELEMENTAR)	LOCALIZAÇÃO
protão	p	1,007276 \approx 1	+ 1	no núcleo
neutrão	n	1,008665 \approx 1	0	no núcleo
electrão	e-	0,00055 = $\frac{1}{1840}$	- 1	distribuídos pelos diferentes níveis de energia

Figura 1.2 - Características físicas das partículas fundamentais do átomo

O núcleo é essencialmente constituído por duas espécies de partículas: os **protões** cuja carga é **positiva** e os **neutrões** que são partículas **sem carga eléctrica**.

No **estado normal** o átomo é constituído por **igual número de protões e electrões** e como a carga eléctrica do protão é numericamente igual à do electrão (embora uma seja positiva e a outra negativa), resulta que no conjunto o átomo não tem carga eléctrica, isto é, é electricamente neutro. (O n.º de protões é indicado pelo n.º atómico do elemento.)

Um átomo em equilíbrio possui uma certa quantidade de energia, que é igual á soma das energias dos seus electrões. Os electrões, por sua vez, possuem **energias diferentes** chamadas de **níveis de energia**. Estes podem ser equiparados aos degraus de uma escadaria, desigualmente distanciados, sendo **dois degraus consecutivos cada vez mais próximos á medida que aumenta o nível de energia** e conseqüentemente a energia que lhes corresponde. Assim sendo:

- Ao 1º degrau corresponde o **nível de energia n=1**
- Ao 2º degrau corresponde o **nível de energia n=2**
- Ao 3º degrau corresponde o **nível de energia n=3**

e, assim sucessivamente.

Cada “degrau”, ou seja, cada nível de energia pode conter um n.º máximo de electrões que é dado pela fórmula :

$$2 n^2$$

onde **n** é o nível de energia.

NÍVEL DE ENERGIA n	N.º MÁXIMO DE ELECTRÕES 2n ²
1	2 × 1 ² = 2




Figura 1.3 - Níveis de energia e n.º máximo de electrões

Como dissemos atrás, os electrões encontram-se em orbitais ou níveis de energia bem definidos, ocupando sempre os níveis de mais baixa energia.

Podemos ver na figura seguinte, os vários níveis de energia e a distribuição dos electrões

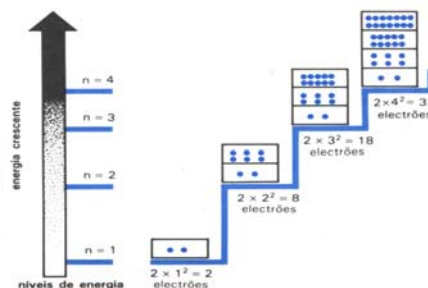


Figura 1.4 - Os níveis de energia e a distribuição dos electrões

1.2 Estado fundamental e estado excitado de um átomo

A medida que nos afastamos do núcleo os electrões ficam menos atraídos por este. Os **electrões** situados na **camada mais externa** são chamados de **electrões de valência**. Quando se aplica a certos materiais energia externa como calor, luz ou energia eléctrica, os electrões adquirem energia. Isto pode fazer com que estes se desloquem para um nível de energia mais alto.

Observemos um átomo de carbono de n.º atómico igual a 6 (Carbono (C)):

A sua distribuição electrónica (distribuição dos electrões pelos níveis de energia) é o seguinte:

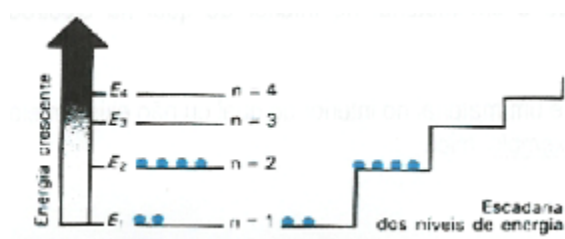


Figura 1.5 - Diagrama dos níveis de energia do átomo de carbono - estado fundamental

Nesta situação verificamos que o **número de prótons é igual ao número de electrões** e, além disso, que os electrões ocupam os **níveis de mais baixa energia**. Nestas circunstâncias dizemos que o átomo está no seu **estado fundamental**.

Se este átomo receber energia do exterior, um electrão do 2º nível possa transitar para um dos degraus superiores. Consoante a quantidade de energia recebida, assim ele conseguirá subir para o nível $n=3$, $n=4$,

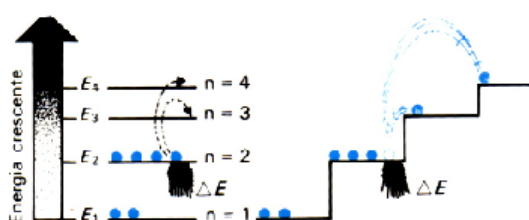


Figura 1.6 - Diagrama dos níveis de energia do átomo de carbono - estado excitado

1.3 Estado fundamental e estado excitado de um átomo

Contudo, se a **energia aplicada** ao átomo for **suficientemente grande**, alguns dos electrões de valência abandonarão o átomo. Estes electrões são chamados de **Electrões Livres**

É o movimento dos electrões livres que produz a corrente eléctrica num condutor metálico .

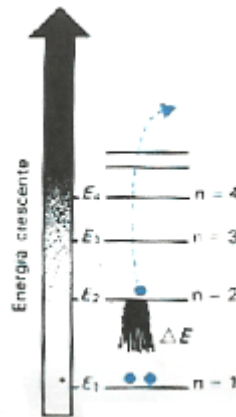


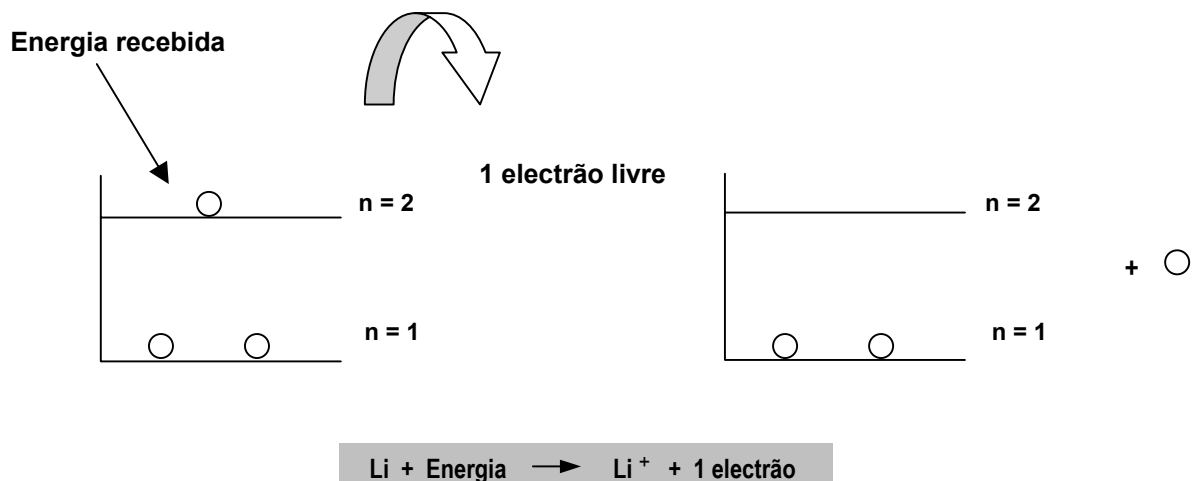
Figura 1.7- Diagrama da transição do electrão para fora do átomo – Electrão Livre

Os átomos ao perderem ou ganharem electrões transformam-se em iões, ora positivos se perdem electrões, ora negativos se ganham electrões.

A este processo dá-se o nome de ionização.

Exemplifiquemos:

Tomemos como primeiro exemplo o átomo de Lítio (Li) com número atómico igual a 3

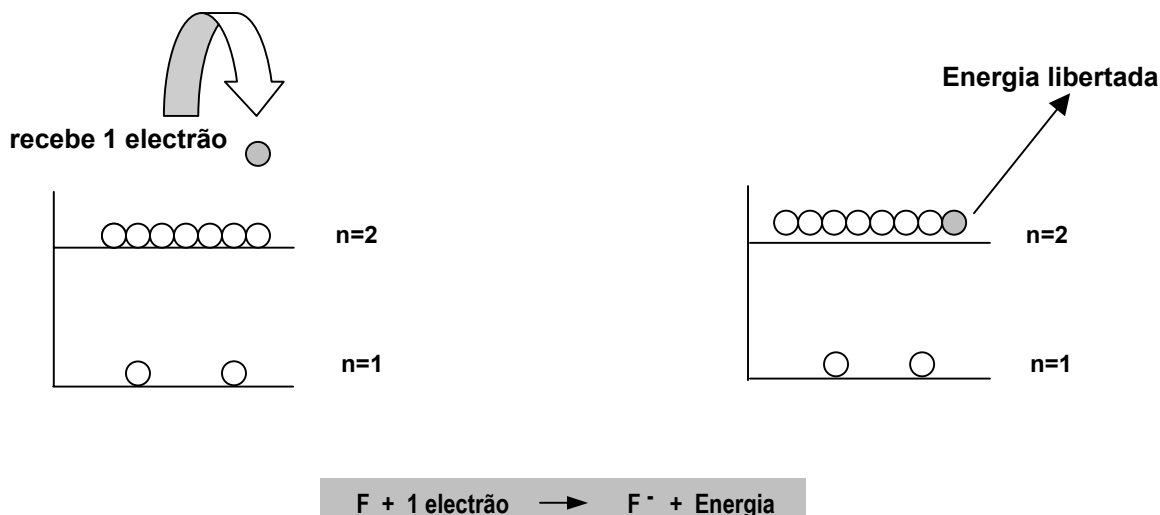


Se for aplicado uma energia suficiente o electrão do nível 2 “ saltará “ para fora do átomo transformando-se num electrão livre, o átomo transforma-se num ião positivo (Li^+), ficando assim mais estável.

O lítio é considerado um material condutor.

Se pelo contrário, os átomos ganham um ou mais electrões ficam com excesso de cargas negativas e ficam carregados negativamente. O átomo transformou-se num **ião Negativo**.

Vejam os o que se passa com o átomo de Flúor (F) com número atómico igual a 9



Neste caso é mais simples para o **átomo de flúor ganhar um electrão do que ceder 7**, tornando-se assim mais estável como ião negativo (F^{-}). Sendo assim não necessita de receber energia mas sim liberta-la.

Como não possui electrões livres podemos concluir que se trata de um material isolante.

Vamos agora, tirar uma conclusão do que acabamos de aprender:

Como vimos, qualquer material pode possuir no seu interior um determinado número de electrões livres. Esses electrões livres podem existir em grande quantidade ou serem em número reduzido, dependendo do tipo de material que constitui o material. Assim podemos definir dois tipos de corpos ou materiais:

- **Material condutor**, que é um material no interior do qual há electrões livres. **Exemplo:** prata, cobre, alumínio.
- **Material isolante**, que é um material no interior do qual ou não existem electrões livres ou existem em muito pequena quantidade. **Exemplo:** mica

1. O átomo de lítio tem um número atómico igual a 3. Descreva a sua configuração electrónica e indique o número de prótons e o número de electrões que constituem o átomo.

A distribuição electrónica do átomo de lítio será:

O número máximo de electrões em cada nível é dado pela expressão - $2 \cdot n^2$, assim teremos:

No nível $n=1$ podemos colocar electrões: $2 \times 1^2 = 2$ electrões

No nível $n=2$ podemos colocar $2 \times 2^2 = 8$ electrões

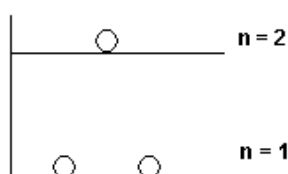


Figura 1.8 - Distribuição electrónica do lítio

Como o átomo é uma entidade neutra, o número de electrões é igual ao número de prótons. Por sua vez, o número de prótons é dado pelo número atómico. No presente caso temos:

N.º atómico = 3

- 3 prótons
- 3 electrões

2. Defina convenientemente ionização.

Ionização é o processo pelo qual os átomos recebem ou cedem electrões, transformando-se assim em iões negativos ou iões positivos, respectivamente.

1. Considere o átomo de flúor (F) com número atómico 9. A dada altura, a que chamaremos T_1 , a sua distribuição electrónica é a seguinte.

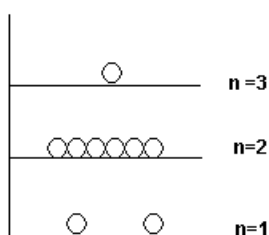


Figura 1.7 – Distribuição electrónica do flúor no instante T_1

- 1.1 O átomo está no estado fundamental, ou no estado excitado?
 - 1.2 Atendendo á resposta á questão anterior, descreva a distribuição electrónica que não se verifica nessa alínea.
 - 1.3 Se este átomo sofrer o processo de ionização em que tipo de ião se transformará? Justifique.
 - 1.4 Trata-se de um bom condutor ou um isolante? Justifique.
2. Considere o átomo de lítio (Li) de número atómico igual a 3.
- 2.1 Qual é a sua distribuição electrónica?
 - 2.2 Quantos prótons e electrões tem na sua constituição?
 - 2.3 Quantos electrões de valência tem o átomo?
 - 2.4 O que será necessário para que o (s) electrão (ões) de valência saiam do átomo?
3. Qual é o n.º máximo de electrões no nível de energia $n=3$?
4. Para o átomo de sódio (Na) com número atómico igual a 11, indique o n.º de electrões de valência e a sua distribuição electrónica.
5. Classifique as seguintes frases em verdadeiro e falso e, corrija convenientemente as falsas.
- a) Os electrões vão ocupando os diferentes níveis de energia, a partir do nível mais alto.
 - b) Esses níveis de energia estão desigualmente distanciados, sendo mais próximos os de mais baixa energia .
 - c) As partículas do átomo que apresentam carga eléctrica são neutrões de carga negativa e electrões de carga positiva .
 - d) Como o átomo é uma entidade neutra, o n.º de prótons é igual ao número de electrões.
 - e) Dado que os electrões são partículas subatómicas de massa desprezável quando comparados com os prótons e os neutrões, podemos dizer que a massa do átomo se encontra nas orbitas em volta do núcleo.
 - f) O número máximo de electrões por nível de energia é dado pela expressão $2 n^3$.



Capítulo 2 – Propriedades e características gerais dos materiais

2.1 Classificação geral dos materiais

A grande variedade de utilizações determina um total conhecimento das características dos materiais, e do seu comportamento em função do tempo.

Os materiais eléctricos dividem-se em:

- Materiais condutores (incluindo nestes os resistentes e bons condutores)
- Materiais isoladores
- Materiais semicondutores
- Materiais magnéticos

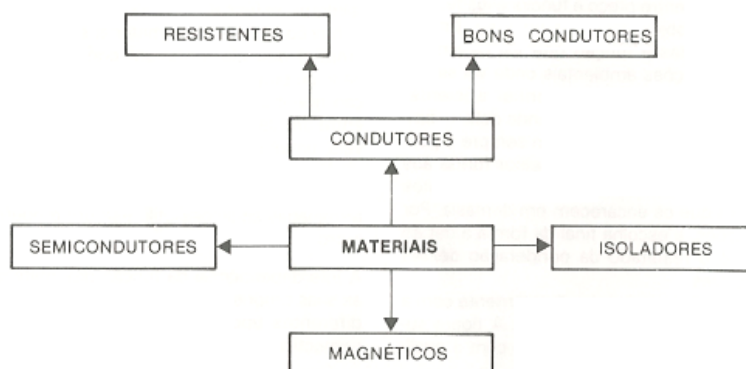


Figura 2.1 - Diagrama dos tipos de materiais eléctricos

Os materiais utilizados em electrotecnia encontram-se no estado sólido, líquido ou gasosos. Em qualquer dos estados encontramos materiais condutores e materiais isolantes.

No **estado sólido** temos, por exemplo, o cobre - material condutor; o vidro - material isolante.

No **estado líquido** podemos encontrar, por exemplo: o mercúrio - material condutor; óleo mineral - material isolante.

No **estado gasoso** encontramos, por exemplo: o ar húmido - material condutor; ar seco - material isolante.

Os **materiais condutores** são os que melhor conduzem a corrente eléctrica, ou seja, menor resistência oferecem à sua passagem. Os valores usuais para a resistividade estão entre :

$$\rho = 10^{-4} \text{ e } 10^2 \Omega \cdot \text{mm}^2 / \text{m}$$

Os **materiais isoladores** são aqueles que praticamente não conduzem a corrente eléctrica. Os valores usuais para a resistividade destes materiais estão entre:

$$\rho = 10^{14} \text{ e } 10^{26} \Omega \cdot \text{mm}^2 / \text{m}$$

Os **materiais semicondutores** apresentam uma condutividade intermédia entre a dos condutores e a dos isolantes. Os valores usuais da resistividade encontram-se entre:

$$\rho = 10^4 \text{ e } 10^{10} \Omega \cdot \text{mm}^2 / \text{m}$$

Os **materiais magnéticos**, embora também sejam algo condutores da corrente eléctrica, geralmente são estudados com outra finalidade, devido as suas propriedades magnéticas. Estes materiais, conforme veremos adiante, têm a propriedade de facilitarem o percurso das linhas de força do campo magnético.

2.2 Propriedades e grandezas gerais dos materiais

As propriedades e grandezas dos materiais dividem-se em: eléctricas, mecânicas e químicas. Veremos de seguida, algumas, das mais importantes, propriedades e grandezas gerais dos materiais

1. Maleabilidade

É a propriedade que os materiais têm de se deixar reduzir a chapas. Exemplo: ouro, prata.

2. Ductilidade

Propriedade dos materiais se deixarem reduzir a fios. Exemplo: ouro, prata, cobre, ferro.

3. Elasticidade

É a propriedade do material retornar à forma inicial, depois de cessar a acção que lhe provoca deformação. Exemplo: Mola.

4. Fusibilidade

Propriedade dos materiais passarem do estado sólido ao estado líquido por acção do calor. Tem interesse conhecer o ponto de fusão de cada material para sabermos quais as temperaturas máximas admissíveis na instalação onde o material está integrado.

5. Tenacidade

Propriedade dos materiais resistirem à tensão de ruptura, por torção ou compressão. A tensão de ruptura é expressa em Kg / mm². Exemplos de materiais tenazes: bronze silicioso, cobre duro.

6. Dureza

Propriedades dos materiais riscarem ou se deixarem riscar por outros. Exemplo de materiais duros: diamante, quartzo.

7. Dilatabilidade

Propriedade que certos corpos têm de aumentarem as suas dimensões sob a acção do calor.

8. Condutividade térmica

Propriedade que os materiais têm de conduzir com maior ou menor facilidade o calor. Normalmente, os bons condutores eléctricos também são bons condutores térmicos, o que pode ser uma vantagem ou uma desvantagem. Exemplo de bons condutores térmicos: prata, cobre.

9. Densidade

A densidade é a relação entre a massa de um corpo e a massa do mesmo volume de água. O resultado é adimensional.

$$\text{Densidade} = \frac{\text{Massa de um volume de um corpo}}{\text{Massa do mesmo volume de água}}$$

Exemplo de materiais condutores mais densos (pesados): mercúrio, prata

10. Permeabilidade magnética

Propriedade dos materiais conduzirem com maior ou menor facilidade as linhas de força do campo magnético. Exemplos: ferro-silício, aço, ferro-fundido.

11. Resistência á fadiga

Valor limite de esforço sobre um material, resultante de repetição de manobras. Cada manobra vai, progressivamente, provocando o “envelhecimento” das propriedades do material.

16. Resistência á corrosão

Propriedades dos materiais manterem as suas propriedades químicas, por acção de agentes exteriores (atmosféricos, químicos, etc.). Esta propriedade tem particular importância nos materiais expostos e enterrados (linhas, cabos ao ar livre ou enterrados, contactos eléctricos)

Os materiais combinam-se (uns mais, outros menos) com o oxigénio do ar, originando óxidos. Estes óxidos, em grande parte dos casos, acabam por destruir os materiais. A este fenómeno dá-se o nome de **corrosão**.

Quanto à oxidação, podemos dividir os materiais em dois grupos:

- **Cobre, prata, alumínio e zinco** – que se oxidam ligeiramente. Esta oxidação é responsável pela deficiência dos contactos eléctricos.
- **Ferro e aços** – onde é importante o fenómeno da corrosão. Esta oxidação dá origem á destruição completa da estrutura respectiva.

2.3 Grandezas características dos materiais eléctricos

1. Resistência

É a maior ou menor dificuldade que um corpo apresenta á passagem da corrente eléctrica. Representa-se por R e a sua unidade no S.I. é o Ohm (Ω).

2. Condutância

É a maior ou menor facilidade que o material oferece á passagem da corrente eléctrica. Representa-se por G e a sua unidade no Sistema Internacional (S.I.) é o Siemens (S).

3. Resistividade

Grandeza relacionada com a constituição do material. Define-se como sendo a resistência eléctrica de um material com 1 metro de comprimento e 1 milímetro quadrado de secção. Exprime-se em $\Omega \cdot \text{mm}^2 / \text{m}$ ou em $\Omega \cdot \text{m}$.

Ao inverso da resistividade chama-se condutividade.

4. Coeficiente de temperatura

Grandeza que permite determinar a variação da resistência em função da temperatura. Representa-se por α e expressa a variação numa resistência de 1 Ohm quando a temperatura varia de 1°C.

5. Rigidez dielétrica

É a tensão máxima, por unidade de comprimento, que se pode aplicar aos isolantes sem danificar as suas características isolantes. Expressa em KV / mm. O material com melhor rigidez dielétrica é a mica.

2.4 Principais materiais condutores

Os principais materiais eléctricos utilizados para o fabrico de condutores são o cobre, o alumínio e a prata. Além destes materiais existem ainda ligas condutoras e resistentes com variadíssimas aplicações, como por exemplo: bronze, latão e o almelec - ligas condutoras; constantan, mailhehort, manganina, ferro - níquel e o cromo - níquel - ligas resistentes.

A tabela 2.1 resume, para cada um dos principais materiais, as principais propriedades e as aplicações mais usuais.

CONDUTORES E LIGAS CONDUTORAS	COMPOSIÇÃO	RESISTIVIDADE $\Omega \cdot \text{mm}^2 / \text{m}$ ($t = 20^\circ\text{C}$)	COEF. TEMPERATURA $^\circ\text{C}^{-1}$ ($t = 20^\circ\text{C}$)	DENSIDADE ($t = 20^\circ\text{C}$)	TEMP. FUSÃO ($^\circ\text{C}$)	APLICAÇÕES
Cobre macio	cobre	0,0172	0,00393	8,89	1080	Condutores, contactos
Cobre duro	cobre + (estanho ou silício)	0,0179	0,0039	8,89	1080	Linhas aéreas
Alumínio	alumínio	0,0282	0,0040	2,70	657	Cabos e linhas aéreas
Prata	prata	0,016	0,0036	10,50	960	Contactos, fusíveis
Bronze silicioso	cobre + estanho + zinco + silício	0,025	0,002	8,90	900	Linhas aéreas
Latão	cobre+zinco	0,085	0,001	8,40	640	Contactos, terminais
Almelec	alumínio+ silício + magnésio	0,0323	0,0036	2,70	660	Cabos, linhas aéreas
Mercúrio	mercúrio	0,962	0,0009	13,60	- 39	Contactos, interruptores

Tabela 2.1 – Materiais condutores e ligas condutoras

Por análise dos materiais existentes na tabela, podemos tirar, entre outras, as seguintes conclusões:

- O condutor mais leve é o alumínio.
- A prata é o melhor condutor.
- O material condutor com ponto de fusão mais elevado é o cobre.
- O condutor com menor coeficiente de temperatura é o mercúrio, seguido do latão.

Analisemos agora, os materiais e ligas resistentes. A tabela 2.2 resume, para cada um dos principais materiais, as principais propriedades e as aplicações mais usuais.

MATERIAIS RESISTENTES E LIGAS RESISTENTES	COMPOSIÇÃO	RESISTIVIDADE $\Omega \cdot \text{mm}^2 / \text{m}$ (t = 20°C)	COEF. TEMPERATURA $^{\circ} \text{C}^{-1}$ (t = 20 °C)	DENSIDADE (t = 20°C)	TEMP. FUSÃO ($^{\circ} \text{C}$)	APLICAÇÕES
Mailhehort	cobre + zinco + níquel	0,30	0,0003	8,5	1290	Reóstatos
Constantan	cobre + níquel	0,49	0,0002	8,4	1240	Resistência padrão
Manganina	cobre + níquel + manganês	0,42	$\approx 0,00002$	8,15	910	Resistências de precisão
Ferro - níquel	ferro + níquel + crómio	1,02	0,0009	8,05	1500	Resistências de aquecimento
Níquel - crómio	níquel + crómio	1,04	0,00004	8	1475	Resistências de aquecimento
Grafite	carvão	0,5 a 4	- 0,0004	2,25		Resistências para electrónica

Tabela 2.2 – Materiais resistentes e ligas resistentes

Após análise da tabela, podemos concluir o seguinte:

- As ligas resistentes têm todas resistividade elevada.
- A liga resistente com maior ponto de fusão é o ferro - níquel (daí a sua utilização em aquecimento).
- A manganina tem um coeficiente de temperatura praticamente nulo.
- O carvão tem coeficiente de temperatura negativo.

Embora nas tabelas não estejam indicadas todas as propriedades de cada material, no entanto podemos compreender, as razões por que cada um deles tem as aplicações indicadas.

Algumas das propriedades em falta foram referidas anteriormente, como sejam: a corrosão, factor importante na escolha do material para a função e local a instalar; a maleabilidade e a ductilidade, que determinam quais os materiais que se podem transformar em chapas ou reduzir a fios.

Outras propriedades dos condutores são de salientar:

- O ouro e a prata são os metais mais dúcteis e maleáveis, o que lhes permite facilmente serem reduzidos a fios e chapas, são no entanto caros.
- O alumínio em contacto com o ar cobre-se de uma camada de óxido, chamado alumina, que o protege contra a corrosão.
- O cobre também fica revestido por um óxido, chamado azebre, que o protege contra a acção dos agentes atmosféricos.

Relativamente aos materiais resistentes são de salientar as seguintes características:

- Grande resistividade
- Temperatura de funcionamento elevada
- Baixo coeficiente de temperatura

2.5 Principais materiais isolantes

Os materiais isolantes existem nos circuitos eléctricos sob diversas formas e têm finalidades variadas, desde proteger pessoas, evitar curtos - circuitos nas instalações, evitar fugas de corrente, etc.

Podem ser subdivididos em sólidos (exemplo: vidro, mica), líquidos (exemplo: óleo mineral, verniz) e gasosos (exemplo: ar, azoto).

Os materiais sólidos e líquidos utilizados para o fabrico de isolantes provém de 3 origens: isolantes **minerais**, isolantes **orgânicos** e isolantes **plásticos**.

Com a utilização estes tipos de materiais, como quaisquer materiais, envelhecem. Os factores principais que contribuem para este envelhecimento são:

- Temperatura
- Campo eléctrico
- Esforços mecânicos
- Humidade
- Agentes atmosféricos
- Agentes químicos

As principais propriedades dos materiais isolantes são indicadas a seguir:

- Resistividade eléctrica
- Rigidez dieléctrica
- Estabilidade térmica
- Temperatura máxima de utilização
- Factor de perdas
- Versatilidade

Para cada aplicação será escolhido o material que melhores condições reúna, de acordo com as exigências da função. Na tabela 2.3 (página seguinte) estão resumidas algumas propriedades e aplicações dos principais materiais isolantes.

Pela sua análise, podemos salientar as seguintes conclusões:

- A mica é considerada o material com maior tensão de ruptura.
- O quartzo é o material com maior resistividade eléctrica.
- A mica é o material que apresenta melhor estabilidade térmica.
- O vidro tem uma grande resistência mecânica.
- O papel seco é bom isolante, barato, mas higroscópico (é atacado pela humidade).
- O policloreto de vinilo não é inflamável.
- A porcelana tem a desvantagem de ser porosa (deixa-se infiltrar pela humidade).
- Os materiais orgânicos e os plásticos têm, em relação aos minerais, a grande vantagem de serem mais flexíveis no seu tratamento e na sua utilização.
- Os isolantes gasosos, como o ar, são baratos.

	MATERIAL	RESISTIVIDADE MΩ.cm (t= 20°C)	RIGIDEZ DIELÉCTRICA KV / mm	TEMP.MÁX. UTILIZAÇÃO (° C)	PROPRIEDADES	APLICAÇÕES
MINERAIS	Mica	10^7	100-200	500-600	Suporta temperaturas e tensões muito elevadas	Suporte para resistências de aquecimento, isolante da lâminas do colector das máquinas eléctricas.
	Porcelana	$> 10^5$	35	-	Estável ao longo do tempo, porosa, recoberta de esmalte torna-se impermeável.	Base para terminais, isoladores para linhas.
	Vidro	$> 10^6$	10-40	200-250	Grande resistência mecânica.	Tubos para lâmpadas fluorescentes e incandescentes.
	Quartzo	$> 10^{18}$	20-30	-	Suporta temperaturas elevadas.	Lâmpadas de vapor de mercúrio.
	Óleos	10^7-10^8	10-25	60-200	Devem ser isentos de impurezas. Incombustíveis.	Refrigeração dos transformadores de alta potência
	Amianto	10^9	3	200-250	Resiste a temperaturas elevadas.	Isolante de condutores, apoios para resistências.
	Outros	Fibrocimento, mármore.				
ORGÂNICOS	Borracha natural	10^8	20-30	-	Elástica, resistente, muito sensível a agentes exteriores.	Isolador de condutores, luvas, tapetes isoladores.
	Algodão	10^3	5-10	-	Muito flexível.	Fios e fitas para cobrir condutores e bobinas de máquinas eléctricas.
	Papel impregnado	10^8	7-8	100	Barato, higroscópico.	Isolante dos cabos subterrâneos.
	Outros	Ebonite, verniz, cartão, madeira.				
PLÁSTICOS	Polietileno	10^{18}	40	60-80	Resistente à acção solar e dos ácidos. Grande resistividade.	Suporte de enrolamentos, caixas para TV e rádio, isolamento de condutores.
	Policloreto de vinilo	10^2-10^5	30-50	170-105	Não é inflamável. Resistente às acções químicas.	Isolamento de condutores, fabrico de tubos.
	Poliestireno	10^{10}	55	80-90	Resina sintética, facilmente moldável.	Fabrico de placas e caixas com alto poder isolante.
	Resina epóxi (araldite)	10^9-10^{10}	20-45	80-120	Pode ser facilmente moldada, produzindo diversos aparelhos e peças.	Pára - raios , caixa para cabos.
	Resina fenólica (baquelite)	$> 10^{12}$	10-20	120	Inalterável aos agentes exteriores. Grande resistividade.	Fabricação de peças para aparelhagem eléctrica.
GASOSOS	Ar	10^8	3	Sem limite	Barato. Humidifica com facilidade.	Como isolante natural na extinção do arco eléctrico em aparelhagem de protecção.
	Outros	Azoto e hexafluoreto de enxofre.				

Tabela 2.3 – Materiais resistentes e ligas resistentes

1. Como podem ser classificados os materiais utilizados na indústria eléctrica.

Os materiais utilizados na indústria eléctrica podem ser classificados em: materiais condutores (onde se encontram os bons condutores e os resistentes), materiais isolantes, materiais semi - condutores e materiais magnéticos.

2. Defina maleabilidade e ductilidade.

Maleabilidade é a propriedade que os materiais têm de se deixar reduzir a chapas. A ductilidade é propriedade dos materiais se deixarem reduzir a fios. Como exemplos temos o ouro e a prata que são os metais mais dúcteis e maleáveis, o que lhes permite facilmente serem reduzidos a fios e chapas.

3. Explique o significado da seguinte afirmação :“O Coeficiente de temperatura do alumínio é $0.004 \text{ }^\circ \text{C}^{-1}$ ”.

Esta afirmação significa que uma resistência de $1 \text{ } \Omega$ de alumínio varia $0,004 \text{ } \Omega$ quando a temperatura varia 1°C .

EXERCÍCIOS DE APLICAÇÃO - PROPRIEDADES E CARACTERÍSTICAS GERAIS DOS MATERIAIS

1. Descreva, sucintamente, a diferença entre condutância e resistência eléctrica e, refira qual a unidade, no sistema internacional (S.I.), em que cada uma se expressa.
2. Os materiais resistentes são caracterizados pelo seu muito baixo coeficiente de temperatura. Defina coeficiente de temperatura.
3. Comente a seguinte afirmação: “ O cobre é tenaz, dúctil e maleável. ”.
4. Classifique as seguintes frases em verdadeiro e falso e, corrija convenientemente as falsas.
 - a) A ductilidade é a propriedade dos materiais se deixarem reduzir a fios.
 - b) Os materiais resistentes são seleccionados pela sua baixa resistividade.
 - c) Os óleos minerais são utilizados para refrigeração dos enrolamentos dos transformadores de baixa potência.
 - d) Duas propriedades dos materiais resistentes são a sua grande resistividade e o seu baixo coeficiente de temperatura
 - e) A fusibilidade é a propriedade de certos materiais passarem do estado sólido ao estado líquido por acção do calor.



Capítulo 3 – Electrostática

1.1 Fenómeno da electrização

É conhecida de todos a experiência que consiste em esfregar um objecto, como uma caneta, num pedaço de lã e constatar que esse objecto irá atrair pedaços de papel. Outros materiais como o vidro, a parafina, a ebonite, etc., também se electrizam por atrito.

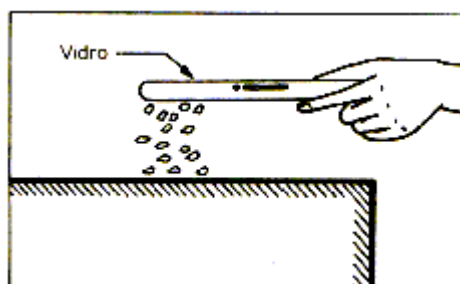


Figura 3.1 – Electrização por atrito

No entanto, os materiais que habitualmente conhecemos como condutores, comportam-se de forma diferente. Mas se isolarmos a barra de cobre, já iremos obter o mesmo resultado que o obtido com o vidro ou outro material considerado como isolador.

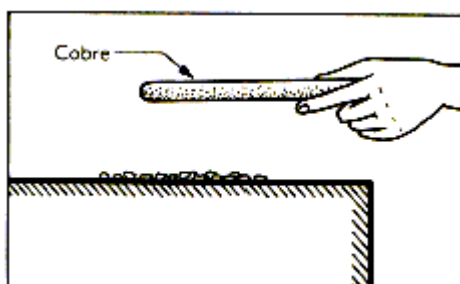


Figura 3.2 – O cobre não se electriza por atrito

Vejamos agora outra experiência. Suspendamos uma pequena **barra de vidro** através de um fio isolante. Electrizemos uma **outra barra de vidro** e aproximemos as duas até se verificar um breve contacto. Após esse contacto iremos constatar que as **barras se repelem**. Da mesma forma, se repetirmos a experiência com **duas barras de ebonite** (isolante orgânico natural), verificamos exactamente o **mesmo efeito**.

Finalmente, se electrizarmos **uma barra de vidro** e aproximarmos de uma barra também electrizada mas **de ebonite**, as duas barras vão **atrair-se**.

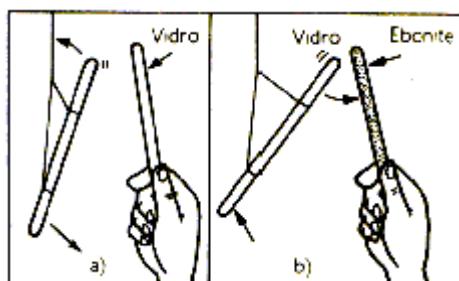


Figura 3.3 - Forças repulsivas e atractivas

3.2 Forças eléctricas

Pelas experiências atrás descritas podemos constatar que há dois tipos de carga:

- Carga positiva
- Carga negativa

Dois corpos com carga eléctrica do mesmo sinal, repelem-se;

Dois corpos com carga eléctrica de sinais contrários atraem-se.

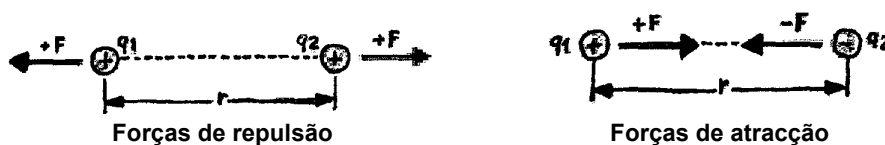


Figura 3.4 – Forças de atracção e atracção

Por outro lado, diremos que uma carga exerce sobre uma outra carga uma **Força Eléctrica**, que será repulsiva ou atractiva. Designa-se por \vec{F}_e , e a sua unidade S.I. é o **Newton (N)**.

Este tipo de forças ocorrem entre corpos electrizados, pelo facto de possuírem carga eléctrica.

- Um corpo está electrizado se atrair corpos leves;
- Um corpo pode electrizar-se por fricção, contacto ou influência;
- Quando um corpo está electrizado possui carga eléctrica;
- A carga eléctrica surge devido ao desequilíbrio entre o numero de electrões e o numero de prótons na constituição do corpo.

3.3 Campo eléctrico

Qualquer **corpo eletrizado** exerce sobre toda a **carga eléctrica** que se encontra na sua vizinhança uma **força**. Vamos designar por **Campo Eléctrico** a região no espaço na qual a carga eléctrica exerce essa acção.

- **Campo eléctrico uniforme** – Se numa determinada região do espaço existir um campo eléctrico cuja direcção, sentido e intensidade se mantenham em todos os pontos onde esse campo se faz sentir.
- **Campo eléctrico não uniforme** - Se o campo eléctrico varia com o ponto onde está a ser calculado.

O **Campo Eléctrico** é uma grandeza vectorial que se designa por \vec{E} , e a sua unidade S.I. é o **Newton / Coulomb** (N/C).

$$\vec{E} = \frac{\vec{F}_e}{q} \quad (\text{N/C})$$

onde:

\vec{E} - Intensidade do campo eléctrico - (**N/C**)

\vec{F}_e - Força eléctrica - Unidade S.I. - **Newton (N)**

q - Carga eléctrica - Unidade S.I. - **Coulomb (C)**

A direcção, e o sentido do campo eléctrico (\vec{E}) num determinado ponto serão, por definição, as mesmas da força eléctrica (\vec{F}_e), se considerarmos a carga de prova positiva.

3.4 Linhas de força do campo eléctrico

Podem ser vistas como um mapa que fornece informação qualitativa (e mesmo quantitativa) sobre a direcção e intensidade do campo eléctrico, em diferentes pontos do espaço.

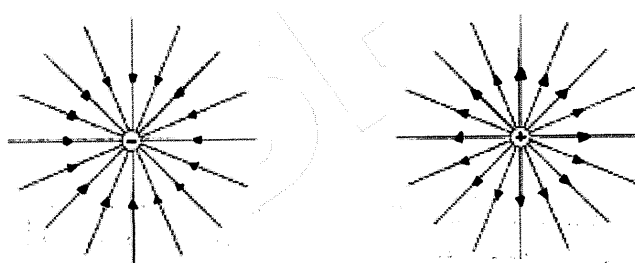


Figura 3.5 – Linhas de força

Propriedades das linhas de força do campo eléctrico

- Começam sempre em cargas positivas e terminam em cargas negativas.
- O número de linhas com origem (ou fim) numa carga é proporcional à magnitude da carga.
- A intensidade do campo é proporcional à densidade de linhas de força.
- As linhas de força nunca se cruzam.

Linhas de força num Campo eléctrico uniforme

Obtemos um **campo eléctrico uniforme** se colocarmos, **paralelamente duas placas** electrizadas com carga eléctrica de sinais contrários. As **linhas de forças dirigem-se do (+) para o (-)** e são paralelas entre si.

Entre as placas, excepto nas externas, o vector \vec{E} dirigido da placa positiva para a negativa, tem, em todos os pontos o mesmo módulo, direcção, sentido.

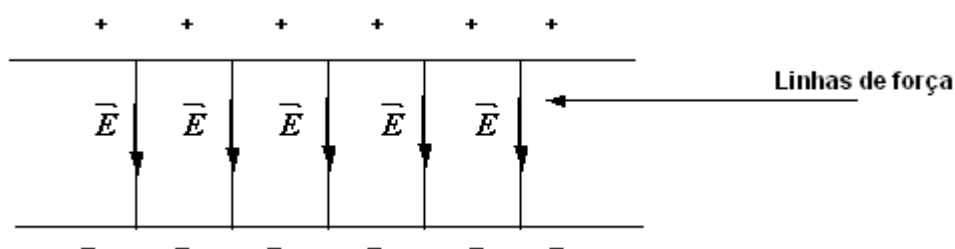


Figura 3.6 – Campo eléctrico uniforme

Linhas de força num Campo eléctrico não uniforme

As linhas de força do campo eléctrico não são sempre rectas, como no caso anterior. São frequentemente curvas, como no caso dos **dipolos eléctricos**. Estes são formados por duas cargas pontuais separados, com a mesma magnitude mas de sinal contrário.

O campo eléctrico é mais intenso na região entre as cargas e na proximidade das cargas.

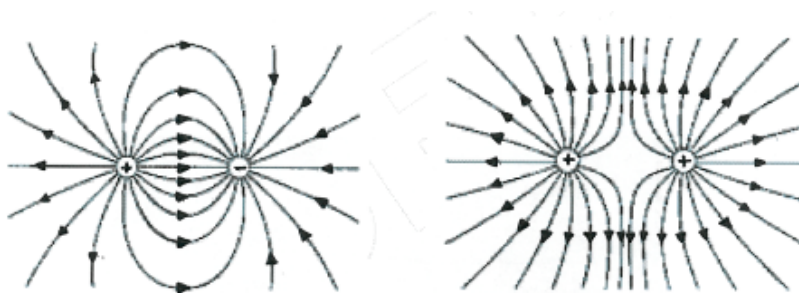


Figura 3.7 – Campo eléctrico não uniforme

3.5 Lei de Coulomb

Coulomb mediu, no ano de 1784, as forças de atracção ou repulsão que se exercem entre dois corpos electrizados, em função da distância a que encontram.

A força eléctrica de atracção ou repulsão que se exerce entre duas cargas eléctricas localizadas a uma distância d , é inversamente proporcional ao quadrado da distância dos dois pontos. Essa força tem a direcção da recta que une os dois pontos

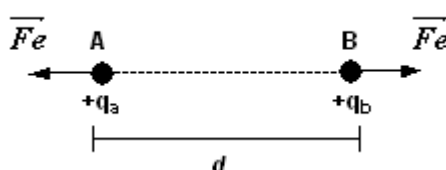


Figura 3.8 - Lei de Coulomb

Coulomb traduziu esta definição por a seguinte expressão:

$$\vec{F} = K \cdot \frac{|q_a| |q_b|}{d^2} \quad (\text{N})$$

em que:

- \vec{F} - Força que se exerce entre as duas cargas colocadas á distância d - (N)
- $|q_a|, |q_b|$ - Módulo das cargas eléctricas que criam a interacção - (C)
- K - Constante que depende do meio onde se encontram as cargas - Unidade S.I. - (Nm^2C^{-2})
No caso da interacção se dar no vazio toma o valor: $K_{\text{vazio}} = 9 \times 10^9 \text{ Nm}^2\text{C}^{-2}$
- d - Distância entre as cargas q_a e q_b - Unidade no S.I. - **Metro (m)**

3.6 Diferença de potencial

Energia Potencial

Quando uma carga Q é colocada sob a acção de um campo eléctrico, fica sujeito a uma força capaz de a deslocar. Poderemos então dizer que, o campo eléctrico possui uma dada **energia potencial** que é capaz de **realizar trabalho**.

Variacão da energia potencial

Corresponde ao trabalho realizado pelas forças do campo eléctrico para deslocar uma carga, de um ponto A para um ponto B, a velocidade constante.

$$W_{AB} = E_{\text{pot}(A)} - E_{\text{pot}(B)} \quad (\text{Joule (J)})$$

Relação entre o trabalho e a diferença de potencial

Á **variação da energia potencial entre dois pontos** do campo eléctrico, por **unidade de carga**, quando esta é deslocada pelas forças do campo, dá-se o nome de **diferença de potencial**.

A diferença de potencial entre os pontos A e B é dado por:

$$\Delta U = U_{AB} = \frac{E_{\text{pot(A)}} - E_{\text{pot(B)}}}{q} = \frac{W_{AB}}{q} \quad (\text{J/C}) = \text{Volt (V)}$$

A diferença de potencial (abreviadamente d.d.p.) ou tensão representa-se por U. Exprime-se em Volt (V).

O aparelho utilizado para medir a d.d.p. é o voltímetro.

Múltiplo/ Submúltiplo	Símbolo	Valor
MegaVolt	MV	10^6
KiloVolt	KV	10^3
miliVolt	mV	10^{-3}

Tabela 3.1- Múltiplos e submúltiplos

EXERCICIOS RESOLVIDOS

Dados: $K_{\text{vazio}} = 9,0 \times 10^{+9} \text{ N.m}^2.\text{C}^{-2}$

1. O corpo Q eletrizado positivamente, produz num ponto P o campo eléctrico \vec{E} , de intensidade $2,0 \times 10^5 \text{ N/C}$. Calcule a intensidade da força eléctrica produzida numa carga pontual positiva q de valor $4,0 \times 10^{-6} \text{ C}$ colocada em P.

$$\begin{aligned} \vec{E} &= 2,0 \times 10^5 \text{ N/C} \quad 0,8 \text{ N} \\ q &= 4,0 \times 10^{-6} \text{ C} \\ \vec{F}_e &= ? \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \vec{E} &= \frac{\vec{F}_e}{q} \Rightarrow \vec{F}_e = \vec{E} \cdot q \\ \Rightarrow \vec{F}_e &= 2,0 \times 10^5 \cdot 4,0 \times 10^{-6} \\ \Rightarrow \vec{F}_e &= 0,8 \text{ N} \end{aligned}$$

A intensidade da força eléctrica produzida na carga q é de 0,8 N.

2. A carga pontual $1,0 \times 10^{-9} \text{ C}$, quando colocada num ponto P de um campo eléctrico, fica sujeita a uma força eléctrica vertical, sentido para baixo e de intensidade igual a $0,10 \text{ N}$. Caracterize o campo eléctrico no ponto P.

$$q = 4,0 \times 10^{-6} \text{ C}$$

$$\overline{F_e} = 0,10 \text{ N}$$

Para definir o campo eléctrico, visto tratar-se de uma grandeza vectorial, teremos de definir 4 parâmetros: ponto de aplicação, direcção, sentido e intensidade da grandeza.

onto de aplicação - ponto P

Direcção - vertical

Sentido - para baixo

Intensidade - $= 1,0 \times 10^8 \text{ N/C}$

$$\overline{E} = \frac{\overline{F_e}}{q} = \frac{0,10}{1,0 \times 10^{-9}} = 1,0 \times 10^8 \text{ N/C}$$

3. Considere duas cargas pontuais fixas, q_1 de $-1,0 \mu\text{C}$ e q_2 de $4,0 \mu\text{C}$ situados no vazio á distância de 30 cm . Calcule a intensidade da força eléctrica que actua entre as cargas.

$$q_1 = -1,0 \times 10^{-6} \text{ C}$$

$$q_2 = 4,0 \times 10^{-6} \text{ C}$$

$$d = 30 \text{ cm} = 0,30 \text{ m}$$

$$\overline{F_e} = K \cdot \frac{|q_a| |q_b|}{d^2} = 9,0 \times 10^9 \cdot \frac{-1,0 \times 10^{-6} \cdot 4,0 \times 10^{-6} \text{ C}}{0,30^2} = 0,4 \text{ N}$$

A intensidade da força que actua entre as duas cargas é de $0,4 \text{ N}$.

EXERCÍCIOS DE APLICAÇÃO - ELECTROSTÁTICA

Dados: $K_{\text{vazio}} = 9,0 \times 10^9 \text{ N.m}^2.\text{C}^{-2}$

1. Num ponto do espaço, o vector campo eléctrico tem intensidade de $3,6 \times 10^3 \text{ N/C}$. Uma carga de $1,0 \times 10^{-5} \text{ C}$ colocada nesse ponto sofre a acção de uma força eléctrica. Calcule a intensidade dessa força.

2. Duas cargas pontuais, positivas e iguais, estão situadas no vácuo e a $2,0 \text{ m}$ de distância. A intensidade da força eléctrica que actua em cada carga é de $0,10 \text{ N}$.

2.1 De que tipo são as forças eléctricas que ocorrem em tal situação.

2.2 Calcule o valor das cargas pontuais.

2.3 Se uma das cargas fosse substituída por uma carga dupla, diga qual era a intensidade da força eléctrica que actuava em cada uma das cargas.

2.4 Se a distância entre as cargas passasse a ser de $0,5 \text{ m}$, qual seria a intensidade da força eléctrica a actuar em cada carga.

3. Supondo duas cargas pontuais de sinais opostos (uma positiva e outra negativa) com a mesma magnitude.

3.1 Desenhe a orientação das linhas de força do campo eléctrico.

3.2 Considere um ponto P, situado nas linhas de força desenhadas anteriormente. Supondo nesse ponto uma carga pontual positiva, desenhe a orientação do vector força eléctrica e do vector campo eléctrico nesta carga.

4. Considere o seguinte campo eléctrico.

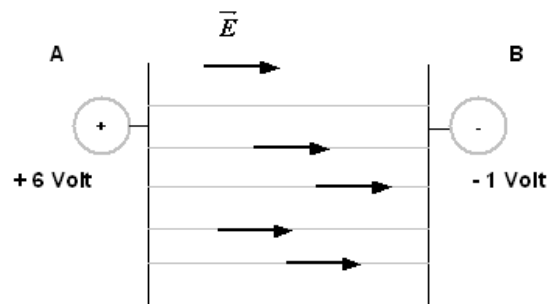


Figura 1 – Campo eléctrico

4.1 Trata-se de um campo eléctrico uniforme o não uniforme. Justifique.

4.2 Qual é a diferença de potencial (d.d.p.) entre as placas A e B ?



Capítulo 4 – Corrente contínua

4.1 Corrente eléctrica

Se dispusermos de 2 corpos metálicos eletrizados, um corpo A eletrizado positivamente e, um corpo B eletrizado negativamente e, os colocarmos perto um do outro entre eles estabelece-se, como já vimos anteriormente, um campo eléctrico \vec{E} , orientado do corpo A (a potencial mais elevado) para o corpo B (a potencial mais baixo)

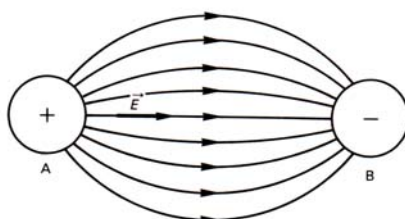


Figura 4.1 - Campo eléctrico criado pelos dois corpos

Se ligarmos estes dois corpos por um fio metálico, o campo eléctrico “ concentra-se “ no fio e passa a existir um movimento de electrões de B para A (sentido contrário a \vec{E}), pois como o corpo A esta a um potencial mais elevado terá menos cargas negativas (electrões) que o corpo B. Este movimento de electrões de B para A , para estabilizar as cargas, terminará quando os potenciais dos dois corpos forem iguais ($\vec{E} = \vec{0}$), o que acontece num pequenos espaço de tempo.

Neste caso, dizemos que ocorreu um a **corrente eléctrica transitória**, pois foi de curta duração.

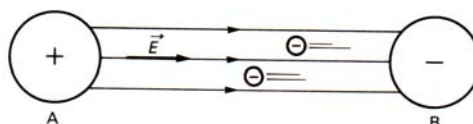


Figura 4.2 - Corrente Eléctrica Transitória

Para se conseguir uma corrente eléctrica **permanente** é necessário manter durante mais tempo o campo eléctrico nos condutores, ou seja é necessário manter mais tempo a diferença de potencial.

Isto consegue-se recorrendo a **geradores eléctricos**. Geradores são aparelhos que **transformam energia não eléctrica em energia eléctrica**.

Tomemos como exemplos:

- **Pilhas** – transformam energia química em energia eléctrica
- **Dínamos** - transformam energia mecânica em energia eléctrica
- **Células Fotovoltaicas** - transformam energia luminosa em energia eléctrica

Os geradores criam então uma d.d.p. entre os seus terminais ou pólos (pólo positivo e pólo negativo).

O símbolo do gerador é representado da seguinte forma

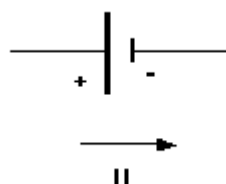


Figura 4.3 - Símbolo de um gerador (por exemplo uma pilha)

Então se ligarmos o circuito anterior a um gerador , utilizando fios condutores, como existe um **a d.d.p. (tensão)**, estabelece-se um campo eléctrico ao longo destes. Este campo durará enquanto o circuito estiver estabelecido e a corrente diz-se **permanente**.

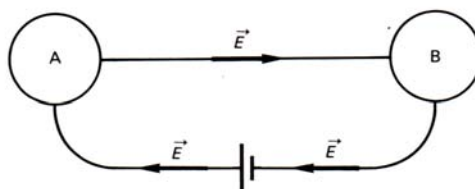


Figura 4.4 - Corrente Eléctrica Permanente

A corrente eléctrica é o movimento ordenado, contínuo e estável de electrões livres, sob o efeito de um campo eléctrico exterior aplicado a um material condutor.

4.2 Sentido da corrente eléctrica

- **Sentido real da corrente eléctrica** – é o sentido dos potenciais mais baixos para os potenciais mais altos. É o sentido do movimentos dos electrões livres.
- **Sentido convencional da corrente eléctrica** – é o sentido dos potenciais mais altos para os potenciais mais baixos. É o sentido do campo eléctrico no interior de um condutor. Coincide, portanto, com o movimento das cargas positivas.

O sentido que iremos usar é o Sentido convencional e, foi convencionado por Ampere.

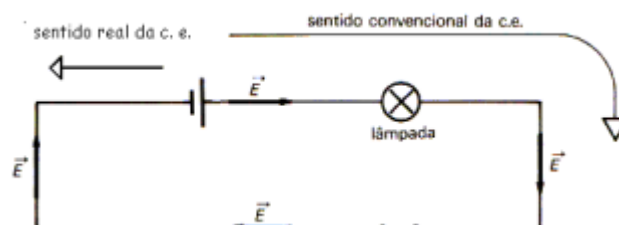


Figura 4.5 - Sentido real e sentido convencional da corrente eléctrica

4.3 Intensidade da corrente eléctrica

Existem correntes eléctricas bastantes fortes, capazes de pôr comboios eléctricos em movimento, e outras fracas, como as das máquinas de calcular.

A força “ intensidade ” de uma corrente eléctrica está relacionada com o n.º de cargas que passam numa dada secção transversal de um condutor num certo espaço de tempo.

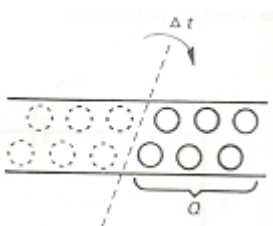


Figura 4.6 - Movimento das cargas eléctricas no intervalo de tempo Δt

Quanto maior o n.º de cargas mais intensa (forte) é a corrente eléctrica.

Assim para caracterizar uma corrente eléctrica definiu-se, a grandeza **Intensidade de Corrente Eléctrica**.

A intensidade da corrente eléctrica representa-se por I . Exprime-se em Ampére (A).

O aparelho utilizado para medir a intensidade da corrente eléctrica é o amperímetro.

Submúltiplo	Símbolo	Valor
miliAmpére	mA	10^{-3}
microAmpére	μ A	10^{-6}

Tabela 4.1- Submúltiplos

O valor da intensidade de corrente eléctrica é dado pela expressão:

$$I = \frac{Q}{t} \quad (\text{C/s}) = \text{Ampère (A)}$$

em que:

I - Intensidade da corrente eléctrica - (**A**)

Q - Carga eléctrica que atravessa uma dada secção do condutor - (**C**)

t - Intervalo de tempo - Unidade S.I. - **segundo (s)**

4.4 Formas da corrente eléctrica

A energia eléctrica, sendo utilizada de múltiplas maneiras, pode apresentar-te nos circuitos em diferentes formas:

Contínua O fluxo de electrões dá-se apenas num sentido.	Constante A tensão / corrente é constante.	Obtém-se a partir de pilhas, baterias, dínamos, fontes de tensão, rectificação de corrente alternada	
	Variável A tensão / corrente varia.	Obtém-se a partir de fontes de tensão	
Descontínua O fluxo de electrões dá-se nos dois sentidos.	Periódica A tensão / corrente varia sempre da mesma maneira, repetindo-se ao longo do tempo.	Sinusoidal A variação da corrente é sinusoidal.	Obtém-se a partir de alternadores, geradores de sinal
		Quadrada / Triangular A variação da corrente é rectangular / triangular.	Obtém-se a partir de geradores de sinal
	Não periódica A tensão / corrente não se repete no tempo	Exemplo disso são: sinais de rádio e televisão, ruído (electromagnético)	

São de salientar as duas formas de corrente eléctrica mais utilizadas:

- **Corrente contínua constante** - conhecida por **corrente contínua** (**CC** em Português ou, **DC** em Inglês)
- **Corrente descontínua periódica sinusoidal** – conhecida por **corrente alternada** (**CA** em Português ou, **AC** em Inglês)

EXERCICIO RESOLVIDO

1. Durante a carga de uma bateria consome-se uma quantidade de electricidade igual a 360 KC. Supondo que a carga se fez a uma intensidade de corrente constante de 10 A , quanto tempo demorou a bateria a carregar?

$$Q = 360 \text{ KC} = 360\,000 \text{ C}$$

$$I = 10 \text{ A}$$

$$t = ?$$

$$I = \frac{Q}{t} \Rightarrow t = \frac{Q}{I}$$

$$\Rightarrow t = \frac{360\,000}{10}$$

$$\Rightarrow t = 36\,000 \text{ s}$$

EXERCICIOS DE APLICAÇÃO - CORRENTE ELÉCTRICA

1. Um fio metálico condutor é percorrido durante 2 minutos por uma corrente eléctrica de intensidade 300 mA. Admitindo que o valor da intensidade de corrente é constante, determine a carga eléctrica que atravessa uma secção transversal do condutor, nesse intervalo de tempo.
2. Considere um fio condutor percorrido por uma corrente eléctrica cuja intensidade varia com o tempo de acordo com o gráfico .

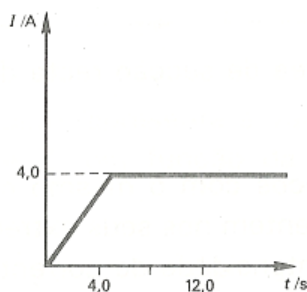


Figura 4.7 - Variação da intensidade da corrente eléctrica em função do tempo

Calcule a carga eléctrica que atravessa uma secção transversal desse fio entre os instantes $t = 4,0 \text{ s}$ e $t = 12,0 \text{ s}$.

4.5 Resistência eléctrica

Consideremos 2 circuitos eléctricos simples, 1 e 2, que apenas diferem nos **condutores metálicos M e N**.

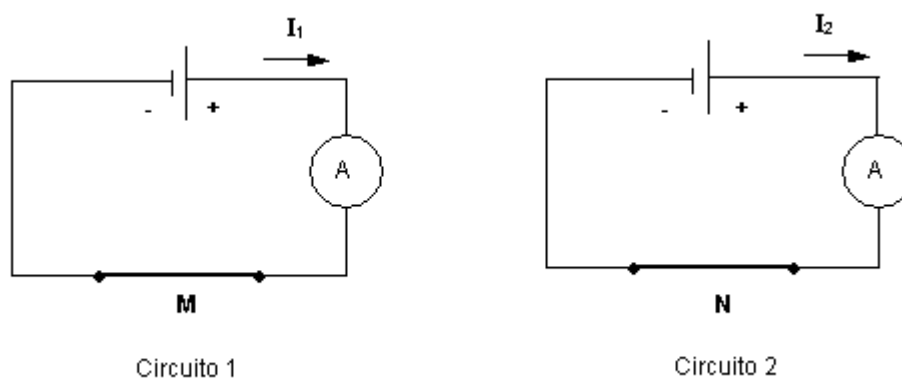


Figura 4.8 - Circuitos eléctricos

Se os amperímetros registarem valores diferentes, então, a intensidade de corrente no circuito 1 (I_1) é diferente da intensidade do circuito de corrente no circuito (I_2).

Sendo $I_1 \neq I_2$ é porque num determinado espaço de tempo, o número de cargas que atravessa uma dada secção transversal do circuito 1 é diferente do que atravessa o circuito 2. Esta diferença deve-se, exclusivamente, aos condutores M e N, pois são os únicos elementos diferentes nos dois circuitos.

Então, os condutores M e N oferecem diferentes oposições – **resistências** – ao movimento das cargas eléctricas.

Para uma mesma diferença de potencial aplicada a vários condutores, quanto maior for a resistência do condutor, menor será a intensidade de corrente que o percorre.

Para caracterizar esta oposição á passagem da corrente eléctrica definimos a grandeza **Resistência eléctrica**.

A Resistência eléctrica representa-se por R . Exprime-se em Ohm (Ω).

O aparelho utilizado para medir a resistência eléctrica é o ohmímetro.

A expressão matemática que define a resistência eléctrica é a seguinte:

$$R = \frac{U}{I} \quad (\Omega)$$

em que:

R - Resistência eléctrica - **Ohm (Ω)**

U - Tensão ou diferença de potencial - **Volt (V)**

I - Intensidade da corrente eléctrica - **Ampere (A)**

Múltiplo	Símbolo	Valor
KiloOhm	KΩ	10 ³
MegaOhm	MΩ	10 ⁶

Tabela 4.2- Múltiplos

4.5.1 Factores que afectam a resistência de um condutor. Resistividade.

A resistência de um condutor com uma secção uniforme é **dependente do material**, é **directamente proporcional ao comprimento** e **inversamente proporcional à área de secção**, ou seja:

$$R = \rho \cdot \frac{L}{S} \quad (\Omega)$$

onde:

- R** - Resistência eléctrica - (Ω)
- ρ** - Resistividade do material (lê-se “ ró ”) - (Ω.m)¹
- L** - Comprimento - (m)
- S** - Área de secção - (m²)

¹ - No sistema internacional (S.I.) a unidade da resistividade é Ω.m , onde a secção é expressa em m².
Para secções expressas em mm² a resistividade assume a unidade Ω.mm² / m.

Como já referimos no capítulo 2, um **bom condutor** possui uma resistividade da ordem dos 10⁻⁸ Ω.m ou 10⁻⁴ mm² / m e, os materiais com resistividades superiores a 10¹⁰ Ω.m ou 10¹⁴ Ω.mm² / m são designados por **isoladores**.

4.5.2 Variação da resistência com a temperatura. Coeficiente de temperatura.

Apesar de materiais diferentes terem resistividades diferentes, verifica-se que para cada material a **resistividade depende da temperatura** e, portanto a **resistência dos condutores** também **depende da temperatura**.

O coeficiente de temperatura traduz a variação que sofre uma resistência de 1 Ω, do material considerado, quando a temperatura aumenta 1º C.

A lei de variação da **resistividade** e da **resistência** com a temperatura são, respectivamente:

$$\rho_2 = \rho_1 \cdot [1 + \alpha \cdot (T_2 - T_1)] \quad (\Omega \cdot m)$$

$$R_2 = R_1 \cdot [1 + \alpha \cdot (T_2 - T_1)] \quad (\Omega)$$

onde:

- ρ_2 - Resistividade do material á temperatura T_2 (temperatura mais alta) - ($\Omega \cdot m$)
- ρ_1 - Resistividade do material á temperatura T_1 (temperatura mais baixa) - ($\Omega \cdot m$)
- α - Coeficiente de temperatura - ($^{\circ}C^{-1}$)
- T_2 - Temperatura mais alta - ($^{\circ}C$)
- T_1 - Temperatura mais baixa - ($^{\circ}C$)
- R_2 - Resistência do material á temperatura T_2 (temperatura mais alta) - (Ω)
- R_1 - Resistência do material á temperatura T_1 (temperatura mais baixa) - (Ω)

As expressões que caracterizam as leis de variação de resistividade com a temperatura e de resistência com a temperatura são idênticas, uma vez que a resistência de um material condutor é proporcional à sua resistividade.

Há substâncias para as quais α é **positivo**, isto é, a **resistividade e portanto a resistência aumentam com a temperatura** – é o caso dos **metais**; para outras substâncias α é **negativo** e então a **resistividade e a resistência diminuem quando a temperatura aumenta** – é o caso dos **líquidos e gases condutores**.

4.6 Condutância eléctrica

A resistência é como vimos, a oposição que um material oferece é passagem da corrente eléctrica. O inverso da resistência designa-se por **condutância**.

Para uma mesma diferença de potencial aplicada a vários condutores, quanto maior for a condutância do condutor, maior será a intensidade de corrente que o percorre.

A Condutância eléctrica representa-se por G . Exprime-se em Siemens (S).

O valor da condutância eléctrica é dado pela expressão:

$$G = \frac{1}{R} \quad (S) = \text{Siemens}$$

em que:

- G** - Condutância eléctrica - (**S**)
- R** - Resistência eléctrica - (**Ω**)

1 .Uma lâmpada de incandescência tem um filamento de tungsténio com comprimento de 70 mm e 0,075 mm de diâmetro. Pretende-se saber qual a sua resistência óhmica. A resistividade do tungsténio à temperatura de 20°C é $\rho_{20^\circ\text{C}} = 0,056 \mu\Omega\cdot\text{m}$.

$$L = 70 \text{ mm} = 0,070 \text{ m}$$

$$d = 0,075 \text{ mm}$$

$$\rho_{20^\circ\text{C}} = 0,056 \mu\Omega\cdot\text{m} = 0,056 \times 10^{-6} \Omega\cdot\text{m}$$

A secção de um condutor cilíndrico é dada por:

$$S = \frac{\pi \cdot d^2}{4} = \frac{\pi \cdot 0,075^2}{4} = 0,044 \text{ mm}^2 = 0,0044 \times 10^{-6} \text{ m}^2$$

Calculo da resistência, R :

$$R = \rho \cdot \frac{L}{S} = 0,056 \times 10^{-6} \cdot \frac{0,070}{0,0044 \times 10^{-6}} = 0,891 \Omega$$

A resistência da lâmpada de incandescência é de 0,891 Ω .

2. Quando se liga a lâmpada do exercício anterior, o filamento atinge quase instantaneamente uma temperatura elevada de 2200°C. Sabendo que o coeficiente de temperatura do tungsténio a 20°C é $\alpha_{20^\circ\text{C}} = 0,005 \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$, calcule o valor da resistência e da resistividade a 2200 °C.

$$R_{20^\circ\text{C}} = 0,891$$

$$\alpha_{20^\circ\text{C}} = 0,005 \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$$

Cálculo da resistência a 2200 °C.

$$R_2 = R_1 \cdot [1 + \alpha \cdot (T_2 - T_1)] = 0,891 \cdot [1 + 0,005 \cdot (2200 - 20)] = 10,6 \Omega$$

Cálculo da resistividade a 2200°C.

$$\rho_2 = \rho_1 \cdot [1 + \alpha \cdot (T_2 - T_1)] = 0,056 \times 10^{-6} \cdot [1 + 0,005 \cdot (2200 - 20)] = 6,664 \times 10^{-7} \Omega\cdot\text{m} = 0,6664 \mu\Omega\cdot\text{m}$$

A medida que a temperatura aumenta a resistência também aumenta, factor previsível uma vez que o tungsténio apresenta um coeficiente de temperatura positivo. Relativamente, á resistividade esta também aumentará, uma vez que é proporcional á resistência do material.

EXERCÍCIOS DE APLICAÇÃO - RESISTÊNCIA ELÉCTRICA

Dados: ρ (cobre) = 0,0176 mm² / m T = 20°C
 ρ (cromoníquel) = 1,04 mm² / m T = 20°C
 ρ (alumínio) = 0,0282 mm² / m T = 20°C

α (cobre) = 0,004 °C⁻¹ T = 20°C
 α (alumínio) = 0,00391 °C⁻¹ T = 20°C

- Qual o fio necessário de um fio de cromoníquel, de 0,5 mm de diâmetro para se obter uma resistência de 220 Ω à temperatura de 20 °C.
- Determine a resistência de um condutor de alumínio de secção circular com 100 m de comprimento e 1,626 mm de diâmetro, á temperatura de 20 °C.
- Um fio metálico apresenta, à temperatura de 20° C, uma resistência de 200 Ω, e à temperatura de 70° C toma o valor de 240 Ω. Calcule o valor do coeficiente de temperatura do material do fio.
- Mediu-se a resistência de um fio desconhecido, com 15,46 m de comprimento e 0,3 mm de diâmetro e obtiveram-se 3,5 Ω. Qual é a resistividade do fio ? A que metal corresponde?

NOTA: A tabela refere-se à temperatura de 20 °C.

Material	Resistividade (Ω.mm ² /m)
Prata	0,016
Cobre	0,0176
Alumínio	0,0282

- Um condutor de cobre tem um comprimento de 10 Km e 0,1 cm² de secção. Determine á temperatura de 20°C.
 - A resistência do condutor à temperatura indicada.
 - A resistência do condutor se o diâmetro aumentasse para o dobro.
 - A resistência á temperatura de 70°C.
- Determine a resistência de um cabo de alumínio de 200 m de comprimento e 1,0 mm de diâmetro, á temperatura de 35°C.

4.7 Circuito eléctrico. Constituição e função de cada elemento.

Consideremos um circuito hidráulico constituído por dois reservatórios colocados a níveis diferentes e ligados, por um lado, através de uma bomba e, por outro, por uma turbina.

Se ligarmos os dois pólos do gerador através de um condutor eléctrico, inserindo um interruptor e um pequeno motor, constatamos que se passa algo idêntico ao que se verifica no circuito hidráulico.

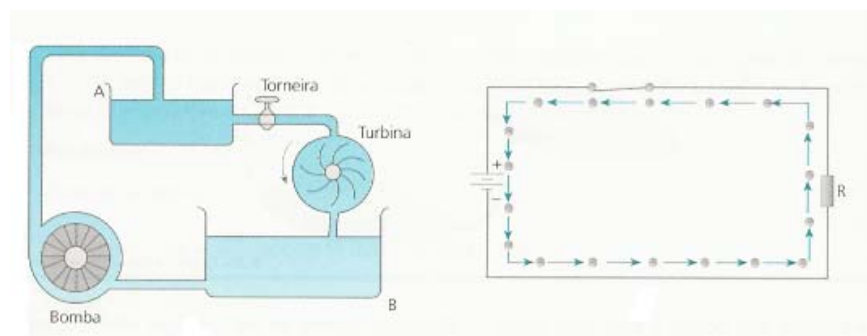


Figura 4.9 – Circuito hidráulico (à esquerda) e circuito eléctrico (à direita)

Vejamos a analogia com um circuito eléctrico.

A função da bomba é a de manter a diferença do nível da água nos dois reservatórios, deslocando a água do reservatório B para o reservatório ^a

A função do gerador também consiste em manter uma diferença de potencial aos seus terminais, deslocando, para isso, os electrões no seu interior do pólo positivo para o pólo negativo. O gerador, devido à diferença de potencial nos seus terminais, provoca um deslocamento dos electrões do seu pólo negativo para o pólo positivo, através do motor.

O sentido de deslocamento dos electrões designa-se por **sentido real da corrente**, como vimos anteriormente. Contudo, está convencionado que no exterior dos geradores a corrente eléctrica tem o sentido do pólo positivo para o pólo negativo, **sentido convencional**.

Designaremos por circuito eléctrico o conjunto de componentes eléctricos ligados de forma a possibilitarem o estabelecimento de uma corrente eléctrica através deles.

É evidente que um circuito eléctrico para funcionar terá de ser fechado, caso contrário não haverá passagem de corrente.

Conceito de circuito aberto e circuito fechado

Quando no circuito da figura o **interruptor estiver aberto** e, conseqüentemente, **não houver passagem de corrente**, diz-se que o **circuito está aberto**.

Se o **interruptor estiver fechado** verifica-se **passagem de corrente eléctrica** e diremos então que o **circuito está fechado**.

Definição de sobreintensidade, sobrecarga e curto circuito.

Diz-se que um elemento de um circuito está sujeito a uma **sobreintensidade** quando a intensidade da corrente que passa através dele ultrapassa em muito o **valor normal de funcionamento**, chamado de **valor nominal**, facto este que resulta sempre de uma avaria, defeito ou operação errada no circuito. Uma das causas mais **frequentes de sobreintensidades** é o **curto circuito**.

Diz-se que há um **curto circuito** quando existe uma **diminuição brusca da resistência**, para valores próximos de zero, entre dois pontos sob tensões diferentes. Na figura seguinte temos uma representação de uma situação em que se verifica um curto-circuito entre os pontos A e B, o que originará uma resistência quase nula, logo uma corrente bastante elevada.

Diremos que se verifica uma **sobrecarga** quando os valores normais do circuito são excedidos por virtude de uma maior solicitação em potência.

4.8 Lei de Ohm

Consideremos um condutor eléctrico ligando dois pontos a potenciais diferentes, vamos observar uma determinada corrente eléctrica através desse condutor. Essa corrente é proporcional à tensão aplicada ou seja, duplicar a tensão corresponde a duplicar a corrente.

O físico alemão Georg Simon Ohm estabeleceu uma lei que relaciona a intensidade de corrente, a diferença de potencial e a resistência

Há condutores em que a diferença de potencial (U) aplicada nos seus extremos é, para uma dada temperatura, directamente proporcional á intensidade de corrente (I) que os percorre.

Esta lei, designa-se por **Lei de Ohm**.

Atendendo á definição de resistência de um condutor podemos concluir que : **um condutor em que se verifique a lei de ohm tem resistência constante**. Tais condutores dizem-se óhmicos e estão nestas condições os condutores metálicos. Podemos assim estabelecer a lei de ohm:

$$\frac{U}{I} = \text{constante} = R$$

Se estabelecermos uma representação gráfica para os **condutores óhmicos**, e **não óhmicos** teremos:

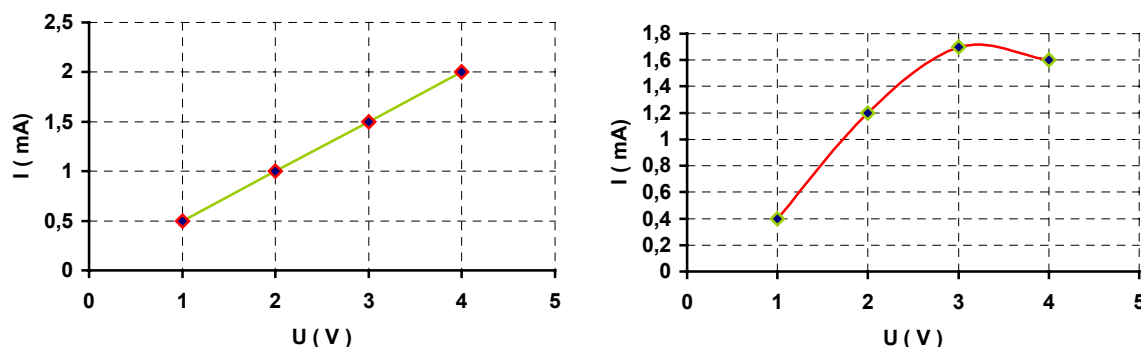


Figura 4.10 –Condutores óhmicos (á esquerda) e condutores não óhmicos (á direita)

Exemplos de **condutores óhmicos** são, como já vimos anteriormente, os **condutores metálicos**. Para o caso dos condutores **não óhmicos** tomemos como exemplo alguns componentes usados na electrónica – **díodos e transístores**.

EXERCÍCIOS RESOLVIDOS

1 .A uma lâmpada com 160Ω de resistência é aplicada uma tensão ou d.d.p. de 12 V. Qual a intensidade da corrente que a percorre?

$$R = 160 \Omega$$

$$U = 12 \text{ V}$$

$$I = ?$$

$$R = \frac{U}{I} \Rightarrow I = \frac{U}{R} \Rightarrow I = \frac{12}{160}$$

$$\Rightarrow I = 0,075 \text{ A}$$

A intensidade de corrente eléctrica que percorre a lâmpada é de 0,075 A.

EXERCÍCIOS DE APLICAÇÃO - LEI DE OHM

1. A uma dada resistência R foram aplicadas diversos valores de d.d.p., tendo-se obtido os valores indicados na tabela

U (V)	I (mA)	R (K Ω)
10	2	C
A	4	5
40	B	5

1.1. Complete a tabela (Apresente os cálculos)

1.2. Qual a Lei definida pela tabela. Represente-a graficamente através da tabela.

2. Uma resistência de carvão de $4,7 \text{ K}\Omega$ é percorrida por uma corrente de 5 mA. Qual a diferença de potencial que existe entre uma das extremidades da resistência e o seu ponto médio?

4.9 Potência eléctrica

Um mesmo trabalho - por exemplo, extrair água de um poço - pode ser realizado por dois motores em condições muito distintas, se nomeadamente um deles o efectuar em 5 minutos enquanto o outro demorar 1 hora. Diremos, naturalmente, que os dois motores são diferentes. No entanto, o trabalho realizado pelos dois motores é exactamente o mesmo. O que vai distinguir um motor do outro é a sua capacidade para realizar o mesmo trabalho, conforme o tempo o tempo que necessita.

Diremos que o **primeiro motor é mais potente que o segundo**.

Quanto maior a potência de um receptor eléctrico, maior será a capacidade deste realizar trabalho.

A potência eléctrica representa-se por P . Exprime-se em Watt (W).

O aparelho utilizado para medir a potência eléctrica é o Wattímetro.

Múltiplo	Símbolo	Valor
KiloWatt	KW	10^{+3}
miliWatt	mW	10^{-3}

Tabela 4.3 - Múltiplos e Submúltiplos

No caso de dispormos de um receptor eléctrico, designamos por **potência eléctrica** o produto:

$$P = U \times I \quad W (\text{Watt})$$

em que:

P - Potência eléctrica - **Watt (W)**

U - Tensão ou diferença de potencial - **Volt (V)**

I - Intensidade da corrente eléctrica - **Ampere(A)**

Podemos ainda relacionar a potência eléctrica com a resistência, da seguinte forma:

Substituindo $U = R \times I$ (Lei de Ohm), na expressão anterior:

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

E, substituindo $I = U / R$ (Lei de Ohm), na mesma expressão:

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

onde:

R - Resistência eléctrica - **Ohm (Ω)**

Todos os aparelhos têm uma pequena placa onde está escrita a sua potência, normalmente expressa em Watt (W). Também pode estar expressa em kW (1000W = 1kW = 1kVA).

A potência total que chega a nossa casa é contratada á empresa fornecedora de energia eléctrica, sendo controlada por meio de um disjuntor regulado para essa potência. Quando a soma das potências de vários aparelhos ligados ao mesmo tempo excede a potência contratada, o disjuntor interrompe automaticamente a corrente eléctrica. Além disso, o disjuntor é fundamental para assegurar a protecção da instalação eléctrica contra curto-circuitos.

A potência a contratar deverá ter em consideração a potência dos aparelhos eléctricos que utilizamos no dia a dia, como também devemos ter em conta que nem todos eles vão funcionar ao mesmo tempo. Assim, seleccionamos os aparelhos que poderão funcionar simultaneamente para encontrar a potência adequada ao seu caso.

Até 41,4 KW ou 41,4 KVA poderemos optar pelas seguintes potências



Figura 4.11 – Potências contratáveis até 41,4 KW (41,4 KVA).

4.10 Energia eléctrica

É usual dizer-se que um corpo (ou um sistema de corpos) possui energia sempre que possa fornecer trabalho ou calor.

Existem diferentes formas de energia (mecânica, térmica, química, eléctrica, nuclear), assim como várias fontes de energia (solar, materiais nucleares, o vento, a água em movimento).

No caso de um receptor eléctrico, quanto **maior a potência** de um receptor eléctrico, **maior será a capacidade deste produzir trabalho**, mas também **maior quantidade de energia eléctrica** ele consumirá. Por exemplo: Uma lâmpada de maior potência que outra do mesmo tipo dá mais luz, mas também consome mais energia.

A energia perdida ou adquirida por um sistema é dada pelo produto da potência pelo tempo, ou seja:

A energia eléctrica representa-se por W . Exprime-se em Joule (J).

O aparelho que possibilita a leitura directa da energia eléctrica é o Contador de energia.

Múltiplo	Símbolo	Valor
KiloJoule	KJ	10^{+3}

Tabela 4.4 - Múltiplo

A expressão que define a energia é:

$$W = P \times t \quad (\text{Joule})$$

em que:

- W** - Energia eléctrica - **Joule (W)** ou **Watt / s (W / s)**
- P** - Potência eléctrica - **Watt (W)**
- t** - Tempo - **segundo(s)**

A unidade da energia no sistema internacional é o **Joule - J**. (1 Joule = 1 Watt x 1 segundo)

No entanto, a unidade de energia eléctrica utilizada nas redes de produção, transporte e consumo de energia é o **Watt-hora (W.h)**, que representa o **consumo** ou **produção** de **1 W durante uma 1 h**, ou então, um dos seus múltiplos como o **KiloWatt-hora (KW.h)** que representa o **consumo** ou **produção** de **1 KW durante 1 h**, o **MegaWatt-hora (MW.h)** ou mesmo o **GigaWatt-hora (GW.h)**.

Múltiplo	Símbolo	Valor
GigaWatt-hora	GW.h	10^{+9}
MegaWatt-hora	MW.h	10^{+6}
KiloWatt-hora	KW.h	10^{+3}

Tabela 4.5 - Múltiplos

A regra de conversão entre Watt-hora e Joule é a seguinte:

$$1 \text{ Wh} = 1 \text{ Watt} \times 1 \text{ hora} \Leftrightarrow 1 \text{ Wh} = 1 \text{ Watt} \times 3600 \text{ segundos} \Leftrightarrow 1 \text{ Wh} = 3600 \text{ W / s} \Leftrightarrow 1 \text{ Wh} = 3600 \text{ J}$$

Para calcular o consumo de energia de um equipamento seguiremos o seguinte procedimento:

- Identifique a potência (Watt) do equipamento em causa. Normalmente os fabricantes indicam esse valor numa chapa ou etiqueta colocada de lado ou na parte de trás do equipamento. Se não existe essa indicação, mas apenas a intensidade de corrente (Ampere - A) e a tensão (Volt - V) são fornecidos, faça o seguinte cálculo:

$$P = U \times I$$

- Determine o consumo mensal (energia consumida) do equipamento, multiplicando os Watts pelo número de horas de utilização mensal do equipamento.

Por exemplo, se uma lâmpada fluorescente (36 W) está ligada 8 horas por dia, então por mês estará ligada 240 Horas (8x30 dias). O seu consumo mensal será de:

$$\text{Watt} \times \text{horas utilização} = \text{Watt.hora por mês}$$

$$36 \times 240 = 8640 \text{ Watt.hora (W.h) por mês} \Leftrightarrow 8,640 \text{ KW.h por mês}$$

- Finalmente calculamos o custo deste consumo bastando para tal, multiplicar os kWh por € 0,0920 (no caso da tarifa simples – preço 2002).

$$8,64 \text{ kW.h} \times 0,0920 = 0,795 \text{ €}$$

4.11 Efeito térmico da corrente eléctrica. Lei de Joule

Já referimos que a passagem da corrente eléctrica por um condutor produz uma dissipação de energia sob a forma de calor. Esta libertação de calor designada efeito de Joule constitui a origem da incandescência do filamento de uma lâmpada, do aquecimento de um ferro de passar, de fornos eléctricos, de ferros de soldar, etc.

Uma resistência ao ser percorrida por uma corrente eléctrica irá dissipar uma determinada potência, dada por $P = R \times I^2$, sob a forma de calor. Este fenómeno foi estudado pelo famoso cientista James P. Joule. O enunciado da lei de Joule diz:

A energia eléctrica dissipada em calor por efeito de Joule, num receptor, é proporcional á resistência do receptor, ao quadrado da intensidade de corrente que o atravessa e ao tempo de passagem da corrente eléctrica.

Matematicamente, pode ser definida pela expressão:

$$W = R \times I^2 \times t \quad \text{Joule (J)}$$

em que:

- W** - Energia eléctrica - **joule (J)**
- R** - Resistência eléctrica - **ohm (Ω)**
- I** - Intensidade da corrente eléctrica - **ampére (A)**
- t** - Tempo - **segundo(s)**

Aplicações do efeito de Joule

O fusível é um dispositivo que explora as consequências do efeito de Joule, o qual tem por objectivo limitar a potência fornecida a um determinado circuito eléctrico. Neste caso, quando a corrente absorvida pelo circuito supera um valor limite pré-estabelecida, $I_{m\acute{a}x.}$, o calor gerado por efeito de Joule é suficiente para fundir o filamento e interromper o fornecimento de corrente ao circuito.

Existem fusíveis para diversos tipos de aplicações: de valor máximo de corrente, de actuação rápida (sensíveis aos picos de corrente) ou lenta (sensíveis ao valor médio da corrente), etc.

O efeito de Joule poderá ser ainda utilizado em aquecimento como por exemplo: torradeiras, fogões eléctricos, ferros de passar, ferros de soldar, etc. Em iluminação de incandescência: a passagem da corrente eléctrica produz calor num filamento, geralmente tungsténio, que o leva à temperatura da ordem dos 200 ° C à qual emite luz.

A programação das memórias ROM constitui uma das aplicações mais interessantes do princípio de funcionamento do fusível. Neste caso, os fusíveis são constituídos por uma fita de alumínio depositada na superfície da pastilha de silício, fusíveis que são posteriormente fundidos, ou não, de acordo com o código a programar na memória.

Inconvenientes do efeito de Joule

O aquecimento dos condutores provocado pela passagem da corrente eléctrica representa, quando não é obtenção de calor que se pretende, desperdício de energia, podendo até constituir perigo para a segurança das instalações.

Tomemos como exemplos:

As **perdas de energia nas máquinas eléctricas** onde, o aquecimento limita a potência das máquinas. Ou seja, por outras palavras, o calor desenvolvido nos seus enrolamentos tem de ser limitado, pois na sua constituição entram materiais que se deterioram a partir de certa temperatura.

As **perdas nas linhas eléctricas de transporte e distribuição de energia** onde, o efeito de Joule origina perdas consideráveis obrigando ao aumento da secção dos condutores.

A **limitação da intensidade de corrente eléctrica nos condutores** de forma a evitar a deterioração dos seus isolamentos. A deterioração dos condutores, poderá dar origem a curto-circuitos.

Os fabricantes fornecem para cada tipo de cabo e para cada secção a corrente máxima que os pode percorrer permanentemente sem que haja aquecimento em demasia.

EXERCÍCIOS RESOLVIDOS

1 .Determine a potência dissipada por uma resistência de 18 KΩ quando percorrida por uma corrente eléctrica de 2 mA ?

$$R = 18 \text{ K}\Omega = 18\,000 \Omega$$

$$I = 2 \text{ mA} = 0,002 \text{ A}$$

$$P = ?$$

$$P = R \times I^2 \Leftrightarrow P = 18\,000 \times 0,002^2$$

$$\Leftrightarrow P = 0,0072 \text{ W} = 72 \text{ mW}$$

A potência dissipada pela resistência eléctrica é de 72 mW.

2 .Qual a energia consumida por um aquecedor eléctrico de 1500 W de potência durante 5 dias de funcionamento ininterrupto?

$$P = 1500 \text{ W}$$

$$t = 5 \text{ dias} \times 24 \text{ horas} = 120 \text{ horas}$$

$$W = ?$$

$$W = P \cdot t \Leftrightarrow W = 1500 \times 120$$

$$\Leftrightarrow W = 180\,000 \text{ W.h} = 180 \text{ KW.h}$$

A energia consumida pelo aquecedor é de 180 KW.h.

EXERCÍCIOS DE APLICAÇÃO - POTÊNCIA, ENERGIA E LEI DE JOULE.

1. Determine a máxima potência que se pode aplicar a uma resistência de $4,7\text{ K}\Omega$ sabendo que esta é de $\frac{1}{4}$ de Watt ?
2. Um condutor com a resistência de $10\ \Omega$ é percorrido por uma corrente de 2 A.
 - 2.1. Calcule a potência dissipada pelo condutor.
 - 2.2. Determine a energia dissipada no conduto durante 20 minutos.
3. Um aquecedor eléctrico ao fim de 5 horas consome a energia de 6 KW.h. Calcule a resistência do aquecedor, sabendo que funciona com a d.d.p. de 220 V.
4. Um condutor com a resistência de $30\ \Omega$ é percorrido por uma intensidade de corrente eléctrica de 2 A. Determine a energia dissipada por efeito de Joule.

4.12 Rendimento. Perdas de energia

Uma máquina ou aparelho tem como função transformar uma forma de energia noutra. Contudo a energia que se obtém é inferior á energia absorvida inicialmente pela máquina, pois uma parte transforma-se em energia não desejada.

A análise do rendimento poderá ser realizada considerando energias ou potências, pois como vimos atrás - $W = P \cdot t$. Faremos a nossa análise recorrendo a potências.

Considere uma máquina qualquer (gerador ou motor), teremos uma determinada potência que é absorvida pela máquina, uma determinada potência de perdas e finalmente, a potência útil para utilização. A figura seguinte ilustra o que foi dito:

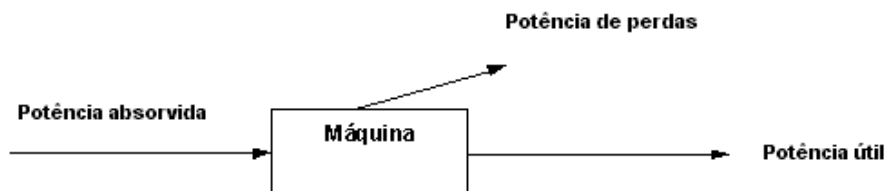


Figura 4.12 – Representação das potências numa máquina

Define-se rendimento da máquina pelo quociente entre a potência útil (potência á saída) e a potência absorvida (potência á entrada).

O rendimento eléctrico representa-se por η . É uma grandeza adimensional (não tem unidades) e exprime-se em percentagem.

A expressão matemática que traduz o rendimento é:

$$\eta = \frac{\text{Potência útil (} P_u \text{)}}{\text{Potência absorvida (} P_a \text{)}} \times 100 \% \quad (\text{sem unidades})$$

onde:

- η - Rendimento eléctrico - (Grandeza adimensional)
- P_u - Potência útil - **Watt (W)**
- P_a - Potência absorvida - **Watt (W)**

Este cociente é sempre inferior á unidade ($\eta < 1$).

Podemos ainda salientar que:

$$\text{Potência útil} = \text{Potência absorvida} - \text{Potência perdas}$$

4.13 Associação de resistências

Geralmente uma fonte de tensão está ligada a várias resistências. O comportamento de uma associação de resistências será análogo ao de um única resistência, que se designa por resistência equivalente.

As associações ou agrupamentos podem ser de três tipos:

- **Série** - têm apenas um terminal comum ou seja, um terminal de um deles está ligado a um só terminal do outro.
- **Paralelo** - têm dois pontos em comum.
- **Misto** - circuitos onde se encontram simultaneamente associações série e paralelo.

Associação em série

Num circuito série existe somente um caminho para os electrões logo, estes terão de percorrer todos os componentes constituintes deste.

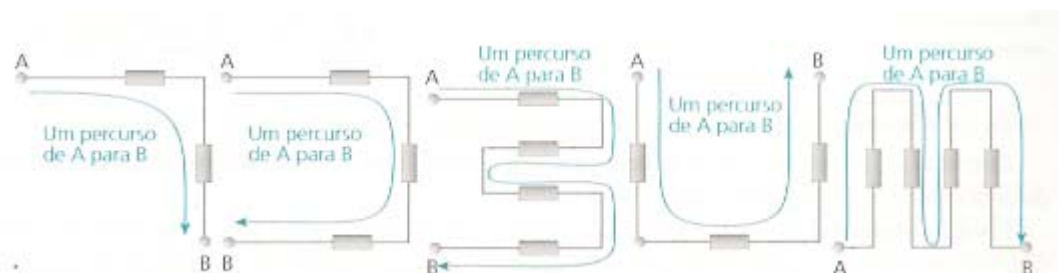


Figura 4.13 - Resistências associadas em série

A resistência equivalente ou resistência total será dada por:

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

A **resistência total** R_T de uma associação série é **maior que cada resistência parcial**.

CASO PARTICULAR

Se associarmos em série duas resistências iguais, a R_T é igual ao dobro da resistência inicial. Caso sejam mais de duas a R_T é dada pela expressão:

$$R_T = n \times R$$

Associação em paralelo

Num circuito em paralelo existem vários caminhos para os electrões, a maior quantidade destes percorrerá o caminho com menos oposição.

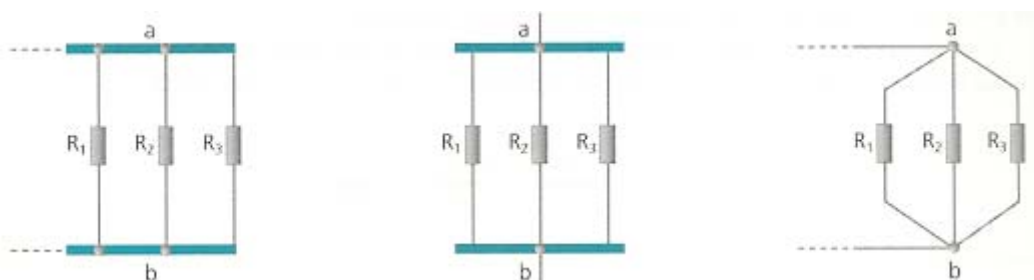


Figura 4.14 - Resistências associadas em paralelo

A resistência equivalente ou resistência total será dada por:

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

No caso particular, de **2 resistências** poderemos utilizar a seguinte expressão:

$$R_T = \frac{R_1 \times R_2}{R_1 + R_2}$$

O valor da **resistência total** R_T de uma associação paralelo é **menor que a menor resistência do paralelo**.

CASO PARTICULAR

Se associarmos em paralelo duas resistências iguais, a R_T é igual a metade da resistência inicial. Caso sejam mais de duas a R_T é dada pela expressão:

$$R_T = \frac{R}{n}$$

Associação mista

Para determinar a resistência equivalente de uma associação mista é necessário substituir sucessivamente as associações principais (série e paralelo) pela sua equivalente, o que vai simplificando o esquema inicial.

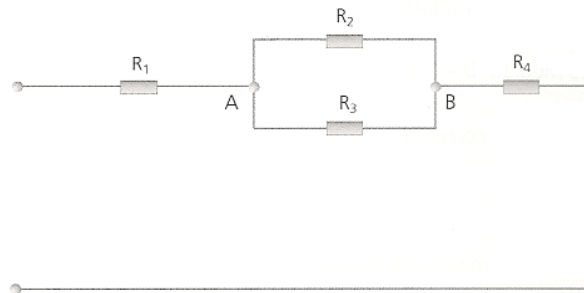


Figura 4.14 – Associação mista de resistências

1 .Determine a resistência equivalente do circuito da figura seguinte - 4.15 .

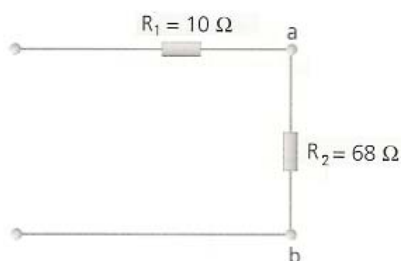


Figura 4.15 - Resistências associadas em série

$$R_T = R_1 + R_2 \Leftrightarrow R_T = 10 + 68 \Leftrightarrow R_T = 78 \Omega$$

A resistência equivalente ao agrupamento série é de 78Ω , sendo maior que a maior resistência do circuito série.

2 . Calcule a resistência total do circuito da figura que se segue -4.16 .

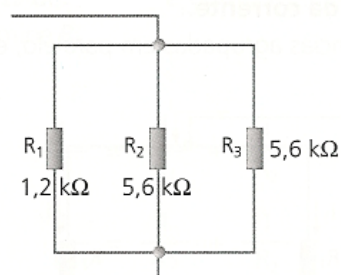


Figura 4.16 - Resistências associadas em paralelo

$$\frac{1}{R_T} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3} \Leftrightarrow \frac{1}{R_T} = \frac{1}{1,2} + \frac{1}{5,6} + \frac{1}{5,6} \Leftrightarrow \frac{1}{R_T} = \frac{100}{84}$$

$$\Leftrightarrow R_T = 0,84 \text{ K}\Omega$$

ou de outra forma,

$$R_{1,2} = \frac{R_1 \times R_2}{R_1 + R_2} \Leftrightarrow R_{1,2} = \frac{1,2 \times 5,6}{1,2 + 5,6} \Leftrightarrow R_{1,2} = 0,99 \text{ K}\Omega$$

$$R_T = \frac{R_{1,2} \times R_3}{R_{1,2} + R_3} \Leftrightarrow R_T = \frac{0,99 \times 5,6}{0,99 + 5,6} \Leftrightarrow R_T = 0,84 \text{ K}\Omega$$

A resistência equivalente ao agrupamento série é de 0,84 KΩ, sendo menor que a menor resistência da associação paralelo.

EXERCÍCIOS DE APLICAÇÃO - ASSOCIAÇÃO DE RESISTÊNCIAS

1. Determine a resistência equivalente ao agrupamento da figura 4.17 .

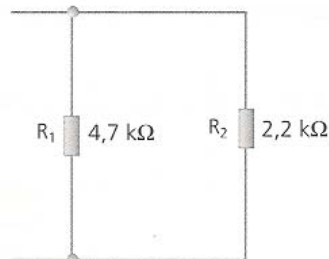


Figura 4.17 - Resistências associadas em paralelo

2. Determine a resistência total ao circuito da figura a seguir - 4.18 .

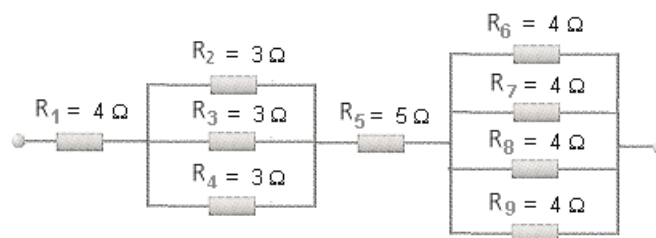


Figura 4.18 - Associação mista de resistências

3. Determine a resistência equivalente entre os pontos A e B da figura seguinte - 4.19.

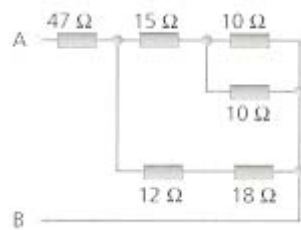


Figura 4.19 - Associação mista de resistências

4.14 Análise de circuitos eléctricos

Circuitos série

No circuito da figura seguinte temos 3 resistências ligadas umas a seguir às outras e onde a corrente eléctrica, ou seja o movimento dos electrões, só tem um caminho de circulação - estamos perante um **circuito série**. Assinalamos a diferença de potencial, ou tensão aplicada ao circuito, por intermédio de uma seta, que aponta para o potencial mais baixo, ou seja, do + para o - .

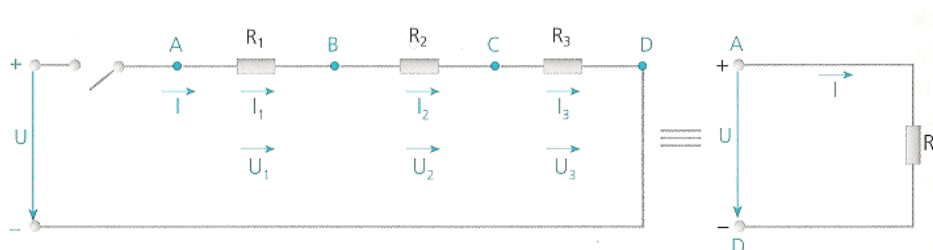


Figura 4.20 - Circuito em série de resistências e seu equivalente.

Analisando o circuito teremos:

1. A **resistência equivalente**, como visto no ponto anterior (4.13) dada por

$$R_T = R_1 + R_2 + R_3$$

2. Como vimos á pouco a **corrente eléctrica** só terá um caminho por onde seguir logo, será sempre a mesma ao longo de todo o circuito - diremos que esta é constante ao longo do circuito.

$$I = I_1 = I_2 = I_3$$

3. **A d.d.p. ou tensão** divide-se pela resistências 1, 2 e 3 logo, a tensão total será a soma da tensão na resistência 1 mais, a tensão na resistência 2, mais a tensão na resistência 3. De salientar que, a maior resistência reterá a maior d.d.p. e a menor resistência a menor d.d.p.

$$U_T = U_1 + U_2 + U_3$$

Em cada resistência teremos, pela Lei de Ohm, a seguinte tensão:

$$U_1 = R_1 \times I$$

$$U_2 = R_2 \times I$$

$$U_3 = R_3 \times I$$

Sendo a tensão dada por:

$$U_T = R_T \times I$$

Caso Particular - Divisor de tensão

O circuito divisor de tensão não é mais do que um circuito série. É chamado desta forma porque a tensão é dividida entre duas resistências. Isto decorre de uma das propriedades do circuito série, abordada anteriormente, que diz que a soma das tensões de cada resistência é igual à tensão total do circuito.

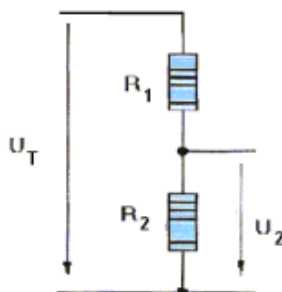


Figura 4.21 – Circuito divisor de tensão

A tensão U_2 é proporcional á tensão U_T . O factor de proporcionalidade é dado pelo quociente entre a resistência R_2 e a resistência total do circuito ($R_1 + R_2$).

Assim para calcular a tensão na resistência R_2 , utilizamos a formula do divisor de tensão:

$$U_2 = \frac{R_2}{R_1 + R_2} \times U_T$$

Podemos imaginar a tensão U_T como uma tensão de entrada e a tensão nos terminais da resistência R_2 a tensão de saída, a ser aplicado a qualquer outro circuito electrónico.

1 . Considere o seguinte circuito (figura 4.22) em que se desconhece a resistência R_2 . Determine o seu valor e a tensão nos seus terminais.

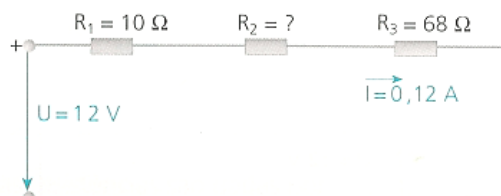


Figura 4.22 - Circuito em série de resistências

$$\begin{aligned} U &= 12 \text{ V} \\ I &= 0,12 \text{ A} \\ R_2 &= ? \\ U_{R2} &= ? \end{aligned}$$

$$R_T = \frac{U}{I} = \frac{12}{0,12} = 100 \Omega$$

$$\begin{aligned} R_T &= R_1 + R_2 + R_3 & \Leftrightarrow & 100 = 10 + R_2 + 68 \\ & & \Leftrightarrow & R_2 = 100 - 10 - 68 & \Leftrightarrow & R_2 = 22 \Omega \end{aligned}$$

$$U_{R2} = R_2 \times I \quad \Leftrightarrow \quad U_{R2} = 22 \times 0,12 \quad \Leftrightarrow \quad U_{R2} = 2,64 \text{ V}$$

O valor da resistência R_2 é de 22Ω e a d.d.p. nos seus terminais de $2,64 \text{ V}$.

2 . Determine a tensão aos terminais da resistência R_2 do agrupamento representado (figura 4.23).

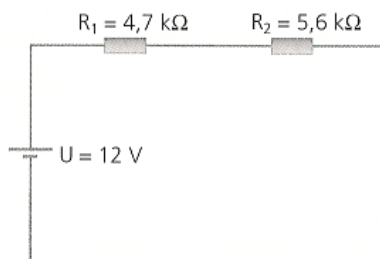


Figura 4.23 – Circuito divisor de tensão

Como temos somente duas resistências, a tensão irá dividir-se proporcionalmente por elas. Podemos aplicar a fórmula do divisor de tensão, assim:

$U = 12 \text{ V}$
 $R_1 = 4,7 \text{ K}\Omega$
 $R_2 = 5,6 \text{ K}\Omega$
 $U_{R2} = ?$

$$U_{R2} = \frac{R_2}{R_1 + R_2} \times U_T \Leftrightarrow U_{R2} = \frac{5,6}{4,7 + 5,6} \times 12 \Leftrightarrow U_{R2} = 6,52 \text{ V}$$

A tensão ou diferença de potencial aos terminais de R_2 é de 6,52 V.

EXERCÍCIOS DE APLICAÇÃO - ANÁLISE DE CIRCUITOS ELÉTRICOS - SÉRIE

1. Associaram-se em série 3 resistências, R_1 , R_2 e R_3 . O conjunto apresenta um valor óhmico de 870 $\text{K}\Omega$. Se as resistências R_1 e R_2 tiverem, respectivamente, 220 $\text{K}\Omega$ e 470 $\text{K}\Omega$, quanto mede a resistência R_3 ?

2. Três resistências de 330 Ω , 470 Ω e 1 $\text{K}\Omega$ estão ligadas em série a uma fonte de alimentação de 9 V. Calcule:
 - 2.1 O valor da resistência total do agrupamento.
 - 2.2 A intensidade de corrente que percorre o circuito.
 - 2.3 As tensões U_1 , U_2 e U_3 nos terminais de cada resistência.

3. Determine a tensão aos terminais da resistências R_1 e R_2 do agrupamento representado na figura 4.24.

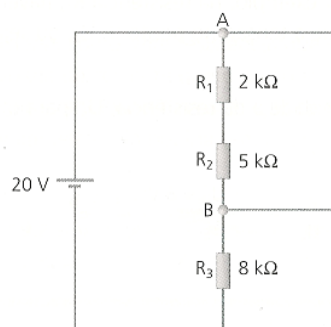


Figura 4.24 - Circuito série de resistências

Circuitos paralelo

No circuito que se segue temos 3 resistências ligadas tendo todas dois pontos comuns entre si. A corrente eléctrica, ou seja o movimento dos electrões, tem três caminhos de circulação – estamos perante um **circuito paralelo**.

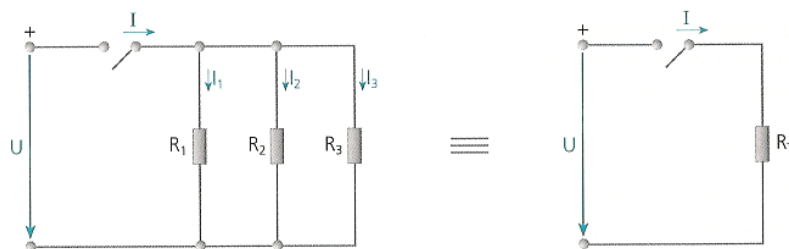


Figura 4.25 – Associação de resistências em paralelo e seu equivalente.

Analisando o circuito teremos:

1. A **resistência equivalente**, é dada pela expressão:

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

2. A **corrente eléctrica** como vimos tem três caminhos por onde seguir logo, pela resistências 1, 2 e 3 logo, a intensidade de corrente total será a soma da intensidade de corrente na resistência 1 mais, a intensidade de corrente na resistência 2, mais a intensidade de corrente na resistência 3. De frisar que, pela maior resistência passará a menor intensidade de corrente eléctrica (pois oferece uma grande barreira á sua passagem) e, pela menor resistência passará a maior intensidade de corrente eléctrica.

$$I = I_1 + I_2 + I_3$$

3. Nos circuitos paralelo temos sempre dois pontos comuns, logo a d.d.p. ou tensão que chegará a cada resistência será sempre a mesma logo, diremos que esta é constante ao longo do circuito.

$$U_T = U_1 = U_2 = U_3$$

Em cada resistência teremos, pela Lei de Ohm, a seguinte intensidade de corrente eléctrica:

$$I_1 = \frac{U}{R_1} \quad I_2 = \frac{U}{R_2} \quad I_3 = \frac{U}{R_3}$$

Sendo a intensidade de corrente eléctrica total dada por:

$$I_T = \frac{U}{R_T}$$

Caso Particular - Divisor de corrente

Da mesma forma que o divisor de tensão, o divisor de corrente não é mais do que um circuito paralelo. O nome provém devido á corrente total se dividir entre as duas resistências. Podemos constatar tal propriedade se atendermos ao número de caminhos que a corrente eléctrica dispõe ou seja, neste caso, dispomos de 2 caminhos logo: $I_T = I_1 + I_2$

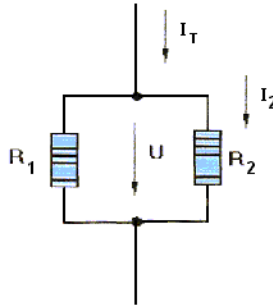


Figura 4.26 – Circuito divisor de corrente

A corrente I_2 é proporcional á tensão I_T . O factor de proporcionalidade é dado pelo quociente entre a resistência oposta á pretendida R_1 e a resistência total do circuito ($R_1 + R_2$).

Assim para calcular a corrente na resistência R_2 , utilizamos a formula do divisor de corrente:

$$I_2 = \frac{R_1}{R_1 + R_2} \times I_T$$

EXERCICIOS RESOLVIDOS

1 .Considere o circuito da figura 4.27 ao qual se aplica uma tensão contínua de 12 V. Determine:

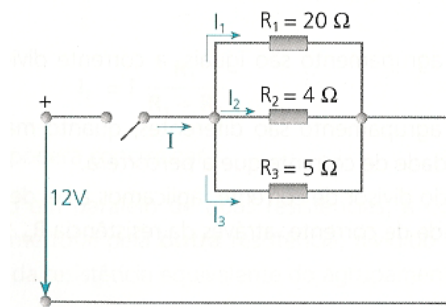


Figura 4.27 – Circuito paralelo de resistências

1.1 A resistência equivalente.

$$R_1 = 10 \Omega$$

$$R_2 = 4 \Omega$$

$$R_3 = 5 \Omega$$

$$\frac{1}{R_T} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3} \Leftrightarrow \frac{1}{R_T} = \frac{1}{20} + \frac{1}{4} + \frac{1}{5} \Leftrightarrow \frac{1}{R_T} = \frac{10}{20}$$

$$\Leftrightarrow R_T = 2 \Omega$$

A resistência total (equivalente) ao agrupamento é de 2Ω .

1.2 A intensidade da corrente total no circuito.

$$U = 12 \text{ V}$$

$$R_T = 2 \Omega$$

$$I = ?$$

$$I = \frac{U}{R_T} = \frac{12}{2} = 6 \text{ A}$$

A intensidade total que percorre o circuito é de 6 A.

1.3 A intensidade em cada uma das resistências.

$$U = 12 \text{ V}$$

$$R_1 = 10 \Omega$$

$$R_2 = 4 \Omega$$

$$R_3 = 5 \Omega$$

$$I = ?$$

$$I_1 = \frac{U}{R_1} = \frac{12}{20} = 0,6 \text{ A}$$

$$I_2 = \frac{U}{R_2} = \frac{12}{4} = 3 \text{ A}$$

$$I_3 = \frac{U}{R_3} = \frac{12}{5} = 2,4 \text{ A}$$

$$I_T = I_1 + I_2 + I_3 \Leftrightarrow I_T = 0,6 + 3 + 2,4 \Leftrightarrow I_T = 6 \text{ A}$$

As intensidade de corrente eléctrica que percorrem cada resistência são respectivamente 0,6 A, 3A e 2,4 A . Como podemos analisar pelos resultados obtidos, a maior resistência (20Ω) é percorrida pela menor intensidade de corrente eléctrica e, por sua vez, a menor resistência (4Ω) é percorrida pela maior intensidade de corrente eléctrica, isto porque a menor resistência se opõe menos á sua passagem.

2. Calcule a corrente que circula pela resistência R_1 na figura que se segue - 4.28.

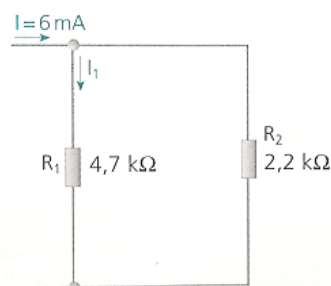


Figura 4.28 - Circuito divisor de corrente

O circuito é composto por duas resistências logo, a intensidade de corrente eléctrica irá dividir-se proporcionalmente por elas. Podemos aplicar a formula do divisor de corrente, assim:

$$R_1 = 4,7 \text{ K}\Omega$$

$$R_2 = 2,2 \text{ K}\Omega$$

$$I_1 = ?$$

$$I_1 = \frac{R_2}{R_1 + R_2} \times I_T \Leftrightarrow I_1 = \frac{2,2}{4,7 + 2,2} \times 6 \Leftrightarrow I_1 = 1,9 \text{ mA}$$

A intensidade de corrente eléctrica que percorre a resistência R_1 é de 1,9 mA.

EXERCÍCIOS DE APLICAÇÃO - ANÁLISE DE CIRCUITOS ELÉCTRICOS - PARALELO

1. Se ligarmos quatro resistências de 68Ω em paralelo, qual o valor da resistência equivalente?
2. Ligaram-se em paralelo quatro resistências, sendo duas de $120 \text{ K}\Omega$ e duas de $680 \text{ K}\Omega$. Aplicou-se ao agrupamento a tensão de 6 V. Determine:
 - 2.1 A resistência equivalente do agrupamento.
 - 2.2 A intensidade de corrente total.
 - 2.3 A intensidade em cada uma das resistências.

Circuitos em série - paralelo (mistos)

A circuitos onde se encontram simultaneamente associações série e paralelo dá-se o nome de **circuitos mistos**.

Para determinar a **resistência** equivalente é necessário substituir sucessivamente as associações principais pela sua resistência equivalente, o que vai simplificando o circuito. Em termos, de **corrente eléctrica** e **d.d.p. ou tensão** teremos de analisar o circuito parcialmente, ou seja analisar o (s) circuito (s) série e o (s) circuitos (s) paralelo que o constituem.

Iremos visualizar um exemplo para analisar um circuito eléctrico deste tipo. Considere o circuito da figura 4.29.

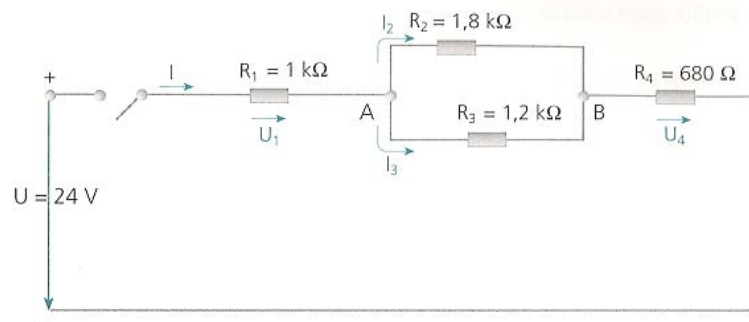


Figura 4.29 - Circuito eléctrico série - paralelo (misto)

Analisaremos os seguintes pontos:

- A resistência total.
- A intensidade de corrente total.
- A tensão R_1 , R_4 entre os pontos A e B.
- As intensidades em R_2 e R_3 .

Comecemos por calcular a resistência equivalente do agrupamento R_2 e R_3 :

$$R_{2,3} = \frac{R_2 \times R_3}{R_2 + R_3} \Leftrightarrow R_{2,3} = \frac{1,8 \times 1,2}{1,8 + 1,2} \Leftrightarrow R_{2,3} = 0,72 \text{ K}\Omega = 720 \Omega$$

Teremos então, agora, três resistências em série:

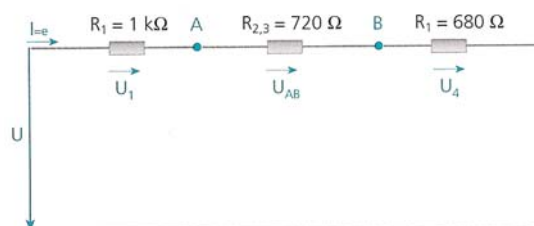


Figura 4.30 - Circuito simplificado

A resistência total será:

$$R_t = R_1 + R_{2,3} + R_4 \Leftrightarrow R_t = 1000 + 720 + 680 \Leftrightarrow R_t = 2400 \Omega = 2,4 \text{ K}\Omega$$

A intensidade de corrente eléctrica total é dada por:

$$I = \frac{U}{R_T} \Leftrightarrow I = \frac{24}{2,4 \times 10^3} \Leftrightarrow I = 10 \text{ mA}$$

A tensão aos terminais das resistências serão:

$$U_1 = R_1 \times I \Leftrightarrow U_1 = 1000 \times 10 \times 10^{-3} \Leftrightarrow U_1 = 10 \text{ V}$$

$$U_{AB} = R_{AB} \times I \Leftrightarrow U_{AB} = 720 \times 10 \times 10^{-3} \Leftrightarrow U_{AB} = 7,2 \text{ V}$$

$$U_4 = R_4 \times I \Leftrightarrow U_4 = 680 \times 10 \times 10^{-3} \Leftrightarrow U_4 = 6,8 \text{ V}$$

Esta tensão pode ser calculada de outra forma:

$$U = U_1 + U_{AB} + U_4 \Leftrightarrow U_{AB} = U - U_1 - U_4 \Leftrightarrow U_{AB} = 24 - 10 - 7,2 \Leftrightarrow U_{AB} = 6,8 \text{ V}$$

A corrente quando chega ao ponto A tem dois caminhos para prosseguir (circuito paralelo), logo o seu valor irá ser dividido proporcionalmente pelas resistências R_2 e R_3 , assim teremos:

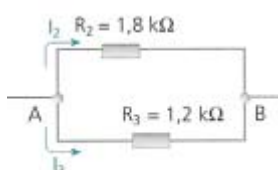


Figura 4.31 - Divisão das correntes no circuito paralelo (R_2 , R_3)

$$I_2 = \frac{U_{AB}}{R_2} \Leftrightarrow I_2 = \frac{7,2}{1800} \Leftrightarrow I_2 = 4 \text{ mA}$$

$$I_3 = \frac{U_{AB}}{R_3} \Leftrightarrow I_3 = \frac{7,2}{1200} \Leftrightarrow I_3 = 6 \text{ mA}$$

ou de outra maneira:

$$I = I_2 + I_3 \Leftrightarrow I_3 = I - I_2 \Leftrightarrow I_3 = 10 - 4 \Leftrightarrow I_3 = 6 \text{ mA}$$

4.15 Notação usada em circuitos eléctricos e electrónicos

Na maioria das situações, os circuitos eléctricos e electrónicos têm um referencial comum que se designa por massa, e que se representa pelo símbolo:



Figura 4.32 - Símbolo da massa

A d.d.p. na massa é de 0 V, sendo por isso o potencial de referência de qualquer circuito. Nos circuitos analisados até então não introduzimos esta noção.

Tomemos como exemplo os seguintes circuitos **que são todos equivalentes uns dos outros**.

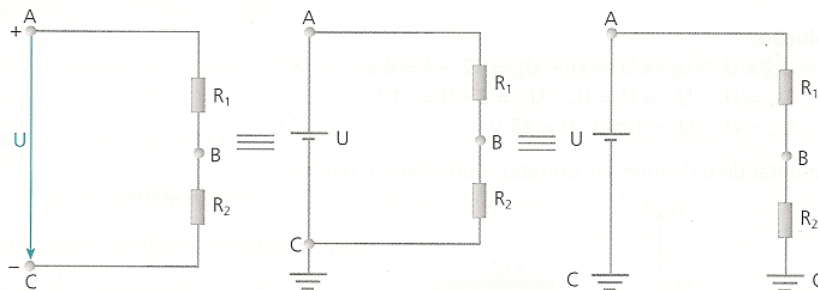


Figura 4.33 - Circuitos eléctricos utilizando a notação de massa.

As tensões aos terminais das resistências são dadas por:

$$\text{Tensão em } R_1 \Rightarrow U_{AB} = U_A - U_B$$

$$\text{Tensão em } R_2 \Rightarrow U_{BC} = U_B - U_C$$

Quando as tensões são referenciadas em relação a um ponto comum (C) – **massa** – teremos:

$$\text{Tensão em } R_1 + R_2 \Rightarrow U_{AC} = U_A - U_C$$

$$\text{Tensão em } R_2 \Rightarrow U_{BC} = U_B - U_C$$

Neste caso, podemos **dispensar o segundo índice** na representação das tensões, uma vez que o referencial comum ou massa terá sempre um potencial de 0V, assim teremos:

$$\text{Tensão em } R_1 + R_2 \Leftrightarrow U_A \quad (\text{em relação á massa})$$

$$\text{Tensão em } R_2 \Leftrightarrow U_B \quad (\text{em relação á massa})$$

1 .Determinar a tensão na extremidade da resistência (U_a) para o circuito da figura 4.34.

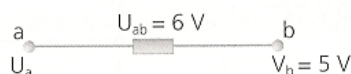


Figura 4.34 - Cálculo da tensão U_a

$$U_{AB} = U_A - U_B \Leftrightarrow U_A = U_{AB} + U_B \Leftrightarrow U_A = 6 + 5 = 11 \text{ V}$$

A tensão na extremidade (a) da resistência é de 11 V.

EXERCÍCIOS DE APLICAÇÃO - NOTAÇÃO DE REFERENCIAL COMUM (POTENCIAL NUM PONTO)

1. Determine os valores das tensões U_b , U_c e U_{ac} , no circuito seguinte - figura 4.35.

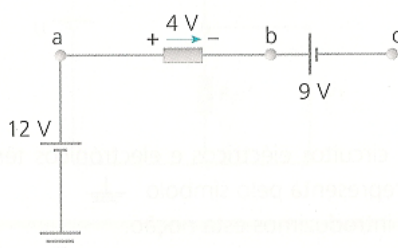


Figura 4.35 - Cálculo da tensão U_b , U_c e U_{ac} .

4.16 Geradores eléctricos

Os geradores de corrente contínua mais usuais são:

- As pilhas, que transformam a energia química nelas contida em energia eléctrica
- Os acumuladores, que igualmente transformam energia química em energia eléctrica, apresentando a vantagem relativamente às pilhas de serem recarregáveis, ou seja, podem funcionar como receptores de corrente eléctrica transformando energia eléctrica em energia química.
- Os dínamos (geradores mecânicos), que transformam energia mecânica em energia eléctrica
- Os geradores fotoeléctricos (células fotovoltaicas), que transformam energia luminosa em energia eléctrica

Características gerais: Força electromotriz e resistência interna de um gerador.

Vimos que a corrente eléctrica é originada na d.d.p. existente nos terminais do gerador. Enquanto existir essa d.d.p. manter-se-á a corrente eléctrica, isto é, existe no pólo negativo um excesso de electrões e no pólo positivo falta deles. É então necessário que o gerador realize internamente trabalho e consequentemente gaste energia. Daqui a necessidade do gerador dispor de energia para transformar em energia eléctrica.

Podemos dizer que a **força electromotriz (f.e.m.)** é a causa que cria e mantém uma d.d.p. nos terminais de um gerador. Essa f.e.m. existe nos terminais independentemente do gerador se encontrar ou não ligado a um circuito.

A f.e.m. mede-se pela d.d.p. existente nos seus terminais em circuito aberto, isto é, na ausência de corrente eléctrica.

A f.e.m. exprime-se em Volt e representa-se por E.

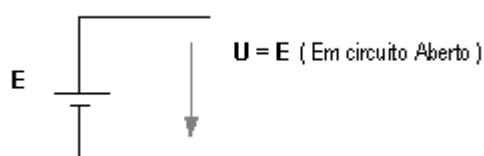


Figura 4.36 - Medição da força electromotriz

O valor da f.e.m. de um gerador, em circuito fechado, não coincide exactamente com o valor da tensão lida no receptor. Esta diferença deve-se ao facto do gerador apresentar uma certa oposição à passagem da corrente eléctrica, que passaremos a designar por **resistência interna do gerador (r_i)**. O valor desta resistência é normalmente baixo.

Essa resistência interna deve-se, no caso das pilhas e acumuladores, ao electrólito e, no caso dos dínamos, depende da resistência dos enrolamentos da máquina.

Analisemos a queda de tensão na resistência interna, consideremos o circuito seguinte:

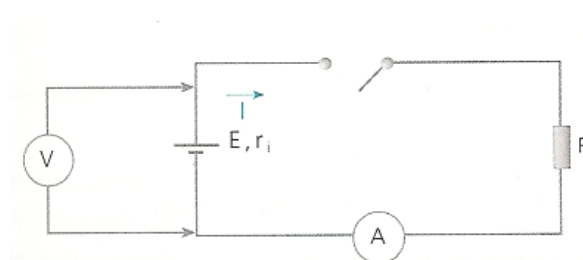


Figura 4.37 - Medição da força electromotriz num circuito

Se no circuito o interruptor se encontrar fechado, haverá passagem de corrente no circuito e consequentemente verificar-se-á na resistência interna do gerador, r_i , uma queda de tensão dada por :

$$U = r_i \times I$$

que se designa por **queda de tensão no interior do gerador.**

Assim, a d.d.p. que chegará ao circuito será então, a f.e.m. que o gerador gera menos a queda de tensão na resistência interna do gerador, ou seja:

$$U = E - r_i \times I$$

Esta expressão é designada por **Lei de ohm para um gerador**.

Podemos ainda definir qual a intensidade de corrente eléctrica no circuito, assim teremos:

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

Ou seja, os electrões ao circular no circuito encontra duas oposições á sua passagem, a resistência R e a resistência interna r_i .

Esquemáticamente, podemos desenhar o gerador da seguinte forma:

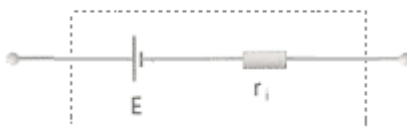


Figura 4.38 - Esquema equivalente de um gerador eléctrico

De notar que, estando o gerador desligado de qualquer circuito (gerador em vazio), a queda de tensão interna do gerador é nula, pois não há intensidade de corrente. Assim:

$$U = r_i \times I = 0$$

Daqui constata-se a definição introduzida na página anterior: **Quando o geradores está em circuito aberto a f.e.m é igual á d.d.p. nos seus terminais.**

$$E = U \quad (\text{Em circuito aberto})$$

Actualmente, os geradores de tensão, constituídos com componentes electrónicos, apresentam resistências internas praticamente nulas, pelo que deixa de ter sentido distinguir f.e.m. e tensão nos seus terminais.

1 .Um gerador fornece uma intensidade de corrente eléctrica de 0,8 A a um circuito, quando a sua d.d.p. é de 10,9 V. Sendo a sua f.em. de 12 V, calcule a sua resistência interna.

$$\begin{aligned} I &= 0,8 \text{ A} \\ U &= 10,9 \text{ V} \\ E &= 12 \text{ V} \\ r_i &= ? \end{aligned}$$

$$U = E - r_i \times I \Leftrightarrow 10,9 = 12 - r_i \times 0,8$$

$$\Leftrightarrow r_i = \frac{12 - 10,9}{0,8} = 1,375 \Omega$$

A resistência interna do gerador é de 1,375 Ω .

1. Um gerador tem uma f.e.m. de 20 V e uma resistência interna de 0,5 Ω . Sabendo que fornece uma intensidade de corrente eléctrica de 2 A, determine a tensão nos seus terminais.
2. Um dínamo com $E = 220 \text{ V}$ e resistência interna de 1 Ω alimenta um receptor térmico com resistência de 20 Ω . Calcule:
 - 2.1 A intensidade de corrente absorvida pelo receptor
 - 2.2 A tensão nos terminais do gerador.

4.16.1 . Rendimento eléctrico

O rendimento é definido, como vimos anteriormente, pela capacidade do gerador transformar a potência total que dispõe em potência útil para ser utilizada.

No caso de um gerador eléctrico teremos:

$$\eta = \frac{P_u}{P_{et}} = \frac{\text{Potência útil}}{\text{Potência eléctrica total}}$$

Onde:

Potência eléctrica total (P_{et}) = $E \times I$ (Potência total que o gerador dispõe)
Potência útil (P_u) = $U \times I$ (Potência que chega ao circuito)

Assim teremos:

$$\eta = \frac{P_u}{P_{et}} = \frac{U \times I}{E \times I} = \frac{U}{E} < 1$$

É usual apresentar o valor do rendimento em %. Como vimos anteriormente, o rendimento η não apresenta unidades.

1. Um gerador tem nos seus terminais a tensão de 50 V e a sua f.e.m. é de 52 V. Sabendo que a potência fornecida a uma carga é de 250 W, calcule:

1.1 O rendimento do gerador eléctrico.

$$\begin{aligned} U &= 50 \text{ V} \\ E &= 52 \text{ V} \\ \eta &= ? \end{aligned}$$

$$\eta = \frac{U}{E} \Leftrightarrow \eta = \frac{50}{52} \times 100$$

$$\Leftrightarrow \eta = 96,1\%$$

O rendimento eléctrico do gerador é de 96,1 %.

1.2 A potência de perdas.

$$\begin{aligned} P_u &= 250 \text{ W} \\ P_p &= ? \end{aligned}$$

- **Determinação da corrente eléctrica**

$$P_u = U \times I \Leftrightarrow 250 = 50 \times I \Leftrightarrow I = 5 \text{ A}$$

- **Cálculo da potência eléctrica total**

$$P_{et} = E \times I \Leftrightarrow P_{et} = E \times I \Leftrightarrow P_{et} = 52 \times 5 \Leftrightarrow P_{et} = 260 \text{ W}$$

$$P_{et} = P_u + P_p \Leftrightarrow P_p = P_{et} - P_u$$

$$\Leftrightarrow P_p = 260 - 250$$

$$\Leftrightarrow P_p = 10 \text{ W}$$

A potência de perdas é de 10 W.

1.3 A resistência interna.

$$\begin{aligned} U &= 50 \text{ V} \\ E &= 52 \text{ V} \\ I &= 5 \text{ A} \\ r_i &= ? \end{aligned}$$

$$U = E - r_i \times I \Leftrightarrow 50 = 52 - r_i \times 5$$

$$\Leftrightarrow r_i = \frac{50 - 52}{5} = 0,4 \Omega$$

A resistência interna do gerador é de $0,4 \Omega$.

EXERCÍCIO DE APLICAÇÃO - GERADORES e RENDIMENTO ELÉCTRICO

1. Um gerador fornece 44 W, com uma intensidade de corrente de 220 mA. Sabendo que o seu rendimento eléctrico é de 80%, calcule:
 - 1.1 A tensão nos terminais do gerador.
 - 1.2 A sua força electromotriz.
 - 1.3 A sua resistência interna.
 - 1.4 A potência absorvida e a potência de perdas.

4.16.2. Associação e geradores

Por vezes há necessidade de se conseguir uma d.d.p. ou uma corrente superior aos valores que se obtêm com um único gerador. Para isso ligam-se os geradores, respectivamente, em série ou em paralelo.

Associação em série

É efectuada ligando o **terminal positivo de cada gerador ao terminal negativo do seguinte**, de forma que fiquem disponíveis apenas dois pólos de sinais contrários correspondentes ao primeiro e ao último dos elementos que constituem o agrupamento.

A **f.e.m. total** é igual à **soma das f.e.ms de cada gerador**, sendo a **resistência interna total**, da mesma forma, a **soma das resistências internas de cada gerador**.

Se todos os geradores forem iguais teremos:

$$E_T = n \cdot E$$

$$r_{it} = n \cdot r_i$$

Em que n é o número de geradores associados em série.

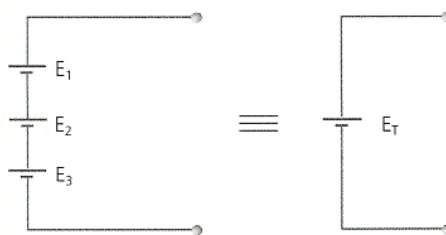


Figura 4.39 - Associação em série de geradores

Este tipo de agrupamento é usado quando se pretende aumentar a d.d.p.

EXERCÍCIO RESOLVIDOS

1. Três elementos de pilha de f.e.m. 1,5 V e resistência interna de 0,5 Ω estão ligados em série e alimentam um receptor de 7,5 Ω. Determine:

1.1 As características do gerador equivalente (f.e.m. total e resistência interna total).

$$\begin{aligned} E &= 1,5 \text{ V} \\ r_i &= 0,5 \Omega \\ E_T &= ? \\ r_{it} &= ? \end{aligned}$$

$$E_T = n \cdot E \Leftrightarrow E_T = 3 \times 1,5 \Leftrightarrow E_T = 4,5 \text{ V}$$

$$r_{it} = n \cdot r_i \Leftrightarrow r_{it} = 3 \times 0,5 \Leftrightarrow r_{it} = 1,5 \Omega$$

As características do gerador equivalente são: $E_T=4,5 \text{ V}$ e $r_{it}=1,5 \Omega$.

1.3 A intensidade da corrente no circuito.

$$\begin{aligned} E_T &= 4,5 \text{ V} \\ r_{it} &= 1,5 \Omega \end{aligned}$$

$$I = \frac{E}{R + r_{it}} \Leftrightarrow I = \frac{4,5}{7,5 + 1,5} \Leftrightarrow I = 0,5 \text{ A}$$

A intensidade de corrente eléctrica que percorre o circuito é de 0,5 A

1.3 A tensão nos terminais do receptor.

$$\begin{aligned} R &= 7,5 \Omega \\ I &= 0,5 \text{ A} \\ U &= ? \end{aligned}$$

$$U = R \times I \Leftrightarrow U = 7,5 \times 0,5 \Leftrightarrow U = 3,75 \text{ V}$$

A tensão nos terminais do receptor é de 3,75 V.

1. Para alimentar um determinado aparelho foi necessário associar em série seis geradores iguais sendo a f.e.m de cada um de 1,5 V e a resistência interna de 0,1 Ω . Defina as características de um gerador equivalente á associação utilizada.

Associação em paralelo

Ligam-se todos os terminais positivos ao mesmo ponto e todos os terminais negativos a um outro ponto, constituindo, respectivamente, o terminal positivo e o terminal negativo do agrupamento.

Este tipo de agrupamento exige que todos os geradores sejam iguais, caso contrário verificar-se-ão correntes de circulação entre eles.

Neste caso, a f.e.m. total do agrupamento é a de cada gerador, ou seja:

$$E_T = E_1 = E_2 = E_3 = \dots = E_n$$

Como todas as resistências internas são iguais a resistência interna total será obtida da seguinte forma:

$$r_{it} = \frac{r_i}{n}$$

A intensidade de corrente fornecida pelo agrupamento equivalente será:

$$I_T = n \times I$$

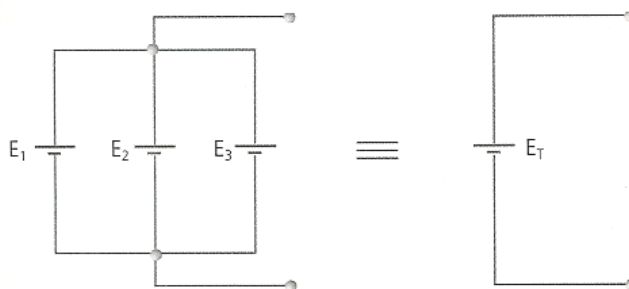


Figura 4.40 - Associação em paralelo de geradores

Este tipo de agrupamento é usado quando se pretende aumentar a corrente .

1. Associaram-se em paralelo 2 geradores, tendo cada um uma f.e.m. de 12 V e resistência interna de 0,2 Ω. Este agrupamento alimenta uma resistência com valor igual a 14,9 Ω. Calcule:

1.1 As características do gerador equivalente.

$$\begin{aligned} E &= 12 \text{ V} \\ r_i &= 0,2 \text{ } \Omega \\ E_T &= ? \\ r_{it} &= ? \end{aligned}$$

$$E_T = E = 12 \text{ V}$$

$$r_{it} = \frac{r_i}{n} \Leftrightarrow r_{it} = \frac{0,2}{2} \Leftrightarrow r_{it} = 0,1 \text{ } \Omega$$

As características do gerador equivalente são: $E_T = 12 \text{ V}$ e $r_{it} = 0,1 \text{ } \Omega$.

1.2 A intensidade absorvida pelo receptor.

$$\begin{aligned} E_T &= 12 \text{ V} \\ r_{it} &= 0,1 \text{ } \Omega \end{aligned}$$

$$I = \frac{E}{R + r_{it}} \Leftrightarrow I = \frac{12}{14,9 + 0,1} \Leftrightarrow I = 0,8 \text{ A}$$

A intensidade de corrente eléctrica fornecida á resistência é de 0,8 A

1.3 A tensão nos terminais do gerador.

$$\begin{aligned} E &= 12 \text{ V} \\ I &= 0,8 \text{ A} \\ r_i &= 0,1 \text{ } \Omega \\ U &= ? \end{aligned}$$

$$U = E - r_i \times I \Leftrightarrow U = 12 - 0,1 \times 0,8 \Leftrightarrow U = 11,92 \text{ V}$$

A d.d.p. nos terminais do gerador é de 11,92 V.

1. Três geradores idênticos estão associados em paralelo, tendo cada um $E = 12 \text{ V}$ e uma resistência interna 0,1 Ω. Determinar a corrente fornecida a uma carga de 39 Ω.

4.17. Fontes de tensão e fontes de corrente. Características principais.

Fonte de tensão

Se um gerador tiver uma força electromotriz e uma resistência interna R_i , apresenta nos seus terminais uma tensão que depende da corrente estabelecida no circuito.

Se o gerador tiver uma resistência interna nula, $R_i = 0$, então essa tensão será constante e igual à força electromotriz.

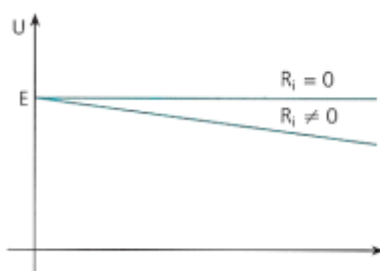


Figura 4.41 - Características da fonte de tensão ideal ($R_i = 0$) e real ($R_i \neq 0$)

Na análise e síntese de circuitos eléctricos é normal substituir as fontes reais de energia pelas equivalentes ideais.

Uma fonte real de tensão ou gerador de tensão é constituído por, uma fonte ideal de tensão com f.e.m. igual à da fonte real, em série com uma resistência igual à resistência interna da fonte real.

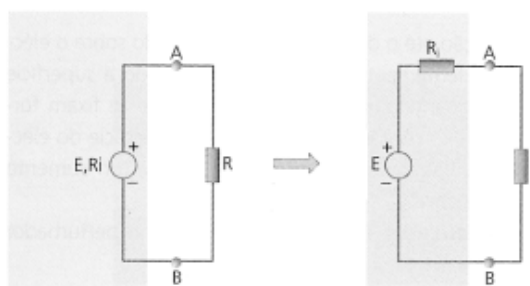


Figura 4.42 - Fonte de tensão real e sua equivalente

Fonte de corrente

Se num gerador a força electromotriz E e a sua resistência interna R_i crescerem indefinidamente, a corrente fornecida tende a ser constante, independentemente da carga que está a ser percorrida por essa corrente. Em termos gráficos corresponde ao facto de a recta da figura seguinte se tornar cada vez mais vertical.

Note-se que o quociente de duas grandezas infinitamente grandes é aqui considerado como o valor finito $I_k = E / R_i$.

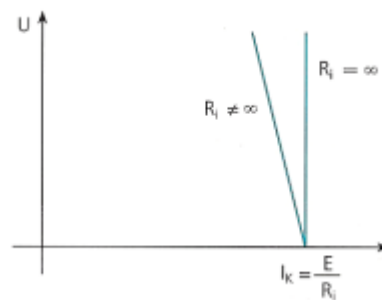


Figura 4.43 - Características da fonte de corrente ideal ($R_i = \infty$) e real ($R_i \neq \infty$)

Analogamente, ao que fizemos para a fonte de tensão real, podemos determinar o equivalente para a fonte de corrente.

Uma fonte real de corrente ou gerador de corrente é constituído por, uma fonte ideal de corrente debitando uma corrente $I_k = E / R_i$, em paralelo com uma resistência igual à resistência interna da fonte real. A seta no interior do círculo indica o sentido positivo da corrente.

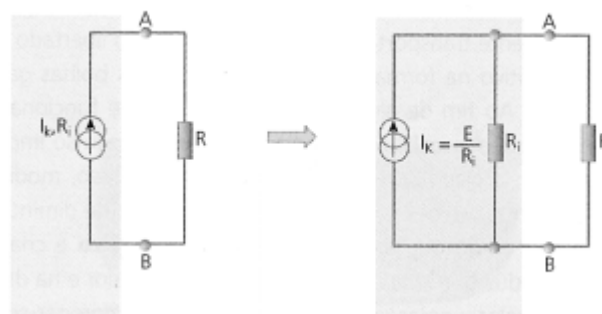


Figura 4.44 - Fonte de corrente real e sua equivalente

NOTA: Uma fonte ideal de tensão não pode ser substituída por uma fonte ideal de corrente.

4.18 Condensadores

O condensador é um componente utilizado na electrónica cuja principal função é o armazenamento de energia eléctrica.

São constituídos, basicamente, de duas placas de metal separadas por um material isolante chamado de dieléctrico. A cada uma dessas placas de metal é ligado um fio que constituem os terminais do condensador.

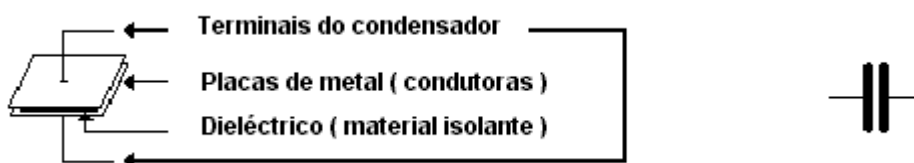


Figura 4.45 - Esquema interno de um condensador (à esquerda). Símbolo do condensador.

Capacidade de um condensador

À propriedade do condensador armazenar cargas eléctricas ou energia eléctrica dá-se o nome de **capacidade**. Quanto maior o seu valor, maior será a quantidade de cargas eléctricas que o condensador pode armazenar.

A capacidade representa-se por **C**. Exprime-se em Farad (**F**).

Múltiplo/ Submúltiplo	Símbolo	Valor
microFarad	μF	10^{-6}
nanoFarad	nF	10^{-9}
picoFarad	pF	10^{-12}

Tabela 4.6 - Submúltiplos

O valor da intensidade de corrente eléctrica é dado pela expressão:

$$C = \frac{Q}{U} \quad \text{F (Farad)}$$

em que:

C - Capacidade - Farad (**F**)

Q - Carga eléctrica - (**C**)

U - Tensão aplicada - (**V**)

Intensidade de campo eléctrico

Entre duas armaduras carregadas existe um campo eléctrico, que será uniforme se as armaduras forem paralelas. O valor da intensidade do campo E é igual ao quociente da tensão U entre as duas armaduras pela distância L entre elas.

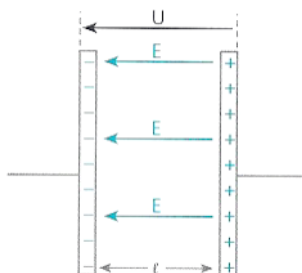


Figura 4.46 - Campo eléctrico num condensador

A expressão que exprime a intensidade de campo eléctrico é a seguinte:

$$E = \frac{U}{L} \quad \text{V / m (Volt / metro)}$$

onde:

- E - Campo eléctrico - Volt / metro (V / m)
- U - Tensão entre as armaduras - (V)
- L - Distancia entre as armaduras - (m)

Energia armazenada

A energia armazenada por um condensador é:

$$W = \frac{1}{2} \cdot C \cdot U^2 = W = \frac{1}{2} \cdot Q \cdot U$$

em que:

- W - Energia - Joule (J)
- C - Capacidade - (F)
- Q - Carga eléctrica - (C)
- U - Tensão aplicada - (V)

A energia armazenada depende da tensão aplicada aos terminais do condensador. Por sua vez, a tensão máxima depende, da natureza e espessura do dieléctrico.

A tensão aplicada, ao ultrapassar determinado valor, fará surgir um arco eléctrico entre as armaduras que perfurará o isolante e, no caso de este ser sólido, destruirá o condensador. Diz-se que se ultrapassou a tensão disruptiva ou rigidez dieléctrica do isolante.

A rigidez dieléctrica é a máxima tensão que se pode aplicar aos terminais do condensador sem que este se danifique. Exprime-se em MV / m ou em KV / mm.

1 .Determinar a carga de um condensador de 22 μF quando alimentado à tensão de 12 V.

$$C = 22 \mu\text{F}$$

$$U = 12 \text{ V}$$

$$Q = ?$$

$$C = \frac{Q}{U} \Leftrightarrow Q = C \cdot U \Leftrightarrow Q = 22 \times 10^{-6} \times 12$$

$$\Leftrightarrow Q = 264 \times 10^{-6} \text{ C} = 264 \mu\text{C}$$

A carga do condensador é de 264 μC .

1. Na figura 4.47 representa-se uma parte de um circuito electrónico contendo um transistor. Sendo a capacidade $C = 47 \mu\text{F}$ e a carga que adquire 84,6 μC , determine o potencial do ponto E em relação á massa.

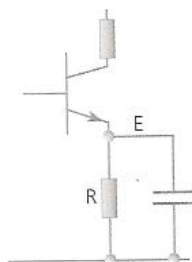


Figura 4.47 – Circuito electrónico

2. Qual a carga que adquire um condensador MKT 0,1 μF / 160 V quando submetido à tensão máxima?

4.18.1 Análise de circuitos com condensadores

Uma forma simples de fixar a associação de condensadores, é o facto de, no cálculo da **capacidade total C_T** , **ser o inverso das resistências**, ou seja o circuito série de condensadores é idêntico ao circuito paralelo de resistências, verificando-se o mesmo para circuitos paralelos de condensadores que são idênticos aos circuitos série de resistências

Relativamente, á **quantidade de electricidade Q** , esta varia de forma **semelhante á intensidade** nos circuitos com resistências, devendo-se isto ao facto que a que a intensidade de corrente, como vimos nas primeiras aulas, é igual á quantidade de electricidade que passa numa secção transversal de um condutor num intervalo de tempo: **$I = Q / t$** .

A **tensão varia de igual forma aos circuitos com resistências**, sendo a soma das varias tensões nos circuitos série e, constante em circuitos em paralelo.

Circuitos série

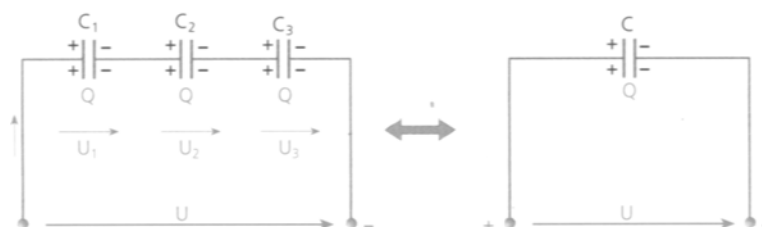


Figura 4.48 - Associação em série de condensadores e seu equivalente

A fonte de energia carrega as armaduras C_1 e C_3 , a que está ligada com a mesma **quantidade de electricidade**. Nas outras armaduras a carga é idêntica, pelo que, facilmente, se conclui serem idênticas as cargas nos diversos condensadores :

$$Q_1 = Q_2 = Q_3$$

A **tensão** divide-se pelos condensadores 1, 2 e 3 logo, a tensão total será a soma da tensão no condensador 1 mais, a tensão no condensador 2, mais a tensão no condensador 3.

$$U_T = U_1 + U_2 + U_3$$

Na combinação em série, como foi dito anteriormente, a **capacidade** equivalente é:

$$\frac{1}{C_T} = \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} + \frac{1}{C_3} + \dots + \frac{1}{C_n}$$

No caso particular, de **2 condensadores** poderemos utilizar a seguinte expressão:

$$C_T = \frac{C_1 \times C_2}{C_1 + C_2}$$

A capacidade equivalente é sempre inferior a cada um dos condensadores agrupados.

Circuitos paralelo

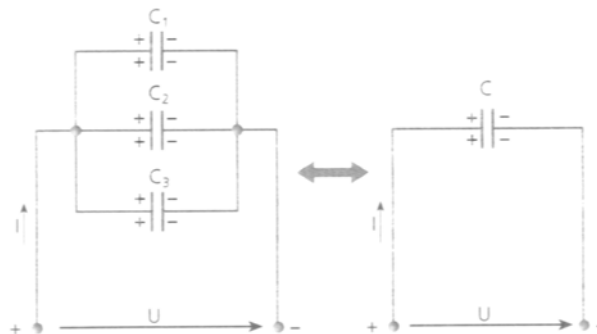


Figura 4.49 - Associação em paralelo de condensadores e seu equivalente.

A carga total do conjunto será igual à soma das cargas de cada condensador:

$$Q_T = Q_1 + Q_2 + Q_3$$

Nos circuitos paralelo temos sempre dois pontos comuns, logo a **tensão** que chegará a cada condensador será sempre a mesma logo, diremos que esta é constante ao longo do circuito.

$$U_T = U_1 = U_2 = U_3$$

Sendo C a capacidade equivalente teremos:

$$C_T = C_1 + C_2 + C_3$$

Ou, generalizando:

$$C_T = \sum_{i=1}^n C_i$$

A capacidade equivalente é sempre superior a cada um dos condensadores agrupados.

1 .Agrupamos três condensadores de 10 μ F, 12 μ F e 47 μ F com tensão nominal de 16 V. Determine:

1.1 A capacidade equivalente.

$$\begin{aligned} C_1 &= 10 \mu\text{F} \\ C_2 &= 12 \mu\text{F} \\ C_3 &= 47 \mu\text{F} \\ C_T &= ? \end{aligned}$$

$$\frac{1}{C_T} = \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} + \frac{1}{C_3} \Leftrightarrow \frac{1}{C_T} = \frac{1}{10} + \frac{1}{12} + \frac{1}{47}$$

$$\Leftrightarrow \frac{1}{C_T} = \frac{1154}{5640} \Leftrightarrow C_T = \frac{5640}{1154} = 4,89 \mu\text{F}$$

1.2 A carga armazenada quando se aplica ao conjunto dos condensadores 12 V.

$$C_T = 25 \mu\text{F}$$

$$U = 12 \text{ V}$$

$$C = \frac{Q}{U} \Leftrightarrow Q = C \cdot U \Leftrightarrow Q = 4,89 \times 10^{-6} \times 12$$

$$\Leftrightarrow Q = 58,68 \times 10^{-6} \text{ C} = 58,68 \mu\text{C}$$

A carga do conjunto dos condensador é de 58,68 μC .

1.3 A tensão nos terminais de cada condensador

$$C_1 = 10 \mu\text{F}$$

$$C_2 = 12 \mu\text{F}$$

$$C_3 = 47 \mu\text{F}$$

$$C = \frac{Q}{U} \Leftrightarrow U = \frac{Q}{C_1} \Leftrightarrow U = \frac{58,68 \times 10^{-6}}{10 \times 10^{-6}} \Leftrightarrow U = 5,868 \text{ V}$$

$$U = \frac{Q}{C_2} \Leftrightarrow U = \frac{58,68 \times 10^{-6}}{12 \times 10^{-6}} \Leftrightarrow U = 4,89 \text{ V}$$

$$U = \frac{Q}{C_2} \Leftrightarrow U = \frac{58,68 \times 10^{-6}}{47 \times 10^{-6}} \Leftrightarrow U = 1,24 \text{ V}$$

$$U_T = U_1 + U_2 + U_3 \Leftrightarrow U_T = 5,868 + 4,89 + 1,24 = 12 \text{ V}$$

A tensão em cada condensador é respectivamente 5,868 V, 4,89 V e 1,24 V.

2 .Associaram-se em paralelo dois condensadores de 10 μF e 15 μF , 16 V. Calcule:

2.1 A capacidade equivalente.

$$C_1 = 10 \mu\text{F}$$

$$C_2 = 15 \mu\text{F}$$

$$C_T = C_1 + C_2 \Leftrightarrow C_T = 10 + 15 \Leftrightarrow C_T = 25 \mu\text{F}$$

A capacidade equivalente é de 25 μF .

2.2 A carga armazenada quando o conjunto é alimentado a 12 V.

$$C_T = 25 \mu\text{F}$$

$$U = 12 \text{ V}$$

$$C = \frac{Q}{U} \Leftrightarrow Q = C \cdot U \Leftrightarrow Q = 25 \times 10^{-6} \times 12$$

$$\Leftrightarrow Q = 300 \times 10^{-6} \text{ C} = 300 \mu\text{C}$$

A carga armazenada pela associação série é de 300 μC .

2.3 A carga adquirida por cada um dos condensadores.

$$C_1 = 10 \mu\text{F}$$

$$C_2 = 15 \mu\text{F}$$

$$U = 12 \text{ V}$$

$$Q = C_1 \cdot U \Leftrightarrow Q = 10 \times 10^{-6} \times 12$$

$$\Leftrightarrow Q = 120 \times 10^{-6} \text{ C} = 120 \mu\text{C}$$

$$Q = C_2 \cdot U \Leftrightarrow Q = 15 \times 10^{-6} \times 12$$

$$\Leftrightarrow Q = 180 \times 10^{-6} \text{ C} = 180 \mu\text{C}$$

A carga adquirida pelo condensador C_1 é de 120 μC e pelo condensador C_2 de 180 μC .

EXERCÍCIOS DE APLICAÇÃO - ANÁLISE DE CIRCUITO COM CONDENSADORES

1. Dispõe-se de dois condensadores de poliéster MKT, de 0,15 μF / 100 V. Agrupam-se sucessivamente, em paralelo e em série, aplicando-se, de cada vez, a máxima tensão que o agrupamento suporta. Determinar para cada montagem:

- 1.1 A capacidade equivalente.
- 1.2 A máxima tensão aplicável.
- 1.3 A quantidade de electricidade (Q) armazenada.
- 1.4 A energia armazenada.

NOTA: Desenhe os esquemas das montagens.

2. Dispomos de vários condensadores de 1 nF e 10 nF. Realize o agrupamento para se obter uma capacidade de 7 nF.

3. Agruparam-se em paralelo os seguintes condensadores: $1,2 \mu\text{F}$, $15 \mu\text{F}$ e $3,3 \mu\text{F}$ e aplicou-se a d.d.p. de $7,8 \text{ V}$. Determine:

- 3.1 A capacidade equivalente do agrupamento.
- 3.2 A carga armazenada por cada condensador.
- 3.3 A carga total armazenada.

4. Analise o circuito misto (série + paralelo) da figura 4.50 e determine:

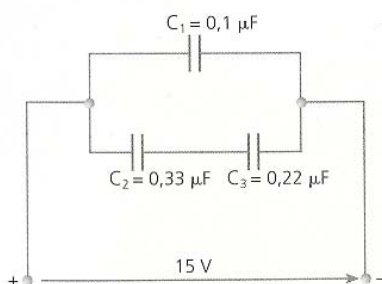


Figura 4.50 - Circuito misto em análise

- 4.1 A capacidade equivalente.
- 4.2 A tensão nos terminais do condensador C_3 .
- 4.3 A carga do condensador C_1 .
- 4.4 A energia armazenada por cada condensador.

5. A associação de condensadores da figura 4.51, onde $C_1 = 3 \mu\text{F}$, $C_2 = 4 \mu\text{F}$ e $C_3 = 2 \mu\text{F}$, é submetida á tensão de 15 V . Calcule:

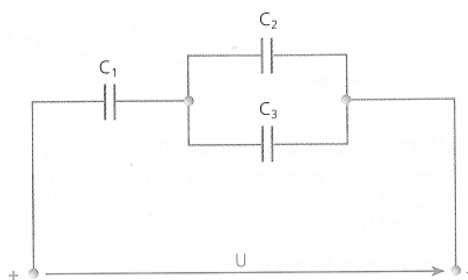


Figura 4.51 - Circuito misto

- 5.1 A capacidade equivalente do agrupamento.
- 5.2 A carga total armazenada.
- 5.3 A tensão nos terminais de cada condensador.
- 5.4 A carga armazenada por cada condensador.

4.18.2 Condensadores em corrente contínua.

Carga de um condensador

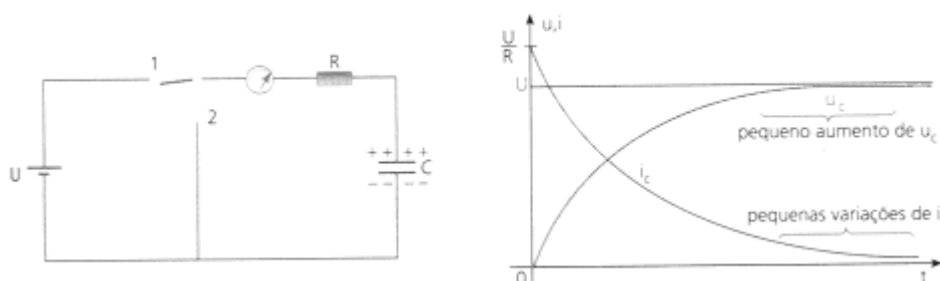


Figura 4.51 - Curvas de carga de um condensador e da corrente no circuito.

Ao ligarmos um circuito constituído por um condensador e um galvanómetro (instrumento capaz de detectar a passagem da corrente eléctrica), como o da figura acima, aos terminais de um gerador de corrente contínua, a f.e.m. do gerador provoca o movimento de grande número de electrões de uma armadura para outra através do circuito.

No instante da ligação a intensidade da corrente de carga tem o seu valor máximo. Um grande número de electrões são deslocados da armadura negativa para a armadura positiva, sendo atraídos pelo pólo positivo do gerador, que lança igual quantidade na outra armadura que se vai carregando negativamente. A intensidade de corrente é pois, de elevado valor, decrescendo rapidamente até se anular.

A quantidade de electricidade aumenta à medida que se vai efectuando a carga, fazendo aumentar a tensão U_c aos terminais do condensador. Quando U_c iguala U , cessa a corrente no circuito. O ponteiro do galvanómetro, que se deslocou bruscamente num sentido, indica agora o zero. Desligando o comutador da posição 1, o condensador mantém-se carregado.

Descarga do condensador

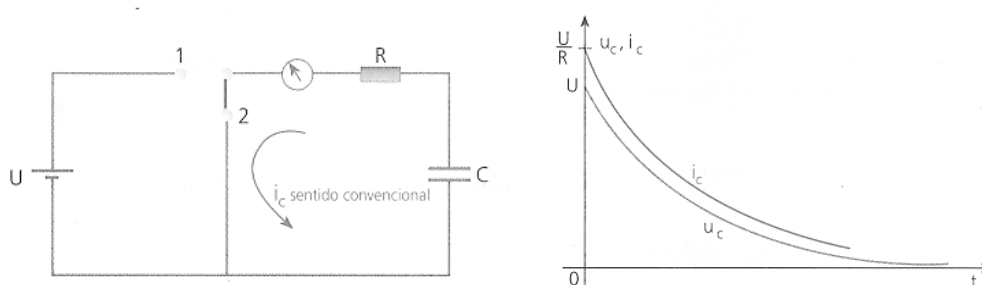


Figura 4.52 - Curvas de descarga de um condensador e respectivas formas de U_c e I .

Passando o comutador à posição 2, as armaduras do condensador são ligadas entre si, pelo que se inicia a descarga. O ponteiro do galvanómetro desloca-se em sentido contrário ao da carga.

A grande quantidade de electrões em excesso na armadura negativa passa para a armadura positiva através do circuito. De início esta corrente é bastante intensa, mas gradualmente o ponteiro vai regressando a zero, o que sucede quando também é nula a tensão entre as armaduras.

4.18.3 Constante de tempo τ

Ao aplicarmos a tensão U_{in} ao circuito figura 4.53, o condensador vai carregar-se mais ou menos rapidamente, conforme os valores de R e C.

Como vimos atrás, no instante da ligação o condensador comporta-se como um curto-circuito. Com o aumento da carga, a tensão U_c aumenta, até atingir o valor da tensão de alimentação, ficando a tensão U_R nula. **A carga será tanto mais rápida, quanto menores forem os valores de R e C.**

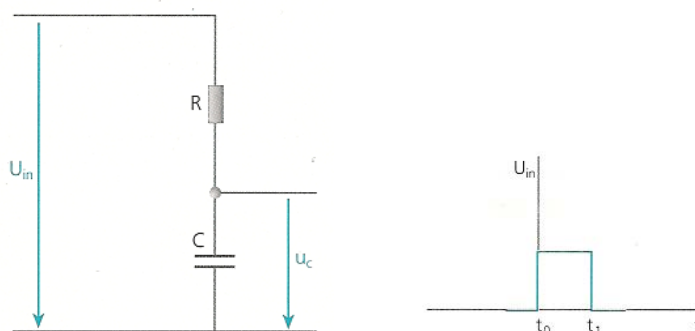


Figura 4.53 - Circuito de análise da carga e descarga de um condensador e respectiva forma da tensão U_{in} .

Assim, o produto $R C$ designa-se por constante de tempo do circuito, que se representa por:

$$\tau = R \cdot C$$

A variação da tensão no condensador, assim como a variação da corrente no circuito estão representadas na figura 4.54.

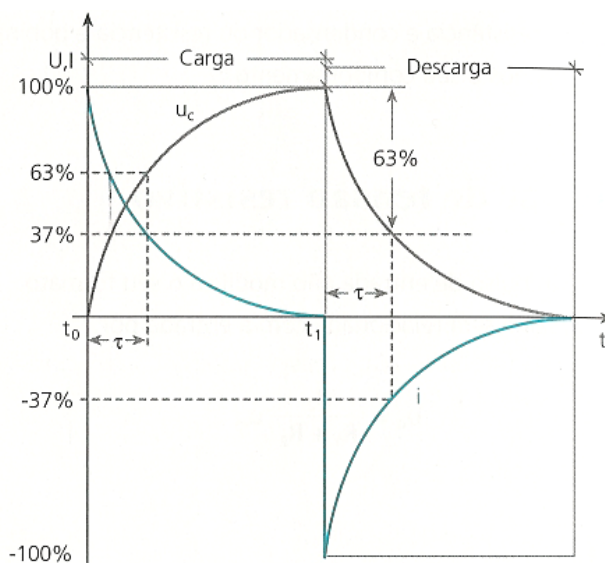


Figura 4.54 - Gráfico de carga e descarga de um condensador e respectivos valores de τ

No instante t_0 , a tensão U_{in} é aplicada ao circuito carregando, conseqüentemente, o condensador. No instante t_1 o condensador está na sua fase de descarga .

A constante de tempo de um circuito define-se como o tempo necessário para que a tensão atinja 63 % da sua variação total, ou para que a corrente atinja 37 % do seu valor inicial.

EXERCÍCIOS DE APLICAÇÃO - CONDENSADORES EM CORRENTE CONTÍNUA

1. Um circuito electrónico denominado como integrador possui na sua constituição uma resistência $R=3,3K\Omega$ em série com um condensador de capacidade igual a $0,022 \mu F$. Calcule a constante de tempo do circuito.



Capítulo 5 – Electroquímica

A electroquímica refere-se à parte química que trata da relação entre correntes eléctricas e reacções químicas, e da transformação de energia química em eléctrica e vice-versa. No seu sentido mais amplo, electroquímica é o estudo das reacções químicas que produzem efeitos eléctricos e do fenómeno químico causado pela acção de correntes eléctricas.

5.1 Electrólise

A água e muitas soluções aquosas, principalmente, as substâncias orgânicas (açúcar, álcool, etc.) tem uma condutividade eléctrica muito pequena. Mas há outras soluções aquosas de ácidos, bases e sais que conduzem bem eléctrica.

Deve-se ao químico Arrhenius a explicação deste fenómeno, segundo ele, as moléculas do soluto acham-se total ou parcialmente sob a forma de iões livres possuidores de cargas positivas e negativas

A separação das moléculas nos iões que as constituem chama-se dissociação electrolítica.

A dissociação é reversível, isto é, os iões podem voltar a juntar-se.

Assim poderemos encontrar, soluções de ácidos (clorídrico, sulfúrico, etc.), de bases e de muitos sais que são bons condutores da electricidade. Tais substâncias chamam-se **electrólitos fortes**.

Outras substâncias como o ácido acético, hidróxido de amónio, etc. apresentam condutividade muito menor em soluções na mesma concentração do que os electrólitos fortes. Recebem o nome de **electrólitos fracos**.

Consideremos um circuito simples, como o ilustrado na figura, constituído por um gerador e um amperímetro, ligados por fios condutores a dois eléctrodos que mergulham num líquido condutor.

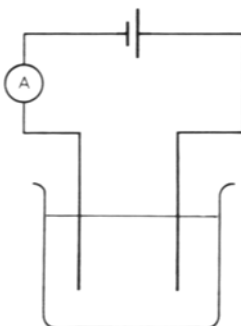


Figura 5.1 - Circuito eléctrico

A **condução da corrente eléctrica** neste circuito é assegurada por :

- Na **parte sólida**, por electrões livres.
- Na **parte líquida**, por iões positivos e iões negativos movendo-se ordenadamente em sentidos opostos.
- Entre a **parte sólida e a parte líquida**, por reacções químicas que ocorrem na superfície e contacto entre o líquido e os condutores sólidos nele mergulhados (eléctrodos)

São estas reacções químicas, designadas por reacções de eléctrodo, que no seu conjunto, constituem o que se designa por **electrólise**.

Na **electrólise ocorre então a decomposição de algumas substâncias pela electricidade** através da passagem de uma corrente eléctrica. A fim de manter a corrente, é necessário um circuito completo, como ilustrado na figura 5.1. O processo é o seguinte:

1. Pelo condutor metálico vão electrões para o cátodo
2. Os **iões positivos**, ou **catiões**, dirigem-se para o eléctrodo negativo, ou cátodo , e aceitam electrões; este ganho de electrões denomina-se **redução**.
3. Os iões **negativos**, ou **aniões**, dirigem-se para o pólo positivo, ou ânodo, ao qual cedem electrões; esta perda denomina-se **oxidação**.
4. Estes electrões dirigem-se pelo condutor metálico para a bateria e para o cátodo, completando-se assim o circuito.

Para melhor se compreender este processo, analisemos o caso concreto da passagem da corrente eléctrica através da **solução de cloreto de chumbo (PbCl₂)** – electrólito, utilizando uma montagem idêntica à anterior em que os eléctrodos são de grafite.

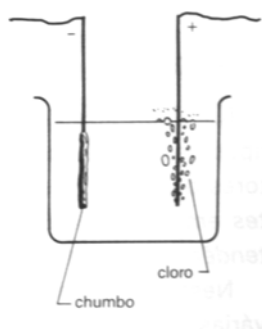
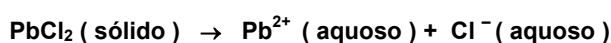


Figura 5.2 - Electrólise (Electrólito - cloreto de chumbo)

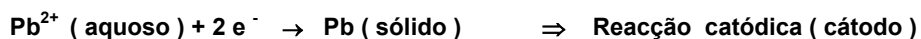
Quando se estabelece o circuito, observa-se que no **cátodo** (eléctrodo negativo) se deposita chumbo, ao mesmo tempo que no **ânodo** (eléctrodo positivo) se desprende o gás cloro, detectável pelo cheiro característico. Estas observações interpretam-se, da seguinte forma:

Durante a dissolução do cloreto de chumbo PbCl₂, vão-se quebrar as ligações entre os iões Pb²⁺ e Cl⁻, estes vão adquirir mobilidade na massa líquida:

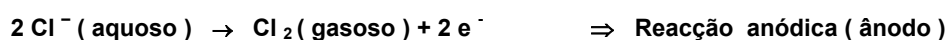


Por acção do campo eléctrico estabelecido no líquido, constatamos que :

Os **iões positivos Pb^{2+}** dirigem-se para o pólo negativo (**cátodo**), já que cargas com sinal iguais repelem-se e, cargas com sinais contrários atraem-se, e aí recebem 2 electrões vindos do eléctrodo, originando átomos de chumbo:



Os **iões negativos Cl^{-}** dirigem-se para o eléctrodo positivo (**ânodo**) e aí depositam electrões que entram na corrente eléctrica. Deste modo, os iões cloro dão origem a átomos de cloro, os quais, pelas suas características se associam em moléculas diatómicas:



Durante este processo, **deposita-se chumbo no cátodo**, e forma-se cloro no ânodo.

5.2 Aplicações industriais da electrólise

A electrólise é utilizada em diversos processos industriais, por exemplo, na **obtenção de cobre** para fabrico dos cabos eléctricos, na **obtenção do alumínio**, entre outras, os quais passaremos a enumerar:

- **Fabricação de produtos químicos**

O cloro e a soda cáustica são um exemplo de produtos químicos que se obtêm pela electrólise de uma solução de cloreto de sódio.

Também o hidrogénio e o oxigénio podem ser obtidos a partir de uma solução aquosa de ácido sulfúrico ou potassa cáustica.

Vamos analisar este ultimo exemplo. Suponhamos o electrólito uma solução de ácido sulfúrico, como mostra a figura abaixo.

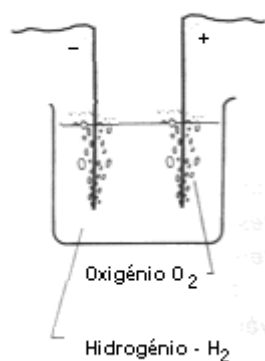
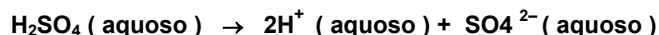
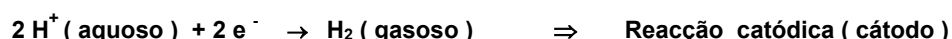


Figura 5.3 - Electrólise (Electrólito - ácido sulfúrico)

Durante a dissolução do ácido sulfúrico H_2SO_4 , vão-se quebrar as ligações intermoleculares e transformar-se nos iões H^+ e SO_4^{2-} :



O ião H^+ é atraído pelo eléctrodo negativo onde recebe dois electrões e passa a átomo neutro H_2 .

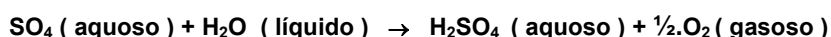


assim, no cátodo vai libertar-se hidrogénio.

O ião SO_4^{2-} é atraído pelo eléctrodo positivo ao qual entrega dois electrões passando a radical SO_4 .



como o radical SO_4 não existe na sua forma livre irá reagir com a água através da seguinte reacção química:



o oxigénio formado liberta-se junto ao ânodo e o ácido sulfúrico é assim regenerado. Há assim, libertação de oxigénio e hidrogénio. O ácido sulfúrico é regenerado e só a água diminui de volume.

- **Obtenção de um grande número de metais**

Um grande número de metais é obtido a partir da electrólise dos seus sais fundidos. O alumínio é exemplo disso. Este é obtido a partir da electrólise da alumina (Al_2O_3) fundida.

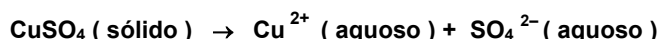
- **Purificação de diversos metais**

Muitos metais, e em particular, o cobre são purificados pela electrólise. Usa-se como ânodo o metal que se quer purificar, como electrólito um sal desse metal e como cátodo esse metal puro.

Exemplo:

Suponhamos que queremos purificar o cobre. Para tal, usamos um ou mais ânodos de cobre, o qual se quer purificar, alternados com cátodos de folhas finas de cobre puro. O electrólito poderá ser de sulfato de cobre.

Assim obteremos:



Os iões de cobre (Cu^{2+}) são atraídos pelos cátodos (folhas de cobre) onde recebem dois electrões e se transformam em átomos de cobre (Cu) que aderem às folhas.

Os iões SO_4^{2-} são atraídos pelos ânodos onde entregam os dois electrões e transformam-se no radical SO_4 que, como já vimos anteriormente, não se encontra nesta forma, reagindo este com o cobre dos eléctrodos formando, novamente, Cu SO_4 que se dissolverá na solução

Desta forma, os cátodos aumentam de volume e os ânodos diminuem. As impurezas resultantes deste processo, depositar-se-ão no fundo do recipiente.

- **Galvanostegia**

Consiste em recobrir um objecto de metal com uma camada de outro metal, a fim de melhorar as suas características. Exemplos deste processo são: Cromagem, prateação, douradura, niquelagem, etc.

- **Galvanoplastia**

Consiste em reproduzir em metal pela electrólise certos objectos, como medalhas, estatuetas, etc., a partir de um molde apropriado.

O molde de plástico, cera, etc. é revestido de uma fina camada de grafite ou película metálica com o fim de o tornar condutor e constituir o cátodo.

O ânodo é uma placa de metal que irá constituir o objecto e o electrólito um sal deste metal.

5.3 Pilhas e Acumuladores

As pilhas são dispositivos que utilizam o movimento dos electrões libertados em certas reacções para produzir energia eléctrica.

Uma pilha eléctrica transforma energia química em energia eléctrica. É constituída, basicamente, por um electrólito e dois eléctrodos condutores com naturezas diferentes, que formam os pólos ou terminais da pilha.

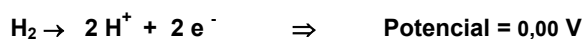
Os electrões são retirados dum eléctrodo e fornecidos ao outro, sendo transportados pelos iões do electrólito. Assim, os dois eléctrodos ficam a potenciais diferentes.

5.3.1 Potencial electroquímico

Quando se colocam em contacto com um electrólito dois metais diferentes, carvão e hidrogénio, por exemplo, vai aparecer entre eles uma diferença de potencial.

Podemos medir sempre a diferença de potencial entre dois eléctrodos, mas não podemos medir o potencial de um só eléctrodo. O que se pode fazer é escolher um eléctrodo padrão e referir os potenciais dos outros em relação a esse padrão.

A esses potenciais dá-se o nome de **potenciais electroquímicos**. O eléctrodo de referência escolhido é o eléctrodo de hidrogénio.



Electrões, iões	Reação de eléctrodo	Potencial (V)
Li, Li ⁺	Li \rightleftharpoons Li ⁺ + e ⁻	-3,04
K, K ⁺	K \rightleftharpoons K ⁺ + e ⁻	-2,92
Na, Na ⁺	Na \rightleftharpoons Na ⁺ + e ⁻	-2,71
Mg, Mg ⁺⁺	Mg \rightleftharpoons Mg ⁺⁺ + 2e ⁻	-2,4
Al, Al ⁺⁺⁺	Al \rightleftharpoons Al ⁺⁺⁺ + 3e ⁻	-1,7
Zn, Zn ⁺⁺	Zn \rightleftharpoons Zn ⁺⁺ + 2e ⁻	-0,76
Fe, Fe ⁺⁺	Fe \rightleftharpoons Fe ⁺⁺ + 2e ⁻	-0,44
Cd, Cd ⁺⁺	Cd \rightleftharpoons Cd ⁺⁺ + 2e ⁻	-0,40
Ni, Ni ⁺⁺	Ni \rightleftharpoons Ni ⁺⁺ + 2e ⁻	-0,25
Sn, Sn ⁺⁺	Sn \rightleftharpoons Sn ⁺⁺ + 2e ⁻	-0,13
Pb, Pb ⁺⁺	Pb \rightleftharpoons Pb ⁺⁺ + 2e ⁻	-0,12
H ₂ , H ⁺	H ₂ \rightleftharpoons 2H ⁺ + 2e ⁻	0,00
Cu, Cu ⁺⁺	Cu \rightleftharpoons Cu ⁺⁺ + 2e ⁻	0,34
Ag, Ag ⁺	Ag \rightleftharpoons Ag ⁺ + e ⁻	0,80
Hg, Hg ⁺⁺	Hg \rightleftharpoons Hg ⁺⁺ + 2e ⁻	0,86
O ₂ , H ₃ O ⁺	6H ₂ O \rightleftharpoons O ₂ + 4H ₃ O ⁺ + 4e ⁻	1,23
Cl ₂ , Cl ⁻	2Cl ⁻ \rightleftharpoons Cl ₂ + 2e ⁻	1,36
Au, Au ⁺	Au \rightleftharpoons Au ⁺ + e ⁻	1,5

Figura 5.4 - Potenciais electroquímicos

De realçar que, dois eléctrodos de materiais iguais não apresentam diferença de potencial.

5.3.2 Capacidade e tipos de pilhas

Entende-se por capacidade a possibilidade que a pilha possui em fornecer determinada corrente durante um certo tempo. Mede-se em ampere - hora (Ah) ou miliampere - hora (mAh)

$$Q = I \cdot t$$

Poderemos classificar as pilhas ou baterias (combinação de duas ou mais pilhas) em dois tipos:

- **Primárias** – Não recarregáveis. Fornecem energia eléctrica durante um certo tempo ao fim do qual ficam esgotadas não se podendo voltar a carregar.

Exemplos de pilhas primárias:

As células do tipo primário mais vulgares são as alcalinas, constituídas por um ânodo (+) em zinco, um cátodo (-) de dióxido de manganésio e carbono e um electrólito de hidróxido de potássio.

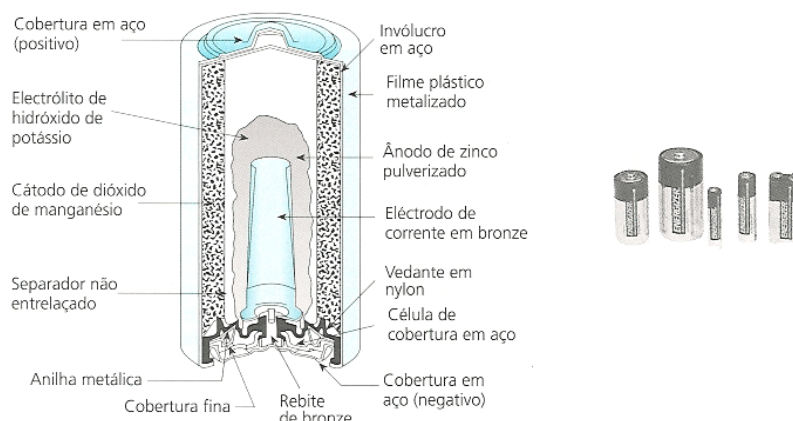


Figura 5.5 - Pilhas do tipo primário (alcalinas)

- **Secundárias** – Recarregáveis. São pilhas que podem voltar ao seu estado inicial depois de se obter electricidade delas (podem se recarregadas) por acção duma diferença de potencial aplicada entre os eléctrodos.
Uma pilha ou conjunto de pilhas secundárias designa-se geralmente por acumulador.

Teremos neste caso dois tipos de transformação de energia:

1. **Energia química em energia eléctrica** - aquando da descarga.
2. **Energia eléctrica em energia química** - aquando da carga (electrólise)

Exemplos de pilhas secundárias (acumuladores):

Acumuladores de chumbo (acumuladores ácidos) - São o exemplo comum das unidades industriais utilizadas nos automóveis. São geralmente formadas por 6 células (pilhas) em série, o electrólito é de ácido sulfúrico e os eléctrodos de chumbo (Pb) e de dióxido de chumbo (PbCO₂) dispoendo cada uma de uma f.e.m. de cerca de 2,1 V, pelo que a f.e.m. total será de 12,6 V. A capacidade pode variar de 40 Ah a 100 Ah. Para se carregar uma acumulador, basta aplicar-lhe uma fonte externa, de modo a que a corrente o percorra durante um certo tempo no sentido contrário ao sentido da corrente fornecida pelo acumulador. Esta corrente de carga do acumulador remove o sulfato das placas (SO₄) e restaura a concentração de ácido sulfúrico (H₂SO₄).

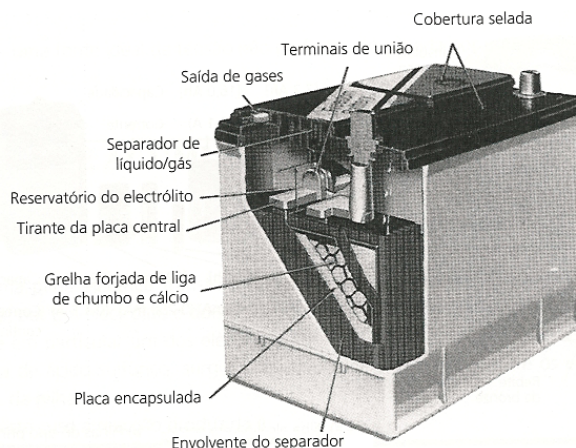


Figura 5.6 - Pilhas do tipo secundário (acumulador ácido ou bateria ácida)

Acumuladores de níquel - cádmio (acumuladores alcalinos) - São constituídas por um eléctrodo positivo de hidróxido de níquel $Ni(OH)_2$ e um eléctrodo negativo metálico de cádmio (Cd). O electrólito é de hidróxido de potássio (KHO).

Acumuladores de lítio - São utilizados em grande escala devido á sua elevada duração, grande capacidade de armazenamento de energia e pela sua leveza. Tem inúmeras aplicações desde as telecomunicações onde têm substituído as de Ni-Cd, ás áreas da medicina onde poderão ser encontrados nos pacemakers, passando pela utilização nas placas de circuito impresso.

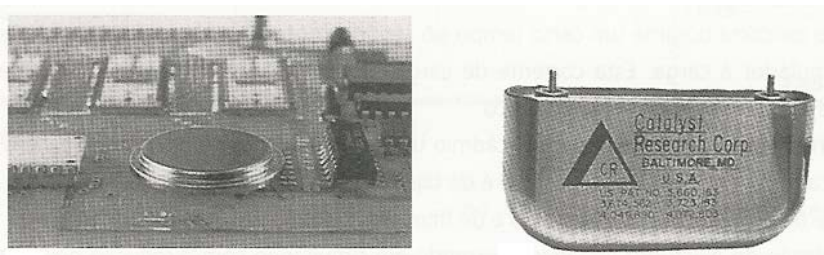


Figura 5.7 - Célula de lítio para circuito impresso (á esquerda) e célula de um pacemaker (á direita)



Figura 5.8 - Célula de polímeros de lítio utilizada em telemóveis

EXERCÍCIO RESOLVIDO

1 . Realizou-se a seguinte experiência

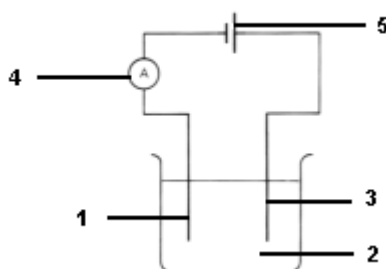


Figura 5.9 - Circuito em análise

1.1 Faça a legenda da figura da página anterior.

- 1 - eléctrodo negativo
- 2 - electrólito
- 3 - eléctrodo positivo
- 4 - amperímetro
- 5 - pilha

1.2 Diga, justificando se as afirmações são verdadeiras ou falsas.**1.2.1 Se a solução for de NaOH após estabelecido o circuito, teremos no ânodo Na⁺ e no cátodo OH⁻.**

Afirmação falsa. Como a molécula de NaOH existente se irá dividir nos seus iões devido á dissolução em água, transformar-se-á em iões Na⁺ e iões Cl⁻. Os iões positivos Na⁺ irão ser atraídos para o eléctrodo negativo (cátodo) e os iões negativos Cl⁻ irão ser atraídos para o eléctrodo positivo (ânodo).

1.2.2 O cátodo é o eléctrodo positivo.

Afirmação falsa. O cátodo é o eléctrodo negativo, sendo o ânodo o eléctrodo positivo.

1.2.3 O processo verificado na figura 5.9 tem o nome de ionização.

Afirmação falsa. O processo verificado na figura 5.9 tem por nome electrólise e consiste na decomposição de substâncias pela electricidade através da passagem de uma corrente eléctrica.

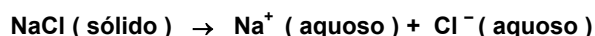
1.2.4 Os dois eléctrodos podem ser de plástico

Afirmação falsa. Os eléctrodos deverão ser de um material condutor, como por exemplo grafite.

EXERCÍCIOS DE APLICAÇÃO - ELECTROQUÍMICA

1. Suponhamos que se mergulha dois eléctrodos de grafite numa solução de cloreto de sódio NaCl (electrólito), aplicando-se uma tensão contínua.

A solução de NaCl quando dissolvida em água transforma-se nos seus iões constituintes através da seguinte reacção:



Atendendo ao que foi referido no enunciado atrás, esquematize a experiência realizada e, escreva a reacção verificada no ânodo (reacção anódica) e a reacção que se verifica no cátodo (reacção catódica) referentes aos iões Na⁺ e Cl⁻.



Capítulo 6 – Magnetismo e Campo magnético

O magnetismo desempenha um papel fundamental em inúmeras aplicações de equipamentos eléctricos e electrónicos utilizados na indústria em investigação e nas próprias habitações. Motores, geradores, transformadores, computadores, televisão, e telefones são alguns dos equipamentos em que os efeitos magnéticos são utilizados. Há relatos históricos que indicam que os fenómenos magnéticos são conhecidos desde os tempos remotos. Conta-se que, há mais de 2000 anos em Magnésia (cidade da Ásia Menor , se observou que um determinado minério de ferro (posteriormente chamado de magnetite) tinha a propriedade de atrair o ferro. A essa propriedade deu-se o nome de **magnetismo**.

Actualmente sabe-se que o principal constituinte da magnetite responsável por tal propriedade, é o óxido de ferro (Fe_3O_4) – Este mineral constitui um **ímã natural**.

Entretanto, descobriu-se que friccionando, sempre no mesmo sentido, um pedaço de ferro com um ímã natural, ele adquiria propriedades magnéticas idênticas às da magnetite. Construíram-se, então, **ímãs artificiais**. O mesmo resultado pode ser obtido mais comodamente utilizando uma corrente eléctrica.

Os ímãs podem apresentar diversas formas, apropriadas às aplicações a que se destinam. Há ímãs em U, agulha magnética, barra, anel, ferradura, etc.

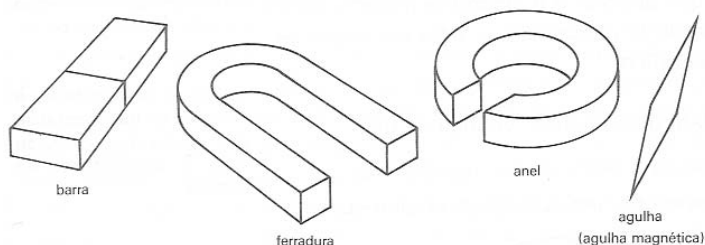


Figura 6.1 - Tipos de ímãs

Tomemos nota de algumas características dos ímãs, as quais se podem verificar com facilidade:

- Atraem a limalha de ferro mais intensamente nas extremidades. Estas regiões são denominadas de **pólos**.

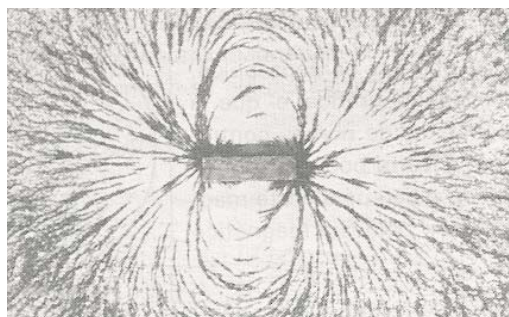


Figura 6.2 – Localização dos pólos de um ímã.

- Quando suspensos ou apoiados de forma a que fiquem em equilíbrio na horizontal, longe de qualquer outro íman, orientam as suas extremidades numa **direcção Sul - Norte geográfico**.
Devido a este facto, as extremidades de um íman são designadas por **pólo norte** (normalmente de cor azul ou vermelha) e **pólo sul** (normalmente de cor branca).

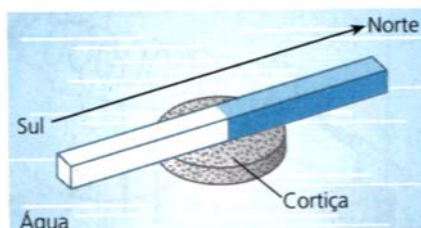


Figura 6.3 - Pólo norte e pólo sul num íman

- Quando se aproximam dois ímanes, verifica-se que pólos magnéticos do mesmo nome **repelem-se** e, pólos magnéticos de nome contrário **atraem-se**.

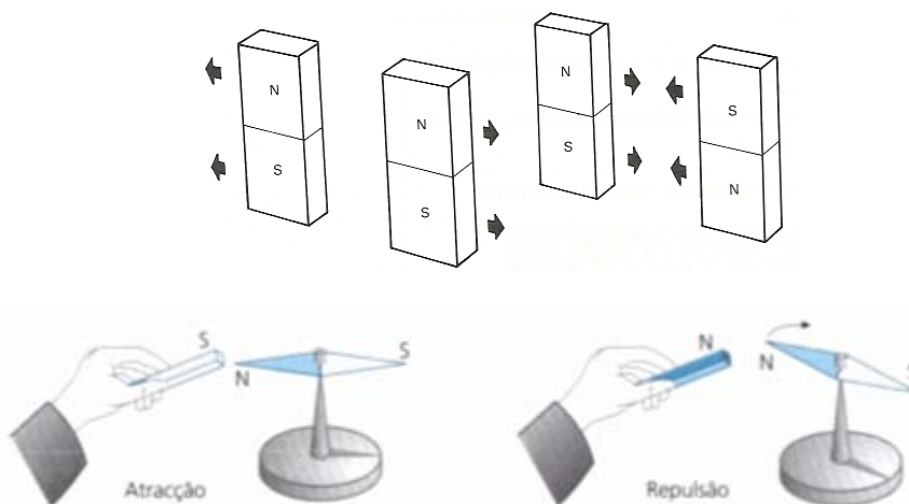


Figura 6.4 - Acção entre os pólos

A explicação para a orientação dos ímanes referida atrás é a seguinte:

A terra pode-se considerar como um íman gigante, em que o pólo norte magnético fica ao lado do pólo sul geográfico e, o pólo sul magnético fica ao lado do pólo norte geográfico. Assim, como a atracção só se verifica entre pólos magnéticos contrários, o pólo norte do íman (de cor mais escura na figura abaixo - 6.4) é atraído pelo pólo sul magnético (o que se encontra ao lado do norte geográfico) e o pólo sul do íman pelo pólo norte magnético (o que se encontra ao lado do sul geográfico).

Ao ângulo que a direcção norte - sul magnética faz com a direcção norte - sul geográfica chama-se **declinação magnética**.



Figura 6.5 - Pólos magnéticos e geográficos

- Não é possível separar os pólos de um íman. Se pretendermos separar os pólos de um íman quebrando uma barra magnética ao meio, verificamos que tal não é possível, pois os dois pedaços obtidos comportam-se como dois ímanes completos. Se continuássemos a fazer divisões sucessivas, obteríamos sempre o mesmo resultado. A constatação deste facto sugere a hipótese de um íman ser formado por ímanes elementares.

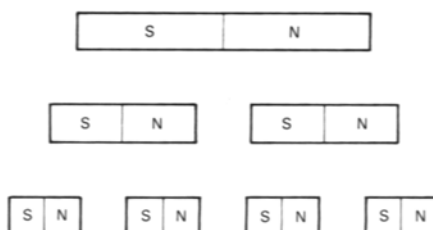


Figura 6.6 - Formação de ímanes elementares

Conservação e aplicações dos ímanes

Para evitar que os ímanes permanentes percam as suas características magnéticas com o tempo, devem-se suprimir os pólos livres, isto é, devem-se unir os pólos por meio de uma barra de aço macio chamada armadura. Desta forma neutraliza-se a acção que os pólos magnéticos da terra exerceriam sobre ele.



Figura 6.6 - Conservação dos ímanes

Os ímanes têm um grande número de aplicações como por exemplo: pequenos motores e geradores eléctricos, fechos de portas de armários, frigoríficos, aparelhos de medida, etc.

6.1 Campo Magnético

A região à volta de um íman, onde ocorre interações com corpos magnéticos, constitui o **campo magnético** criado por esse íman.

O campo magnético, tal como o campo eléctrico é caracterizado, em cada ponto, por uma grandeza vectorial chamada **indução magnética** (\vec{B}). **A unidade de indução magnética é o Tesla (T)**. Convencionalmente, a direcção e o sentido de \vec{B} , num dado ponto, são as mesmas do pólo norte de uma agulha magnética colocada nesse ponto.

Por analogia com o campo eléctrico, podemos representar um campo magnético recorrendo às **linhas de força** ou linhas de campo. Ao conjunto das linhas de força de um campo magnético, dá-se o nome de **espectro magnético**. Estas linhas são tangentes ao vector \vec{B} em cada ponto, e, por convenção, apresentam a direcção do pólo norte para o pólo sul.

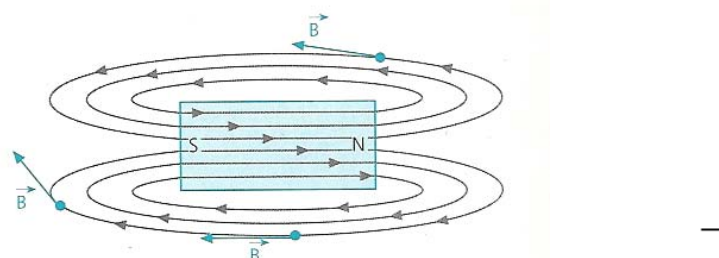


Figura 6.7 - Campo magnético. Visualização das linhas de força e do vector indução \vec{B} .

Poder-se-á “visualizar” o campo magnético criado por um íman, recorrendo à materialização das linhas de força ou de campo. Para tal, polvilhamos com limalha de ferro uma placa de vidro ou um papel que se coloca sobre o íman. A limalha dispõe-se de um modo especial, consoante a forma do íman, mostrando as linhas de força.

Na figura seguinte, apresentam-se alguns espectros magnéticos.

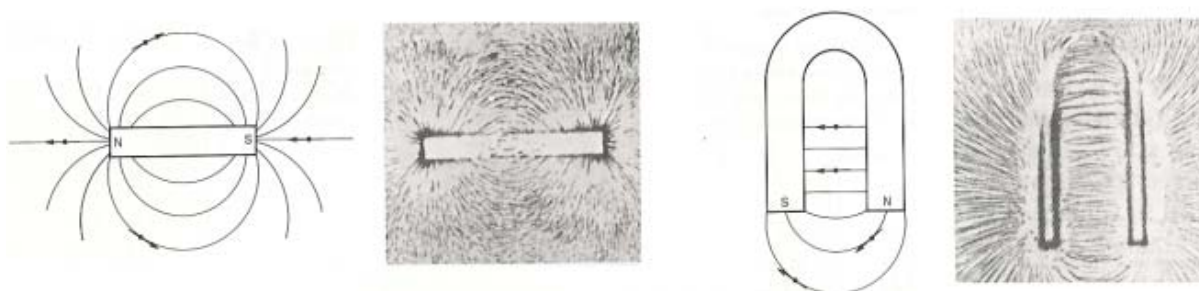


Figura 6.8 - Espectros magnéticos

A observação das figuras permite-nos retirar as seguintes propriedades das linhas de força:

- As linhas de força são mais densas onde o campo é mais intenso, ou seja, são mais densas junto às extremidades.
- As linhas de força nunca se cruzam.
- São fechadas e, saem do pólo e terminam no pólo sul.

6.2 Fluxo magnético

suponhamos um campo magnético uniforme e uma superfície S plana e colocada perpendicularmente relativamente às linhas de força.

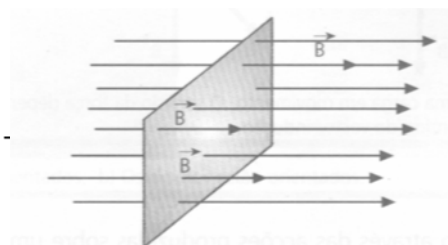


Figura 6.9 – Superfície perpendicular à indução

Designaremos **fluxo magnético** ϕ através da superfície plana ao **conjunto das linhas de força** que atravessam a superfície.

O fluxo magnético representa-se por ϕ e exprime-se em Weber. O aparelho que permite medir as variações de fluxo magnético é o fluxímetro.

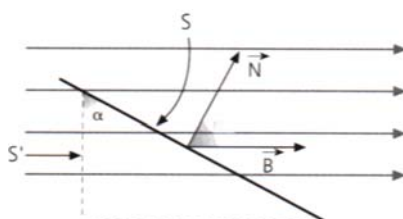
O seu valor é dado por :

$$\phi = B \cdot S$$

onde:

ϕ - Fluxo magnético	Weber (Wb)
B - Indução magnética	Tesla (T)
S - Área de superfície	m²

Se a superfície considerada não for perpendicular às linhas de força deveremos **substituí-la pela sua projecção sobre um plano perpendicular às linhas de campo.**



$$S' = S \times \cos \alpha$$

Figura 6.10 - Campo magnético numa superfície oblíqua

Sendo α o **ângulo da superfície e da sua projecção**, este é também o ângulo formado pelos vectores B e N (perpendicular à superfície), teremos o fluxo dado por:

$$\Phi = B \cdot S' \Rightarrow \Phi = B \cdot S \cdot \cos \alpha$$

EXERCICIO RESOLVIDO

1 . Calcule o fluxo magnético que atravessa uma superfície plana de 5 cm^2 , submetida a um campo cuja indução é de $0,2 \text{ mT}$. A superfície está colocada perpendicularmente às linhas de força.

$$S = 5 \text{ cm}^2 = 5 \times 10^{-4} \text{ m}^2$$

$$B = 0,2 \text{ mT} = 0,2 \times 10^{-3} \text{ T}$$

$$\phi = ?$$

$$\begin{aligned} \phi &= B \cdot S \Leftrightarrow \phi = 0,2 \times 10^{-3} \cdot 5 \times 10^{-4} \\ &\Leftrightarrow \phi = 1 \times 10^{-7} \text{ Wb} = 0,1 \mu\text{Wb} \end{aligned}$$

O fluxo magnético que atravessa a superfície plana é de $0,1 \mu\text{Wb}$.

EXERCICIOS DE APLICAÇÃO - MAGNETISMO E CAMPO MAGNÉTICO

1. Calcule a indução nos pólos de um íman, sabendo que a secção é de 2 cm^2 e o fluxo magnético vale $0,4 \text{ mWb}$.



Capítulo 7 - Efeito magnético da corrente eléctrica

Uma agulha magnetizada, colocada sobre um condutor, desvia-se logo que este seja percorrido por uma corrente. Em torno de uma corrente eléctrica existirá sempre um campo magnético.

Por outro lado, a experiência mostra que não há nenhuma diferença entre as propriedades dos campos magnéticos produzidos pelas correntes eléctricas ou pelos ímanes.

Campo magnético criado por uma corrente rectilínea

Se tivermos um condutor rectilíneo percorrido por uma corrente de cerca de uma centena de amperes, podemos visualizar as linhas de força do campo produzido por essa corrente.

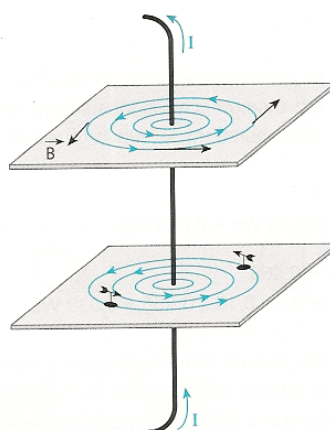


Figura 7.1 - Linhas de força criadas por uma corrente rectilínea

Para isso polvilhamos com limalha de ferro um cartão colocado perpendicularmente ao condutor. Iremos observar que a limalha se dispõe em círculos concêntricos, o que nos permite dizer que as linhas de força são circulares. Para sabermos o sentido do campo, poderemos colocar algumas agulhas magnetizadas.

Se invertermos o sentido da corrente verificamos que a forma das linhas de indução se mantém mas as agulhas magnetizadas indicam o sentido oposto ao inicial.

Concluimos que:

O sentido da indução magnética está ligado ao sentido da corrente e inverte-se com ele.

Para sabermos praticamente o sentido das linhas de força existem várias regras:

Regra da mão direita – a mão direita envolve o condutor, o polegar posiciona-se ao “ longo” do sentido da corrente, os outros dedos dão o sentido das linhas de força.

Regra de Ampère – o observador, colocando-se ao longo do condutor por forma a que a corrente “ entre ” pelos pés e “ saia ” pela cabeça, vê as linhas de força rodarem da sua direita para a esquerda.

Regra do saca-rolhas (ou de Maxwell)– se colocarmos um saca-rolhas paralelamente ao condutor, o sentido do movimento que lhe imprimirmos para que ele progrida no sentido da corrente dá o sentido das linhas de força.

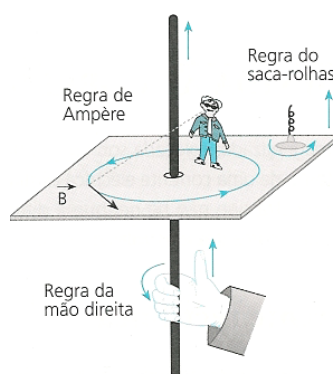


Figura 7.2 - Regras para determinação do sentido das linhas de força

Campo magnético criado por uma corrente circular

Se utilizarmos um condutor de forma circular (espira circular) percorrido por uma corrente eléctrica, podemos visualizar o campo magnético criado por essa corrente, colocando uma placa, com limalha de ferro, perpendicularmente ao plano da espira e de preferência na zona central.

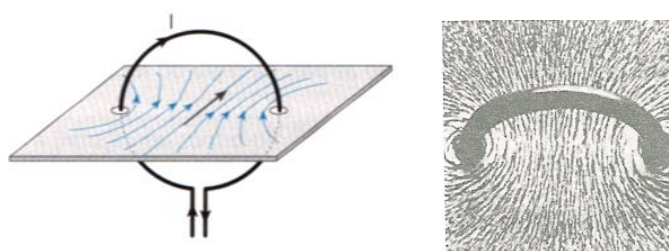


Figura 7.3 - Campo magnético criado por uma corrente circular

Próximo do centro da espira as linhas do campo são praticamente rectas; aproximando-se dos pontos onde a espira corta o plano as linhas vão-se curvando cada vez mais.; em volta desses pontos vemos linhas curvas que são círculos deformados.

O sentido das linhas do campo pode ser visualizado por agulhas magnetizadas: as regras de Ampère e da mão direita aplicam-se directamente; a regra o saca-rolhas aplica-se da seguinte forma: o sentido das linhas de força é tal que faz avançar um saca-rolhas cujo movimento coincida com sentido da corrente.

Campo magnético criado por uma bobina toroidal

A bobina toroidal é uma bobina em forma de anel como mostra a figura seguinte - 7.4.

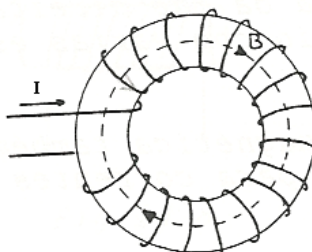


Figura 7.4 - Bobina toroidal

As linhas de campo são círculos concêntricos e interiores à bobina. O campo magnético no exterior é nulo. O sentido pode ser encontrado através da regra do saca-rolhas.

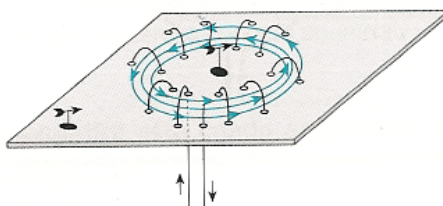


Figura 7.5 - Campo magnético de uma bobina toroidal.

Campo magnético criado por uma bobina longa (Solenóide)

Designamos por solenóide um condutor enrolado em hélice cilíndrica com espiras próximas umas das outras, para que, em cada uma a corrente eléctrica possa ser considerada circular. Tal condutor deve ter um comprimento bastante superior ao diâmetro das espiras. A figura seguinte mostra o espectro magnético do campo criado pela corrente eléctrica que percorre um solenóide.

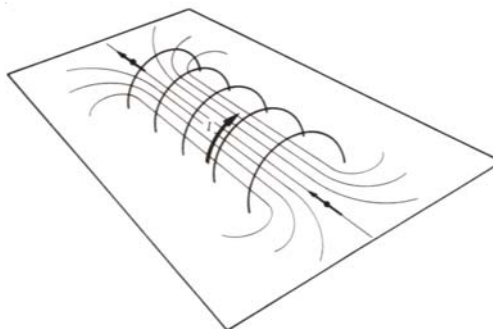


Figura 7.6 - Campo magnético criado por uma solenóide

No **interior do solenóide**, as linhas de força são praticamente paralelas entre si, o que sugere que, nesta zona, o campo magnético é praticamente uniforme.

No **exterior do solenóide**, o espectro magnético assemelha-se ao de um íman recto.

Para determinarmos o sentido das linhas de força, podemos utilizar a regra da mão direita.

Se colocarmos em cada extremidade do solenóide ou bobina, uma agulha magnética esta comporta-se como se uma dessas extremidades fosse um pólo norte e a outra um pólo sul.

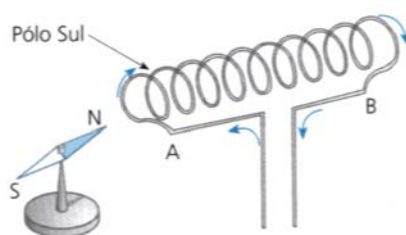


Figura 7.7 - Pólos de uma bobina (solenoide)

Há uma regra prática que permite relacionar o sentido da corrente nas extremidades de um solenóide, com os pólos magnéticos que lhes correspondem:

O **pólo sul** de uma bobina é a extremidade diante da qual é necessário colocarmo-nos para vermos a corrente rodar no sentido dos ponteiros do relógio. No caso contrário encontramos face ao pólo norte.

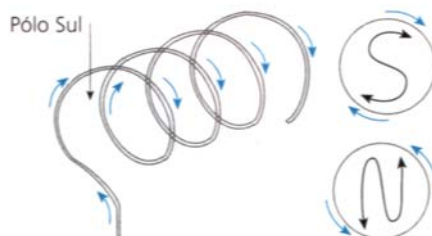


Figura 7.8 - Identificação dos pólos numa bobina (solenoide)

1 .Um condutor rectilíneo é percorrido por uma corrente eléctrica. Em qual das figuras está representado, correctamente, o sentido das linhas de força.

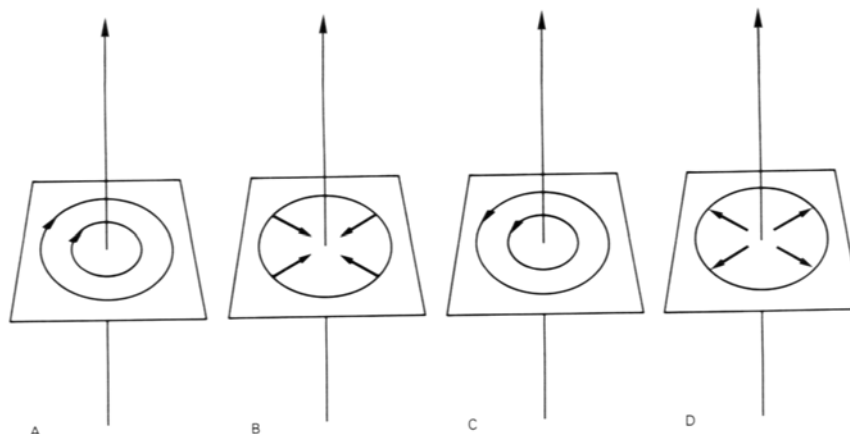


Figura 7.9 - Linhas de força criadas por uma corrente rectilínea

Por aplicação da regra da mão direita: envolvemos o condutor com a mão referida, o polegar posiciona-se ao “ longo” do sentido da corrente, os outros dedos dão o sentido das linhas de força, podemos constatar que o sentido as linhas de força ou de campo se encontra definido da **figura C**.

EXERCÍCIOS DE APLICAÇÃO - EFEITO MAGNÉTICO DA CORRENTE ELÉCTRICA

1. A figura seguinte - 7.10 - representa um solenóide percorrido por uma corrente eléctrica contínua.

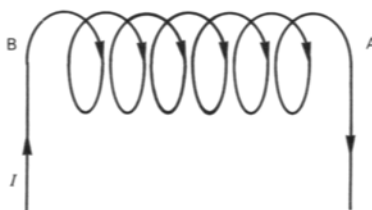


Figura 7.10 – Representação de uma solenóide.

- 1.1 Qual é o sentido das linhas de campo magnético no interior do solenóide?
- 1.2 Qual das extremidades do solenóide se comporta como um pólo norte?
- 1.3 Se se interromper a corrente eléctrica, o que acontece à polaridade do solenóide?



Capítulo 8 – Electromagnetismo

Sempre que existirem simultaneamente dois campos magnéticos num determinado espaço **surtem forças**. As forças como as têm o nome de **electromagnéticas** e aparecem entre ímans e bobinas percorridas por corrente eléctrica e entre bobinas percorridas por corrente eléctrica.

8.1 Acção de um campo magnético sobre uma corrente rectilínea. Lei de Laplace.

Quando se coloca um condutor percorrido por uma corrente num campo magnético de um íman, produz-se um efeito dinâmico mútuo entre as duas fontes do campo magnético (o do íman e o provocado pela corrente eléctrica). Se considerarmos, por um lado, que o íman está fixo e, por outro, que o condutor se pode movimentar livremente, iremos verificar que, por acção de uma força F , o condutor se irá deslocar.

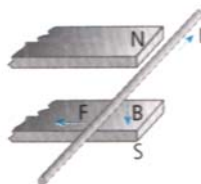


Figura 8.1 - Acção de um campo magnético sobre uma corrente rectilínea

O sentido dessa força F é dado pela regra da “mão direita”. Se considerarmos as linhas de força a entrarem na palma da mão direita e saindo pelo polegar, as pontas dos dedos indicam o sentido da força.

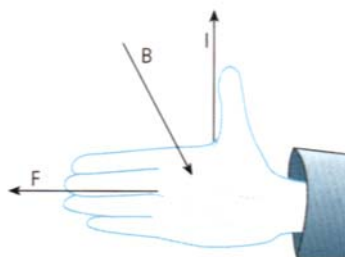


Figura 8.2 - Regra da mão direita

Consideremos novamente o sistema íman-condutor e façamos variar os factores que afectam o valor da força electromagnética.

- Intensidade da corrente – quando a intensidade aumenta a força aumenta.

- Coloquemos primeiro um íman a actuar sobre uma corrente e seguidamente dois ímanes idênticos também a actuarem sobre uma corrente. Constatemos que no segundo caso a força é maior. Como a indução é idêntica, tivemos apenas um aumento do comprimento a justificar esse aumento da força. Donde se conclui que quanto maior for o comprimento do condutor, maior será a força exercida sobre ele.

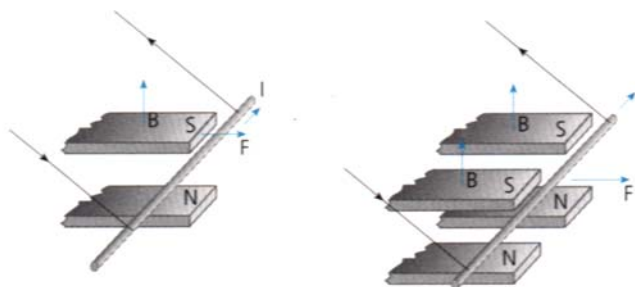


Figura 8.3 - A força é proporcional ao comprimento do condutor submetido à indução

- Se substituirmos o íman por outro com uma indução maior, a força aumenta
- A força depende do ângulo formado pela direcção de B e I .

Podemos resumir todas estas considerações numa única lei - **Lei de Laplace**.

A força electromagnética produzida sobre um condutor rectilíneo é proporcional á indução, á intensidade da corrente que o atravessa, ao comprimento e ao seno do ângulo formado pela indução e pelo condutor.

A Lei de Laplace traduz-se pela expressão:

$$F = B \cdot I \cdot \ell \cdot \sin \alpha$$

em que:

- F** - Força electromagnética - **Newton (N)**
- B** - Indução magnética - **Tesla (T)**
- I** - Intensidade de corrente - **Ampere (A)**
- ℓ** - Comprimento - **metro (m)**

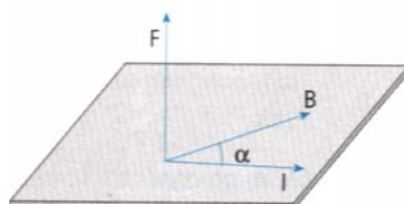


Figura 8.4 - Lei de Laplace. F é perpendicular ao plano definido por B e I

8.2 Indução electromagnética. Lei de Lenz e Lei de Faraday.

Vamos supor uma bobina sem núcleo ligada a um galvanómetro e um íman recto, como descrito na figura 8.5.

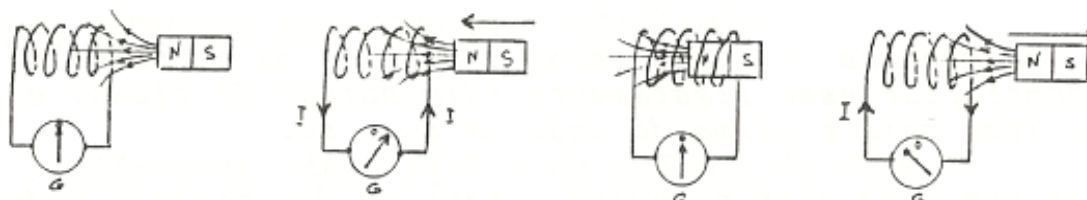


Figura 8.5 - Força electromotriz induzida

Se **aproximarmos ou afastarmos o íman da bobina** verificamos que o galvanómetro indica a **passagem de uma corrente**. Se o **íman se mantiver parado** em qualquer posição, então galvanómetro **não indica qualquer passagem de corrente**.

Ao aproximarmos ou afastarmos o íman da bobina fazemos variar o fluxo que a atravessa. Esta variação do fluxo vai gerar uma f.e.m. a que se chama **f.e.m. induzida**. Como o circuito é um circuito fechado esta f.e.m. origina uma corrente chamada **corrente induzida**.

O circuito onde se geram as f.e.m. induzidas é o **induzido**. O íman é o **indutor**.

Se mantivermos o íman parado não há variação do fluxo através da bobina e portanto não há f.e.m. induzida. Para **gerar f.e.m. induzida** não basta a existência de fluxo é **necessário que este varia**.

A **lei de Faraday** ou Lei de geral da indução electromagnética diz:

Sempre que um circuito estiver sujeito a uma variação de fluxo, gera-se nele uma f.e.m. induzida. Se o circuito for fechado será percorrido por uma corrente induzida.

Em consonância, com o que foi exposto poderemos através da **lei de Lenz** verificar o sentido da força induzida. Segundo esta:

O sentido da corrente induzida é tal que tende a opor-se, pela sua acção electromagnética, á causa que lhe deu origem.

Assim sendo, na figura 8.5, quando **aproximamos o íman da bobina** gera-se uma corrente induzida. O sentido desta corrente é tal que vai **criar um fluxo que contrarie o aumento do fluxo indutor**, isto é, como o pólo que se está a aproximar da bobina é o pólo norte, então o sentido da corrente induzida é tal que cria na extremidade da bobina por onde esta a entrar o fluxo, **um pólo norte que tende a opor-se á aproximação do íman**.

Se afastarmos o íman então o sentido da corrente na bobina para contrariar esse afastamento (diminuição do fluxo) é tal que cria do lado mais próximo do íman um pólo sul.

Um exemplo concreto deste fenómeno é o dínamo a gerar corrente.

Um dínamo é uma máquina eléctrica rotativa que produz corrente eléctrica. Tem uma parte fixa - estator - onde se cria o campo magnético indutor e uma parte que roda - rotor - onde se estão várias bobinas que formam o induzido. Fazendo rodar o rotor pode-se obter corrente do dínamo.

Se o dínamo não está a gerar corrente o rotor gira com facilidade. Se está a gerar corrente então as correntes que são induzidas nas bobinas vão opor-se à causa que as produziu, isto é, vão tender a parar o rotor e então para o manter em movimento é necessário exercer uma força.

8.3 Correntes de Foucault

Realizemos a experiência que se representa na figura 8.6.

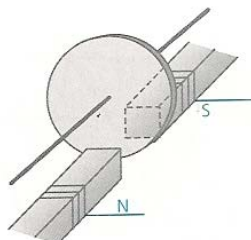


Figura 8.6 - A rotação do disco é travada quando o electroímã é alimentado

Façamos rodar o disco metálico, por um processo mecânico qualquer, entre os pólos de um electroímã.

Se não houver corrente, o disco gira rapidamente; se fornecermos corrente ao electroímã, a velocidade de rotação diminui.

Essa diminuição deve-se ao facto de serem induzidas correntes no disco que se vão opor à causa que lhes deu origem, ou seja, a rotação do disco.

Observemos a figura 8.7. O disco condutor intercepta no seu deslocamento as linhas de força do campo magnético e consequentemente vão-se criar forças electromotrizas. Resultarão correntes induzidas que circulam no disco. As forças electromagnéticas daí resultantes são resistentes, travam o disco. Nas mesmas condições um disco isolante não é travado.

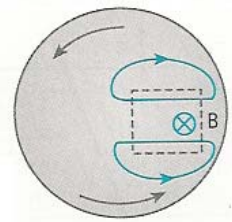


Figura 8.7 - Correntes de Foucault

A estas correntes induzidas numa massa metálica condutora dá-se o nome de correntes de Foucault.

8.3.1 Aplicações e inconvenientes das correntes e Foucault

As correntes de Foucault têm diversas aplicações, como o amortecimento em aparelhos de medida, travagem em camiões, embraiagem de automóveis, motores assíncronos, fornos de indução, fornos para fabrico de monocristais, velocímetros, etc.

Entretanto surgem alguns inconvenientes pois produzem nas massas metálicas perdas por efeito de Joule. Para reduzir essas perdas, constroem-se os núcleos das bobinas, dos transformadores, das máquinas eléctricas com chapas de pequena espessura. Este procedimento utiliza-se sempre que uma massa metálica se movimenta num campo magnético ou sempre que um campo magnético variável atravesse uma massa metálica mesmo que esta se encontre imóvel.

As chapas são isoladas entre si, conseguindo-se assim diminuir as correntes de Foucault sem alterar a circulação do fluxo magnético. As chapas devem ser dispostas paralelamente às linhas de força do campo.

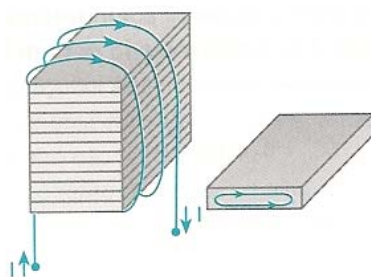


Figura 8.8 - Diminuição das correntes de Foucault

8.4 Indutâncias.

O símbolo de uma indutância ou bobina apresenta-se na figura que se segue - 8.9.

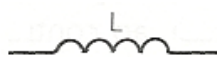


Figura 8.9 - Simbologia de uma indutância

Coefficiente de auto-indução

A variação da intensidade da corrente eléctrica num circuito faz com que o fluxo próprio desse circuito varie. Esta variação de fluxo, pela lei de Faraday, faz induzir uma f.e.m. que origina uma corrente que se vai opor á causa que lhe dá origem.

Esta f.e.m. tem o nome de **f.e.m. auto-induzida** ou de **auto-indução por se induzir no próprio circuito**.

O coeficiente de auto-indução ou **indutância L** de um circuito define-se como o quociente entre o fluxo total próprio através do circuito pela corrente que o percorre.

A indutância representa-se por L. Exprime-se em Henry (F).

A expressão que exprime o enunciado anterior é:

$$L = \frac{\phi}{I}$$

onde:

- L** - Indutância - **Henry (H)**
- ϕ** - Fluxo magnético - **Weber (Wb)**
- I** - Corrente eléctrica - **Ampere (A)**

Indução mútua

Na maioria das situações, as bobinas encontram-se nas proximidades de outras bobinas, pelo que os fluxos criados por umas afectam as outras. Consequentemente, definiu-se o **coeficiente de indução mútua - M** entre dois circuitos ou duas bobinas como sendo a relação entre o fluxo que atravessa um circuito criado pelo outro e a corrente que o criou. Assim :

$$M = \frac{\phi_{12}}{I_2} = \frac{\phi_{21}}{I_1}$$

em que:

- M** - Coeficiente de indução mútua - **Henry (H)**
- ϕ_{12}** - Fluxo magnético que atravessa o circuito 1 e foi criado pela corrente I_2 no circuito 2. - **Weber (Wb)**
- ϕ_{21}** - Fluxo magnético que atravessa o circuito 2 e foi criado pela corrente I_1 no circuito 1. - **Weber (Wb)**
- I_1** - Corrente eléctrica que percorre o circuito 1 - **Ampere (A)**
- I_2** - Corrente eléctrica que percorre o circuito 2 - **Ampere (A)**

8.4.1 Associação de bobinas (não acopladas magneticamente)

Por vezes surge a necessidade de associar bobinas. A regra para o calcula da indutância total é semelhante á associação de resistências.

Associação em série

A indutância total é dada pela soma das indutâncias de cada bobina:

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

Associação em paralelo

A indutância total será dada por:

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

8.4.2 Energia armazenada numa bobina

Quando a corrente aumenta a bobina armazena energia sob a forma de energia magnética que corresponde a um dado campo magnético. Quando a corrente diminui a bobina devolve-a sob a forma de energia eléctrica (corrente induzida).

Se a corrente não variar o campo magnético da bobina é constante sendo também a energia armazenada constante.

A energia armazenada por uma bobina é dada por:

$$W = \frac{1}{2} \cdot L \cdot I^2$$

em que:

W - Energia - **Joule (J)**

L - Indutância - (**H**)

I - Corrente - (**A**)

As bobinas com núcleo de ferro armazenam mais energia do que as bobinas sem núcleo.

Em geral o valor da energia não é muito grande, contudo a potência – $P = W / t$ – se a energia for restituída num intervalo de tempo t muito pequeno pode ser considerável.

1 . Considere uma bobina com L= 4 mH percorrida por uma corrente de 20 mA. Calcule.

1.1 A energia magnética armazenada.

L = 4 mH

I = 20 mA

W = ?

$$W = \frac{1}{2} \cdot L \cdot I^2 \Leftrightarrow W = \frac{1}{2} \cdot 4 \times 10^{-3} \cdot (20 \times 10^{-3})^2$$

$$\Leftrightarrow W = 0,8 \mu\text{J}$$

A energia armazenada pela bobina é de 0,8 μJ .

1.2 A potência posta em jogo quando a sua energia é transmitida a uma carga, no tempo de 0,05 s.

W = 0,8 μJ

t = 0,05 s

P = ?

$$P = \frac{W}{t} \Leftrightarrow P = \frac{0,8 \times 10^{-6}}{0,05}$$

$$\Leftrightarrow P = 16 \mu\text{W}$$

A posto 16 μW em jogo quando a energia armazenada é transmitida a uma carga.

EXERCÍCIOS DE APLICAÇÃO - ELECTROMAGNETISMO

1. Determine a força electromagnética que se exerce num condutor de 5 cm de comprimento, percorrido por uma corrente de 500 mA e submetido a um campo cuja indução é de 0,1 T, quando:
 - 1.1 as linhas de força são perpendiculares ao condutor.
 - 1.2 As linhas de força formam um ângulo de 30° com o condutor.

- 2 Uma bobina com $L = 10$ mH é percorrida por uma corrente contínua de 500 mA. Calcule a energia magnética armazenada.



Capítulo 9 – Circuitos magnéticos

Ao percurso das linhas de força de um campo magnético dá - se o nome de **circuito magnético**; de forma idêntica ao circuito eléctrico que definimos como o percurso da corrente eléctrica. Existe., no entanto, uma diferença fundamental entre os circuitos magnético e eléctrico.

Com efeito, o circuito eléctrico pode estar fechado ou aberto, não circulando corrente neste último caso. Em contrapartida, um circuito magnético está sempre fechado, pois as linhas de força nunca podem ser suprimidas, pois não existem substâncias isoladoras do magnetismo.

Os circuitos magnéticos podem ser **homogéneos**, quando são constituídos por um só material e a secção é constante ao longo de todo o circuito, e **heterogéneos**, quando a situação anterior não se verifica.

Designa-se por **entreferro** o espaço de ar existente entre o material magnético que constitui o circuito magnético.

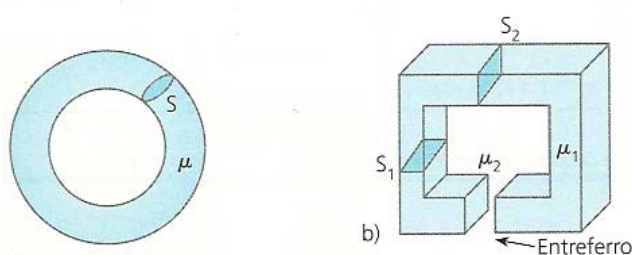


Figura 9.1 - Circuitos magnéticos. Homogéneo (à esquerda) e heterogéneo (à direita)

Lei dos circuitos magnéticos. Lei de Hopkinson

O físico inglês Hopkinson verificou que o fluxo magnético num circuito era dado pela quociente entre a força magnetomotriz e a resistência magnética ou relutância:

$$\phi = \frac{\mathfrak{F}}{\mathfrak{R}}$$

onde:

- ϕ - Fluxo magnético - **Weber (Wb)**
- \mathfrak{F} - Força magnetomotriz - **Ampere.espira (Ae)**
- \mathfrak{R} - Relutância - **Ampere.espira / Wb (Ae/Wb)**

em que a força magnetomotriz f.m.m. ou \mathfrak{F} é dada por:

$$\mathfrak{F} = N \cdot I$$

Sendo:

- \mathfrak{F} - Força magnetomotriz - **Ampere.espira (Ae)**
- N - Número de espiras - **espiras**
- I - Intensidade da corrente - **Ampere (A)**

Analogia entre o circuito magnético e o circuito eléctrico

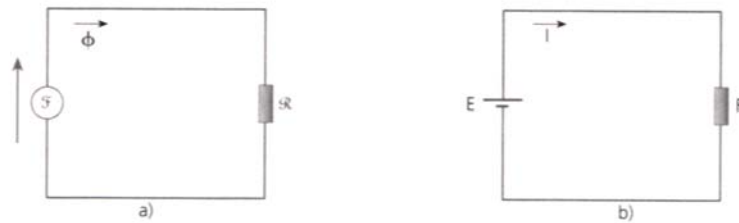


Figura 9.2 - Circuito magnético (a). Circuito eléctrico (b).

Circuito eléctrico	Circuito magnético
Corrente eléctrica - I	Fluxo magnético - ϕ
Força electromotriz - E	Força magnetomotriz - \mathfrak{F}
Resistência - R	Relutância - \mathfrak{R}
$I = \frac{E}{R}$	$\phi = \frac{\mathfrak{F}}{\mathfrak{R}}$

EXERCÍCIOS DE APLICAÇÃO - CIRCUITOS MAGNÉTICOS

1. Calcule o fluxo estabelecido no circuito magnético representado na figura 9.3 se a relutância do material for de $0,28 \times 10^{-5} \text{ Ae/Wb}$.

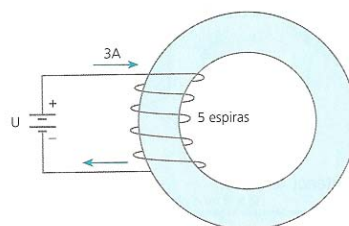


Figura 9.3 - Circuitos magnéticos em análise

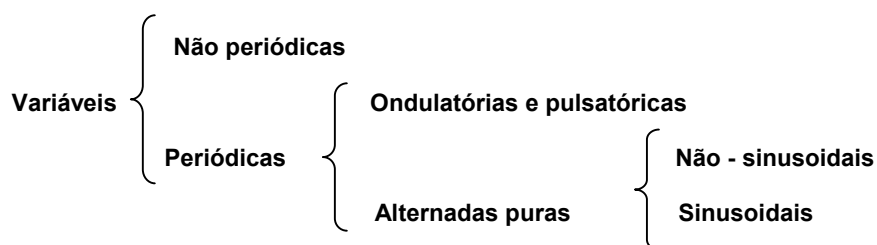
2. Sabendo-se que passa uma corrente de 2 A através de uma bobina com 50 espiras, determine:
- 2.1 A força magnetomotriz.
 - 2.2 A relutância do circuito se o fluxo for de $250 \mu\text{Wb}$.



Capítulo 10 – Corrente alternada

O estudo da energia eléctrica que fizemos nos capítulos anteriores ssentou nas correntes e tensões contínuas, isto é, nas que mantêm o mesmo sentido (unidireccionais) e o mesmo valor.

Existem, no entanto numerosas aplicações em que são diversas as variações em função do tempo, das tensões, correntes e outras grandezas. Assim as grandezas eléctricas podem classificar-se em função do tempo como:



Vejam os cada uma delas:

Grandezas constantes

No gráfico a corrente representada é constante pois não varia ao longo do tempo.

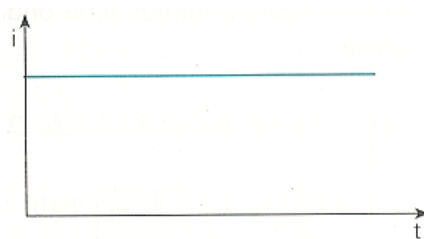


Figura 10.1 - Corrente constante

Grandezas variáveis - Não periódicas

A corrente representada possui valores diferentes de instante para instante mas mantêm o mesmo sentido.

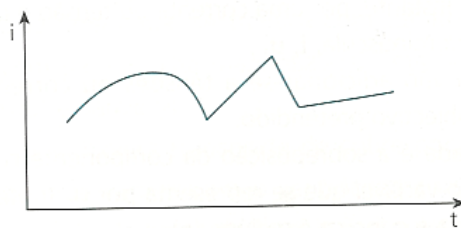


Figura 10.2 - Corrente variável unidireccional

Grandezas variáveis - Periódicas

Uma grandeza diz-se periódica quando se verifica uma repetição das suas características ao longo do tempo. No estudo que iremos efectuar, surgir-nos-ão diversas formas de ondas periódicas. Representamos dois tipos de ondas periódicas: **ondulatórias ou pulsatórias** e as **alternadas puras**.

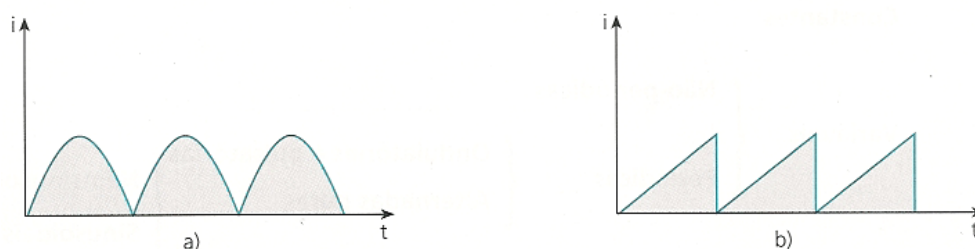


Figura 10.3 - Corrente ondulatória (a); Corrente unidireccional em dente de serra (b)

As **ondas alternadas puras** distinguem-se das ondas ondulatórias porque possuem um **valor médio algébrico nulo**.

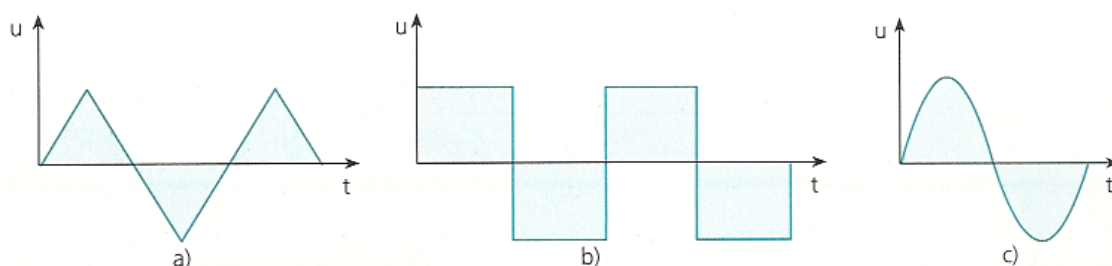


Figura 10.4 - Tensão alternada triangular (a); Tensão alternada quadrada (b); Corrente sinusoidal(c)

Numa onda alternada pura, o conjunto dos valores assumidos em cada sentido designa-se por **alternância** ou **semi-onda**. Teremos assim uma alternância positiva e uma alternância negativa.

O conjunto de duas alternâncias consecutivas designa-se por **ciclo**.

O valor assumido, em cada instante, por uma corrente ou tensão é chamado **valor instantâneo**, que se representa por uma letra minúscula: **i** , **u** .

Iremos agora tratar do estudo de correntes e tensões alternadas sinusoidais. A sua importância na electrónica resulta do facto de qualquer sinal periódico alternado se poder considerar como a soma de sinais alternados sinusoidais de frequências múltiplas. Convém, pois, definirmos as grandezas que caracterizam um sinal sinusoidal.

10.1 Características da corrente alternada sinusoidal

Período

É o tempo em que ocorrem duas alternâncias consecutivas, ou seja é o tempo gasto num ciclo. Representa-se por **T** e exprime-se em **segundos**.

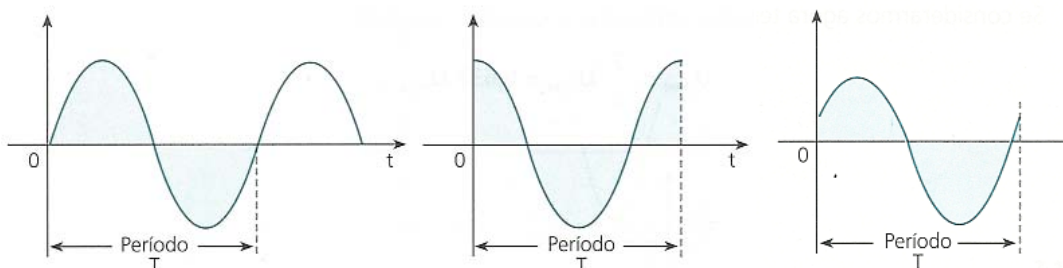


Figura 10.5 - Período de uma grandeza sinusoidal

Frequência

É o número de ciclos efectuados num segundo. Representa-se por **f** e a sua unidade é o **Hz (Hertz)**. A frequência está relacionada com o período da seguinte forma:

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

As frequências das ondas dependem da sua utilização. Assim, a energia eléctrica é distribuída a 50 Hz, ou seja, apresenta 50 ciclos ou períodos por segundo. A gama das audiófrequências vai de 20 Hz a 20 KHz e comporta o que vulgarmente se designa por electroacústica. Rádio, televisão, ultra-sons, radar e microondas comportam gamas de frequências que ultrapassam os MHz (MegaHertz) e, por vezes, os GHz (GigaHertz).

Amplitude ou Valor máximo

É o valor instantâneo mais elevado atingido pela grandeza. Há amplitude positiva e amplitude negativa. Ao valor medido entre os valores de amplitude positiva e amplitude negativa chama-se **valor de pico a pico** e é dado pela seguinte expressão:

$$I_{pp} = 2 \cdot I_{m\acute{a}x.}$$

Ou para o caso de tensões:

$$U_{pp} = 2 \cdot U_{m\acute{a}x.}$$

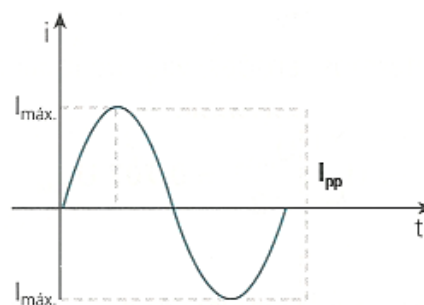


Figura 10.6 - Representação da amplitude e do valor pico a pico de uma corrente sinusoidal

Valor médio

Teremos aqui que considerar apenas metade do ciclo de uma corrente alternada sinusoidal, pois o valor médio de um ciclo é zero, já que este se repete na parte positiva e na parte negativa.

O valor médio representa o valor que uma corrente contínua deveria ter para transportar a mesma quantidade de electricidade, num mesmo intervalo de tempo.

A expressão para determinar o valor médio é dado por:

$$I_{\text{med}} = \frac{2}{\pi} \cdot I_{\text{máx}}$$

Se resolvermos o quociente $2/\pi$ teremos:

$$I_{\text{med}} = 0,637 \cdot I_{\text{máx}}$$

Para o caso de tensões alternadas sinusoidais:

$$U_{\text{med}} = \frac{2}{\pi} \cdot U_{\text{máx}} = 0,637 \cdot U_{\text{máx}}$$

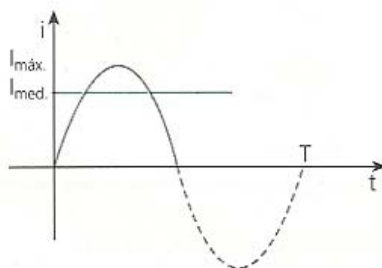


Figura 10.7 - Valor médio de uma corrente sinusoidal

Valor eficaz

O calor desenvolvido numa resistência é independente do sentido de circulação da corrente.

O valor eficaz de uma corrente alternada é o valor da intensidade que deveria ter uma corrente contínua para, numa resistência, provocar o mesmo efeito calorífico, no mesmo intervalo de tempo.

Por outras palavras, existirá uma corrente contínua que no mesmo intervalo de tempo T, ou seja num período, produzirá a mesma quantidade de calor que a produzida pela corrente alternada.

O valor eficaz representa-se por **I** ou **U** (conforme corrente ou tensão). A expressão matemática que define o valor eficaz é:

$$I = \frac{I_{\text{máx}}}{\sqrt{2}}$$

Como $1 / \sqrt{2} = 0,707$, virá:

$$I = 0,707 \cdot I_{\text{máx}}$$

Relativamente, a tensões alternadas sinusoidais teremos:

$$U = \frac{U_{\text{máx}}}{\sqrt{2}} = 0,707 \cdot U_{\text{máx}}$$

Para realçar a importância do valor eficaz, refira-se que são **valores eficazes que os voltímetros e amperímetros nos indicam ao medirem grandezas sinusoidais.**

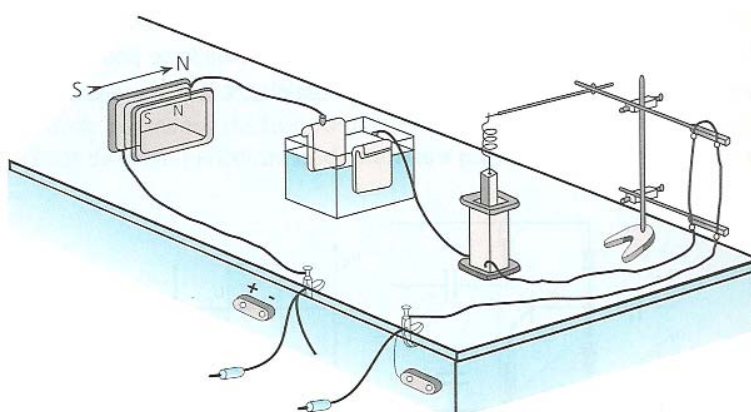
Efeito da corrente alternada sinusoidal

A potência produzida por efeito de Joule é proporcional ao quadrado da intensidade de corrente, logo independente do seu sentido de circulação. É facto que a produção de energia calorífica é variável de instante para instante, anulando-se mesmo duas vezes ao longo de um período; no entanto, e devido à inércia térmica dos corpos, as variações de temperatura são muito débeis.

Todos os aparelhos térmicos serão utilizáveis, tanto em corrente contínua, como em corrente alternada. A frequência também influenciará o funcionamento dos aparelhos, por exemplo das lâmpadas de incandescência.

Se, porventura, a frequência for demasiado baixa (inferior a 25 Hz), a temperatura das lâmpadas variará lentamente e seria notória uma certa cintilação.

Na figura ... representa-se uma cuba electrolítica com sulfato de cobre, uma bobina plana orientada na direcção N-S com uma agulha magnetizada, uma bobina com uma peça de ferro macio e fios de prata estendidos e paralelos.



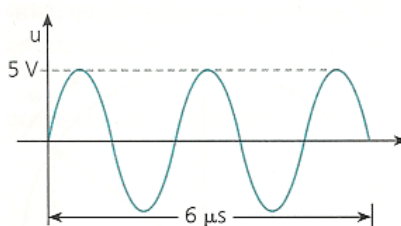
10.8 - Efeitos da corrente eléctrica

Alimentando o circuito com corrente contínua haverá transporte de cobre por electrólise e acção da bobina sobre a agulha magnetizada, que variam com o sentido da corrente no circuito. O efeito de joule nos fios de prata, a atracção da barra de ferro e a repulsão entre os fios de os prata faz-se sentir independentemente do sentido da corrente no circuito.

Ao aplicar-se corrente alternada, não há transporte de cobre, a agulha não se desvia, apresentando uma ligeira vibração na sua posição N-S. Por outro lado, tal como em c.c., os fios aquecem e repelem-se, e a barra de ferro é atraída.

A agulha magnética em corrente alternada também é solicitada por forças electromagnéticas mas, essa solicitação muda de sentido 100 vezes por segundo, pelo que, devido à inércia, permanece praticamente em repouso.

1 .Considere a tensão sinusoidal representada na figura 10.9. Determine:



10.9 - Tensão sinusoidal em análise

1.1 A frequência e o período.

Segundo o gráfico, 2,5 períodos realizam-se em 6 μs logo, um período realiza-se em:

$$T = \frac{6}{2,5} = 2,4 \mu\text{s}$$

A frequência é o inverso do período, assim:

$$f = \frac{1}{T} = \frac{1}{2,4 \times 10^{-6}} = 417 \text{ KHz}$$

O período da onda representada ou seja, o tempo que a onda demora a descrever uma alternância positiva e outra negativa é de 2,4 μs. A frequência da onda é de 417 KHz.

1.2 O valor médio de uma alternância.

$$U_{\text{máx}} = 5 \text{ V}$$

$$U_{\text{med}} = 0,637 \cdot U_{\text{máx}} = 0,637 \cdot 5 = 3,185 \text{ V}$$

O valor médio da onda representada é de 3,185 V.

1.3 O valor eficaz.

$$U_{\text{máx}} = 5 \text{ V}$$

$$U = 0,707 \cdot U_{\text{máx}} = 0,707 \cdot 5 = 3,535 \text{ V}$$

O valor eficaz da onda sinusoidal é de 3,535 V ou seja, esta tensão contínua produzirá a mesma quantidade de calor que a produzida pela corrente alternada representada no mesmo intervalo de tempo T.

1.4 O tempo que a onda demora a atingir o primeiro pico.

O primeiro pico ocorrerá quando a onda atingir um quarto do período $T / 4$, ou seja, o primeiro valor máximo será atingido após $0,6 \mu\text{s}$ do início da onda.

EXERCÍCIOS DE APLICAÇÃO - CARACTERÍSTICAS DE UMA CORRENTE SINUSOIDAL

1. Determine o período de uma onda alternada de 20 KHz.
2. Dispomos de uma resistência de $330 \text{ K}\Omega$ e $1/8 \text{ W}$. Determine:
 - 2.1 O valor eficaz da máxima intensidade de corrente que a pode percorrer.
 - 2.2 A amplitude da máxima tensão a que pode ser submetida.

10.2 Representação gráfica de uma grandeza sinusoidal

Consideremos uma corrente alternada sinusoidal. Esta terá uma frequência, um determinado período, além disso, existirá um valor máximo e em cada instante teremos um valor instantâneo .

Se a onda sinusoidal **não começar na origem do referencial**, teremos de definir um **ângulo** φ , que é o ângulo que a onda faz com a origem da contagem dos ângulos, no instante inicial.

Vamos também definir **velocidade angular** ω como sendo o número ω de radianos percorridos por segundo, ou seja traduzindo por uma expressão:

$$\omega = 2 \pi \cdot f$$

Exprime-se em rad / s (radiano por segundo)

Podemos agora, definir a **equação da onda sinusoidal**, assim no caso de uma **corrente** virá:

$$i = I_{\text{máx}} \cdot \text{sen}.(\omega \cdot t + \varphi)$$

em que:

- i - Valor instantâneo da corrente em Ampere
- $I_{\text{máx}}$ - Valor máximo da corrente em Ampere
- ω - Velocidade angular em rad / s
- t - Tempo em segundos
- φ - Ângulo inicial

No caso de uma **tensão** a equação tomará a seguinte forma:

$$u = U_{\text{máx}} \cdot \text{sen} . (\omega t + \varphi)$$

em que:

- u** - Valor instantâneo da corrente em Ampere
- U_{máx.}** - Valor máximo da corrente em Ampere
- ω** - Velocidade angular em rad / s
- t** - Tempo em segundos
- φ** - Ângulo inicial

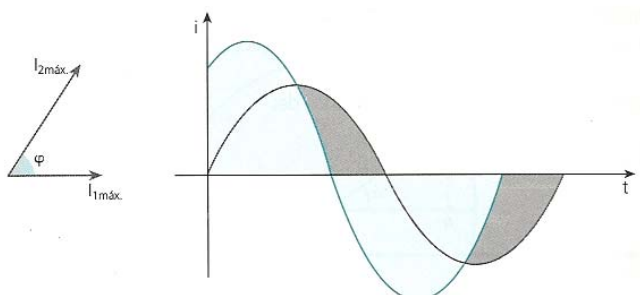
Foi referido atrás que a onda sinusoidal poderá não começar na origem do referencial. Ao ângulo que a onda faz com a origem da contagem dos ângulos, no instante inicial, dá-se o nome de **ângulo de defasamento** φ. Deste modo várias serão as possíveis posições iniciais. Para nos apercebermos destas posições, consideremos duas correntes sinusoidais, i_1 e i_2 , da mesma frequência.

Sejam:

$$i_1 = I_{1 \text{ máx}} \cdot \text{sen} . \omega . t$$

$$i_2 = I_{2 \text{ máx}} \cdot \text{sen} . (\omega . t + \varphi)$$

Como verificamos, a corrente i_2 está desfasada em relação i_1 a de um ângulo φ; porque os vectores que representam as correntes sinusoidais rodam no sentido directo, i_2 está **avançada** em relação a i_1 .

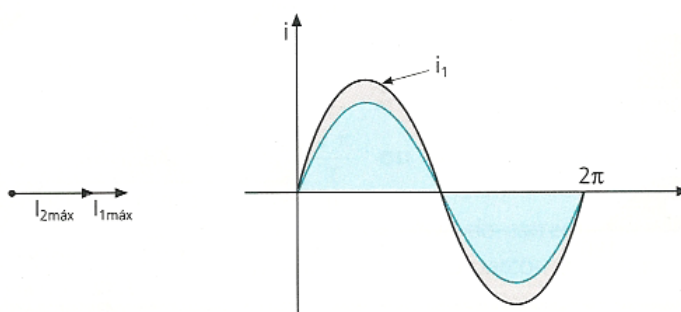


10.10 - Representação vectorial e cartesiana de duas correntes sinusoidais

Existem casos específicos para os valores deste ângulo que passaremos a analisar:

1. Grandezas em fase

As duas correntes assumem valores máximos e têm zeros simultaneamente. O ângulo de defasamento φ nulo.

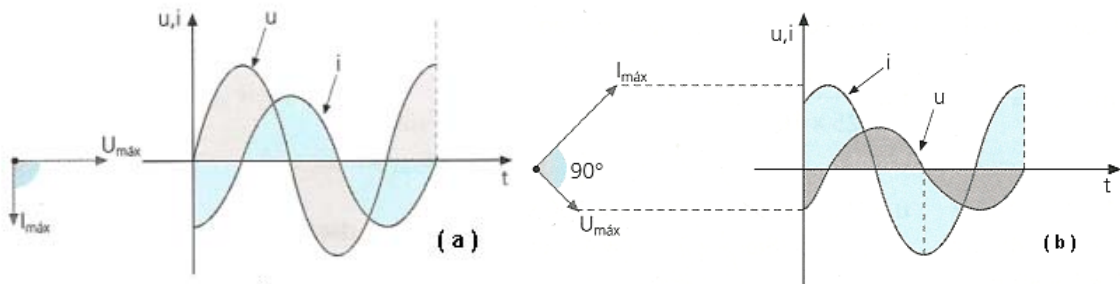


10.11 - Representação vectorial e cartesiana de duas correntes em fase

2. Grandezas em quadratura

Quando uma das grandezas atinge o valor máximo, a outra anula-se. O ângulo de defasamento φ é de 90° .

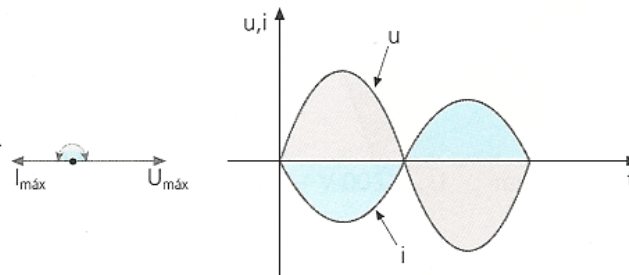
No gráfico (a), a **tensão está avançada 90° em relação à corrente**. Ou seja, enquanto a tensão já se encontra na origem do referencial, a corrente ainda está no seu valor máximo negativo. Na segunda representação (b), a **tensão está em atrasada em relação á corrente**. Ou seja, enquanto a corrente já se encontra no seu valor máximo positivo, a tensão ainda está a anular-se na coordenada do gráfico correspondente a $u = 0$.



10.12 - Representação vectorial e cartesiana de uma tensão e uma corrente sinusoidal em quadratura

3. Grandezas em oposição

Os vectores representativos das grandezas têm a mesma direcção mas sentidos opostos. O ângulo de defasamento φ é de 180° .



10.13 - Representação vectorial e cartesiana de duas correntes em oposição de fase

EXERCICIO RESOLVIDO

1 . Uma corrente alternada sinusoidal tem a seguinte expressão analítica, calcule:

$$i = 10 \cdot \text{sen} . (157 t + \varphi)$$

1.1 O valor máximo da corrente.

A equação de uma grandeza sinusoidal é dada por: $i = I_{\text{máx}} \cdot \text{sen} . (\omega . t + \varphi)$ daqui verificamos que o valor máximo da corrente representada é de 10 A.

1.2 O valor eficaz da corrente.

$$I_{\text{máx}} = 10 \text{ A}$$

$$I = 0,707 \cdot I_{\text{máx}} = 0,707 \cdot 10 = 7,07 \text{ A}$$

O valor eficaz da corrente é 7,07 A.

1.3 O valor da velocidade angular.

Através da expressão analítica verifica-se que a velocidade angular é de 157 rad/s.

1.4 A frequência do sinal sinusoidal.

$$\omega = 157 \text{ rad/s}$$

$$\omega = 2\pi \cdot f \Rightarrow f = \frac{\omega}{2\pi} = \frac{157}{2\pi} = 25 \text{ Hz}$$

A frequência do sinal é de 25 Hz.

EXERCÍCIOS DE APLICAÇÃO - REPRESENTAÇÃO GRÁFICA DE UMA GRANDEZA SINUSOIDAL

1. Relativamente à expressão algébrica da tensão, determine:

$$u = 220\sqrt{2} \cdot \text{sen} \left(100\pi \cdot t + \frac{\pi}{4} \right)$$

- 1.1 O valor eficaz da tensão.
- 1.2 A frequência correspondente.
- 1.3 O valor do ângulo desfasamento.
- 1.4 O valor máximo que tensão pode atingir.

2. Escreva a expressão matemática de uma corrente de 5 A com uma frequência de 50 Hz considerando, que se inicia no valor zero.

3. Uma tensão tem uma amplitude máxima de 20 V sendo a sua frequência de 50 Hz. Supondo que a onda se inicia no seu máximo positivo, determine o valor da tensão 0,03 s após o seu início.



Capítulo 11 – Análise de circuitos em C.A.

Se realizarmos a experiência de verificação da lei de Ohm mas aplicando agora grandezas alternadas, chegaremos à conclusão que se mantém constante o quociente U / I . A este cociente chamaremos de **impedância** do circuito ao qual aplicamos a tensão alternada e que se representa por **Z**. A sua unidade é igualmente o Ω -Ohm.

Assim, a lei de Ohm assume a forma, que é designada por **Lei de Ohm generalizada**.

$$U = Z \cdot I$$

A diferença entre Z e R deve-se ao facto de **Z depender da frequência**. Assim, em corrente alternada, a relação entre a tensão e a corrente depende, para uma dada frequência, da impedância Z e ângulo de desfasamento φ . Por definição designar-se-á:

- **Z.cos φ** - por resistência R
- **Z.sen φ** - por reactância X

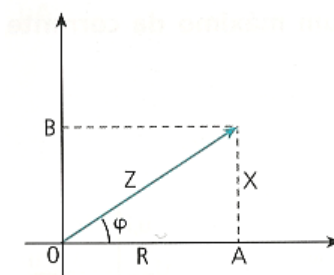


Figura 11.1 - Representação gráfica da resistência e reactância

De seguida, estudaremos os circuitos em que surgem correntes alternadas sinusoidais, que são formadas por resistências, bobinas e condensadores. Veremos, em primeiro lugar, os circuitos ideais, ou seja, os constituídos apenas por resistências, por bobinas puras (sem resistência) e por condensadores puros (sem resistência de perdas). Tal não acontece na realidade. No entanto, algumas destas três grandezas, que formam os elementos reais (resistência, reactância indutiva e reactância capacitiva), assumem valores tão baixos que podem ser desprezar-se face aos restantes. É o caso, por exemplo, das lâmpadas de incandescência, que podem, sem grande erro, ser consideradas como resistências puras.

11.1 Circuito puramente resistivo

Ao aplicarmos uma tensão alternada sinusoidal à **resistência puramente óhmica**, qual será a forma de onda da corrente no circuito?

Aplicando a Lei de Ohm aos sucessivos instantes e uma vez que $Z = R$ (pois o circuito é considerado um circuito ideal e, desta forma a outra componente da impedância, ou seja a reactância, será nula), facilmente se verifica:

- À medida que a tensão aumenta, a corrente também aumenta já que se relacionam pela Lei de Ohm; $U = R \times I$.
- Quando a tensão aplicada muda de polaridade, também a intensidade de corrente muda de sentido.

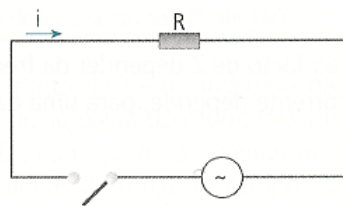


Figura 11.2 - Resistência pura alimentada em corrente alternada

Logo as curvas representativas da tensão e corrente estão em fase, ou seja, a um máximo da tensão corresponde um máximo da corrente, o mesmo sucedendo para os zeros.

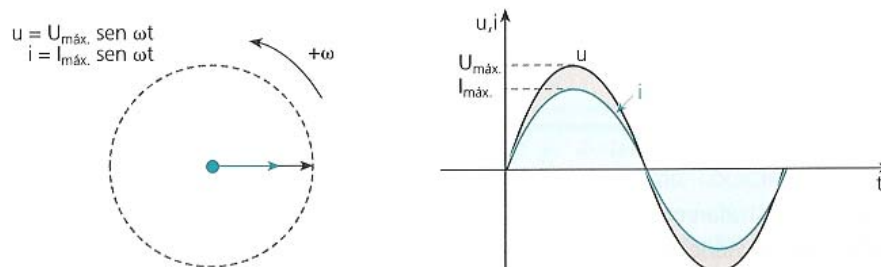


Figura 11.3 - Representação algébrica, vectorial e cartesiana da tensão e respectiva corrente numa resistência puramente óhmica.

EXERCÍCIO DE APLICAÇÃO - CIRCUITO PURAMENTE RESISTIVO

1. Considere o divisor de tensão da figura 11.4, com uma carga de $15\text{ k}\Omega$.

Sendo: $u = 2\sqrt{2} \cdot \text{sen} \cdot \omega t$, calcule:

- 1.1 I_1 máx, I_2 máx e I_3 máx.
- 1.2 Os valores eficazes das correntes.
- 1.3 U_{ab} , U_{bc} , $U_{ABmáx}$. e $U_{BCmáx}$.

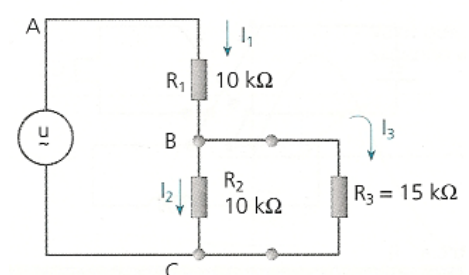


Figura 11.4 - Circuito em análise

11.2 Circuito puramente indutivo

Reactância indutiva

Neste circuito a oposição à circulação da corrente é feita pela f.e.m. de auto-indução da bobina e chama-se **reactância indutiva (X_L)** e exprime-se em Ω .

Qual será a relação entre os valores eficazes da tensão e da corrente?

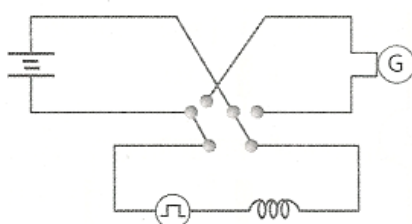


Figura 11.5 - Bobina alimentada a corrente contínua ou corrente alternada

Quando o interruptor se fecha alimentado o circuito em c.c., a corrente não surge de imediato. Pela lei de Lenz, a corrente induzida no circuito tem um sentido cujos efeitos se opõem à causa que a originou.

Ao abrir-se o interruptor, a corrente não cessa pelas mesmas razões. A diminuição da corrente é pois retardada. É o que se representa na figura 11.6, onde o fecho do interruptor se efectiva no instante t_1 , só atingindo a corrente um valor final após o intervalo $t_3 - t_1$. na diminuição da corrente, esta só se anula após o intervalo de tempo $t_4 - t_2$.

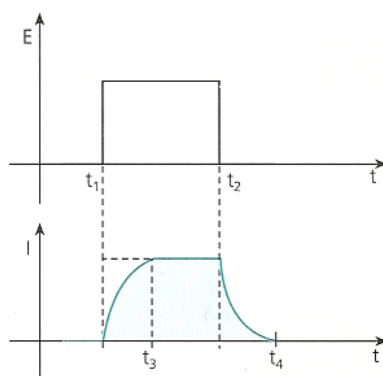


Figura 11.6 - Forma de onda num circuito indutivo alimentado a corrente contínua

Em corrente alternada, os efeitos da auto-indução são constantes. Vejamos a que é igual a reactância indutiva. Na figura 11.7, ao comutar-se a alimentação para corrente alternada, a lâmpada brilha menos que em c.c..Podemos concluir que quanto maior for o coeficiente de auto-indução $-L-$, mais se farão sentir os efeitos da auto-indução, pelo que menor será a corrente no circuito. **A corrente será inversamente proporcional à indutância.**

E dependerá a reactância da frequência?

Como se representa na parte A da figura 11.7, com uma grande frequência, logo pequeno período, a corrente não tem tempo de atingir o seu valor máximo, pois a tensão aplicada inverte-se. Na parte B, a corrente atinge um valor mais elevado, já que o período da tensão aplicada é maior. Logo, **quanto maior a frequência, menor será a corrente eléctrica.**

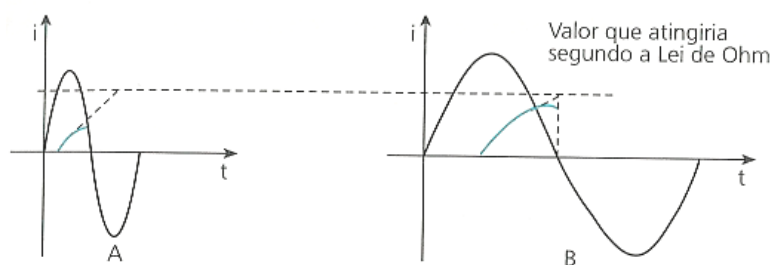


Figura 11.7 - Gráfico da corrente para tensões aplicadas de diferentes frequências

Sendo a oposição à circulação de corrente a **reactância indutiva X_L** , a lei de ohm virá:

$$U = X_L \cdot I$$

Sendo o valor de X_L dado por:

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

com:

$$\omega = 2\pi \cdot f$$

virá:

$$X_L = \omega \cdot L$$

em que:

X_L - reactância indutiva - **Ohm (Ω)**

f - frequência - **Hertz (HZ)**

L - coeficiente de auto-indução ou indutância - **Henry (H)**

ω - velocidade angular - **Radiano por segundo (rad/s)**

Circuito indutivo puro

Ao ser aplicada tensão à bobina, a corrente não surgirá imediatamente pois, como vimos atrás, surgirá no circuito, devido à auto-indução, uma corrente com um sentido tal que faz retardar o aparecimento da corrente principal no circuito. Esta apenas surgirá quando a tensão atingir o seu valor máximo. Ainda, devido aos fenómenos de auto-indução, a corrente irá aumentar enquanto a tensão decresce, e atinge um máximo quando a tensão aplicada é nula. A tensão inverte-se, a corrente começa a diminuir, mas esta diminuição é retardada e anula-se quando a tensão atinge o seu máximo negativo, ou seja, um quarto de período mais tarde.

O desfaseamento será então de $\pi / 2$ radianos ou seja 90° . A corrente está atrasada de $T / 4$ em relação à tensão.

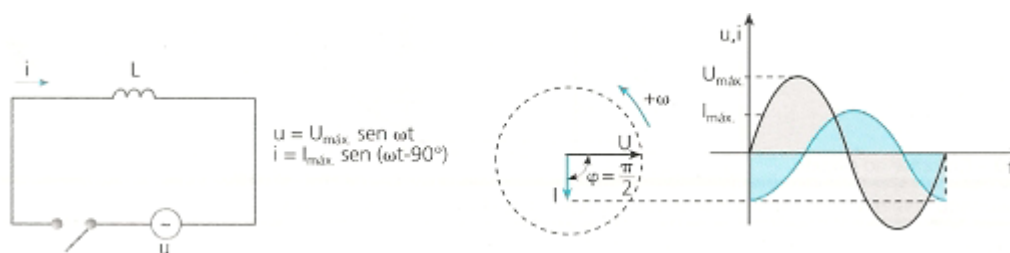


Figura 11.8 - Circuito puramente indutivo e representações algébrica, vectorial e cartesiana da tensão aplicada e da corrente que o percorre

EXERCÍCIO DE APLICAÇÃO - CIRCUITO PURAMENTE INDUTIVO

1. A uma bobina de 0,15 mH de coeficiente de auto-indução foi aplicada uma tensão sinusoidal de 1,2 V e 5 KHz de frequência. Calcule:

- 1.1 A reactância indutiva da bobina.
- 1.2 O valor eficaz da corrente que percorre a bobina.

11.3 Circuito puramente capacitivo

Como será o comportamento do condensador ao ser-lhe aplicada uma tensão alternada sinusoidal?

A lâmpada inserida no circuito da figura 11.9 brilha constantemente. A justificação reside na carga e descarga do condensador, existindo uma corrente no circuito.

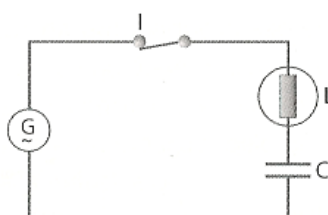


Figura 11.9 - Condensador alimentado a corrente alternada

De que dependerá então a intensidade de corrente num circuito capacitivo? Iremos verificar esta questão, recorrendo a uma alimentação não sinusoidal, para uma mais fácil compreensão.

Começaremos por analisar a influência da frequência no valor da intensidade de corrente.

Pela verificação da figura 11.10, podemos constatar que no circuito com frequência mais elevada, o valor médio da corrente é mais elevado, pois a tensão é invertida antes que a corrente tenha tempo de atingir um baixo valor durante a carga do condensador.

Para a baixa frequência, o valor médio da corrente, é inferior á situação anterior, pois a corrente de carga, antes da tensão se inverter, tem tempo de atingir valores reduzidos.

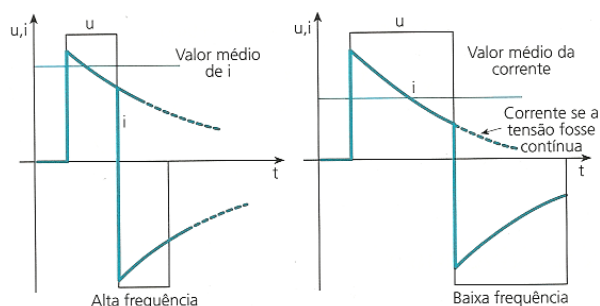


Figura 11.10 - Resposta de um condensador a uma onda rectangular de diferentes frequências

Deste modo, e para determinada capacidade, a **corrente média no circuito será tanto maior quanto maior for a frequência da tensão aplicada.**

Verifiquemos agora a influência da capacidade no valor da intensidade de corrente. Os dois condensadores devem possuir a mesma resistência. De modo análogo, quanto maior for a capacidade, a carga adquirida não chega a carregar o condensador, mantendo-se a corrente com valores elevados quando se dá a inversão de polaridade da tensão aplicada.

O valor médio de corrente será tanto maior quanto maior for o valor da capacidade do condensador.

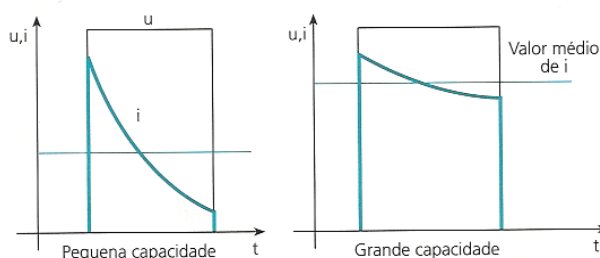


Figura 11.11 - Valor da corrente num circuito com condensadores de diferentes capacidades

Assim sendo, a **corrente será tanto maior quanto for a frequência, a capacidade e a tensão aplicada.**

Sendo a oposição à circulação de corrente a **reactância capacitiva X_C** , a lei de ohm virá:

$$U = X_C \cdot I$$

Sendo o valor de X_C dado por:

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

com:

$$\omega = 2\pi \cdot f$$

virá:

$$X_L = \frac{1}{\omega \cdot C}$$

em que:

X_C - reactância capacitiva - Ohm (Ω)

f - frequência - Hertz (HZ)

C - Capacidade - Farad (F)

ω - velocidade angular - Radiano por segundo (rad/s)

Circuito capacitivo puro

Ao iniciar-se a carga de um condensador, a diferença de potencial aos seus terminais é zero, tendo, ao contrário, a corrente o seu valor máximo. À medida que a carga vai aumentando, aumenta a tensão nos seus terminais, diminuindo consequentemente a corrente, até se anular, o que sucede quando a d.d.p. aos terminais do condensador atinge o máximo valor.

Na descarga, as curvas decrescem simultaneamente. No instante em que se inicia a descarga, a tensão parte do seu máximo positivo e a corrente do seu mínimo valor (zero). O condensador descarrega-se quando as armaduras têm igual número de electrões, atingido nesta altura a corrente o seu máximo negativo.

A tensão atinge o zero, enquanto a corrente já o havia atingido 90° antes. A corrente está avançada 90° em relação à tensão.

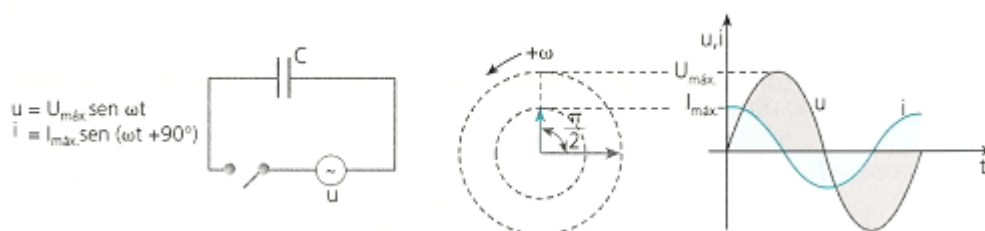


Figura 11.12 - Circuito puramente capacitivo e representações algébrica, vectorial e cartesiana da tensão aplicada e da corrente que o percorre

EXERCÍCIO DE APLICAÇÃO - CIRCUITO PURAMENTE CAPACITIVO

1. Uma tensão $u = 12\sqrt{2} \cdot \text{sen} \cdot 10^3 \pi \cdot t$ aplica-se a um condensador de $4,7 \mu\text{F} / 63 \text{ V}$. Determine:

- 1.1 O valor eficaz da reactância do condensador.
- 1.2 O valor eficaz da corrente.
- 1.3 A expressão algébrica do valor instantâneo da corrente.

11.4 Circuitos reais (série)

Os circuitos reais não são constituídos somente por resistências, bobinas ou condensadores. Na electrónica, existe necessidade de conjugar alguns destes elementos. É o que, seguidamente, iremos estudar, e **porque a corrente irá percorrer todos os elementos do circuito, será esta a grandeza que usaremos como referência.**

11.4.1 Circuitos R L

Será um circuito constituído por uma **bobina real que é equivalente a uma bobina pura (ideal) em série com uma resistência.**



Figura 11.13 - Bobina real e circuito equivalente

Vejamos como relacionar a tensão com a corrente num circuito série RL.

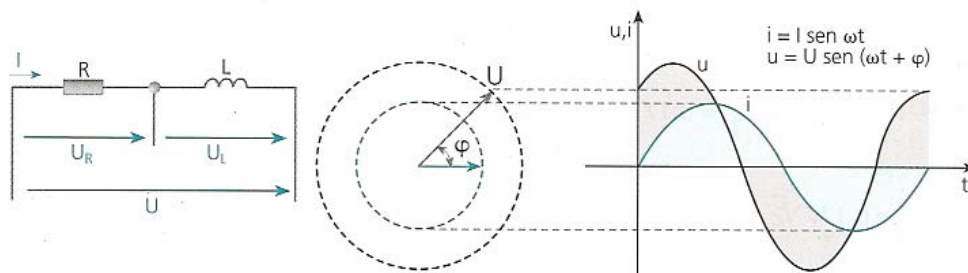


Figura 11.14 - Representação da tensão e corrente num circuito série RL

Para determinarmos o ângulo de desfasamento, marcam-se as tensões U_R e U_L , tomando por referência a grandeza comum que é a corrente (trata-se de um circuito série, logo a intensidade da corrente é constante ao longo do circuito). Sendo $U_R = R \cdot I$ e $U_L = X_L \cdot I$, resultará o diagrama vectorial da figura seguinte, onde U_R e U_L estão em **quadratura**, e que após serem adicionados originarão a tensão U . Por aplicação do teorema de Pitágoras teremos:

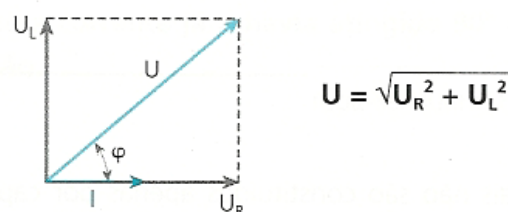


Figura 11.15 - Diagrama vectorial das tensões e corrente num circuito RL

Do triângulo das tensões podemos obter, dividindo por I ($Z = I / I$) o triângulo das impedâncias:

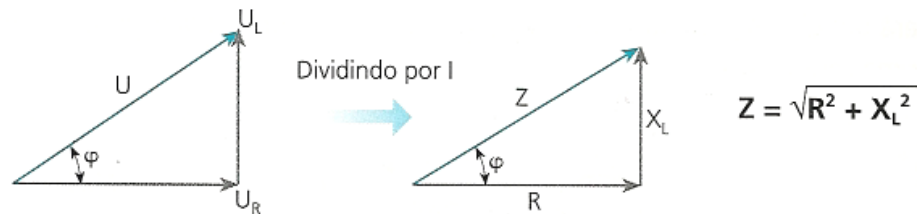


Figura 11.16 - Triângulo das tensões e das impedâncias

Poderemos ver através do triângulo calcular o ângulo de defasamento φ :

$\text{Cos } \varphi = \text{cateto adjacente} / \text{hipotenusa} \Rightarrow \text{Cos } \varphi = R / Z$ ou de outra forma: $R = Z \text{ cos } \varphi$

$\text{Sen } \varphi = \text{cateto oposto} / \text{hipotenusa} \Rightarrow \text{Sen } \varphi = X_L / Z$ ou de outra forma: $X_L = Z \text{ sen } \varphi$

EXERCICIO DE APLICAÇÃO - CIRCUITO SÉRIE RL

1. Aplica-se uma tensão de 220 V, 50 Hz à série de uma resistência de 30Ω com uma indutância de 0,16 H. Calcular:

- 1.1 A impedância do circuito.
- 1.2 A intensidade da corrente.
- 1.3 A tensão nos terminais da resistência e da bobina.
- 1.4 O ângulo de defasamento.
- 1.5 Construa o diagrama da corrente e das tensões.

11.4.2 Circuitos R C

Trata-se de um circuito constituído por um condensador real que é equivalente à série de um condensador ideal e de uma resistência.



Figura 11.17 - Condensador real e circuito equivalente

De igual modo iremos representar e verificar como se determina o ângulo de defasamento que neste caso será um ângulo negativo.

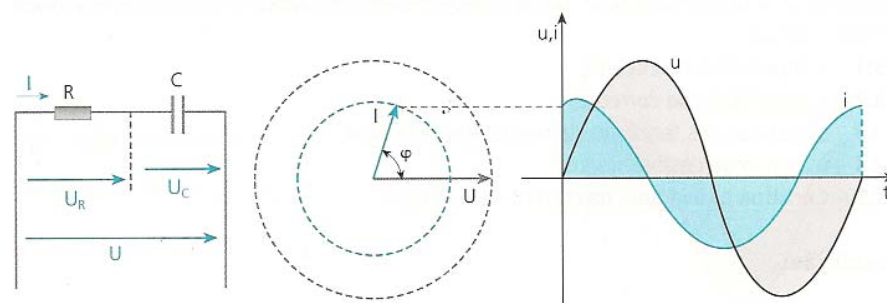


Figura 11.18 - Representação da tensão e corrente num circuito série RC

Marcando a tensão na resistência, em fase com a intensidade I, e a tensão no condensador em quadratura e em atraso com I, obteremos o triângulo das tensões depois de, vectorialmente, estas serem somadas.

Sendo: $U_R = R \cdot I$ e $U_C = X_C \cdot I$

Virá:

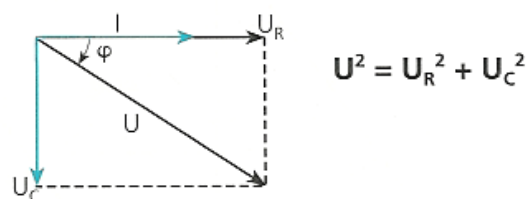


Figura 11.19 - Diagrama vectorial das tensões e corrente num circuito RC

Se dividirmos o triângulo então obtido pela intensidade teremos o triângulo das impedâncias.

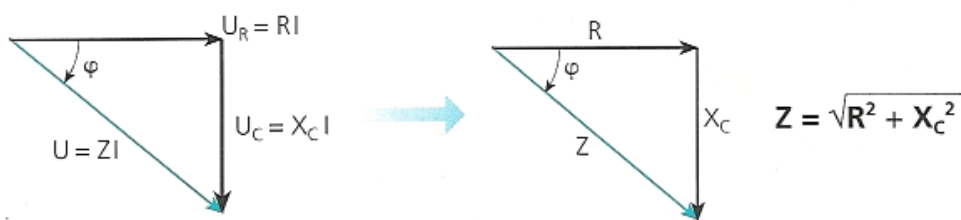


Figura 11.20 - Triângulo das tensões e das impedâncias

Poderemos ver através do triângulo calcular o ângulo de defasamento φ :

$\text{Cos } \varphi = \text{cateto adjacente} / \text{hipotenusa} \Rightarrow \text{Cos } \varphi = R / Z$ ou de outra forma: $R = Z \text{ cos } \varphi$

$\text{Sen } \varphi = \text{cateto oposto} / \text{hipotenusa} \Rightarrow \text{Sen } \varphi = X_C / Z$ ou de outra forma: $X_C = Z \text{ sen } \varphi$

Exercício Resolvido

1. Um condensador de $22 \mu\text{F}$ / 50V está ligado em série com uma resistência de 330Ω . A tensão aos terminais do condensador é 32 V, sendo a corrente no circuito 160 V. Determine:

- 1.1 reactância capacitiva.
- 1.2 A frequência da tensão.
- 1.3 A impedância do circuito.
- 1.4 A tensão total do circuito.
- 1.5 O co-seno do ângulo de defasamento.

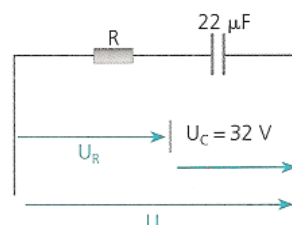


Figura 11.21 - Circuito RC em análise

11.4.3 Circuitos RLC

Teremos agora que considerar a série de uma resistência, uma bobina e um condensador considerados elementos ideais. Como já foi referido, na realidade, todos os componentes têm estes três elementos, se bem que algum ou alguns deles sejam desprezáveis.

Iremos, de modo análogo, determinar o ângulo de defasamento entre a tensão, a corrente e respectiva representação vectorial.

Antecipadamente, reconheça-se que $\mathbf{U} \neq \mathbf{U}_R + \mathbf{U}_L + \mathbf{U}_C$. A expressão apenas será validade quando tratarmos de grandezas vectoriais. Virá:

$$\vec{U} = \vec{U}_R + \vec{U}_L + \vec{U}_C$$

Sendo a corrente a grandeza comum aos três elementos do circuito, construiremos o diagrama vectorial partindo do vector corrente:

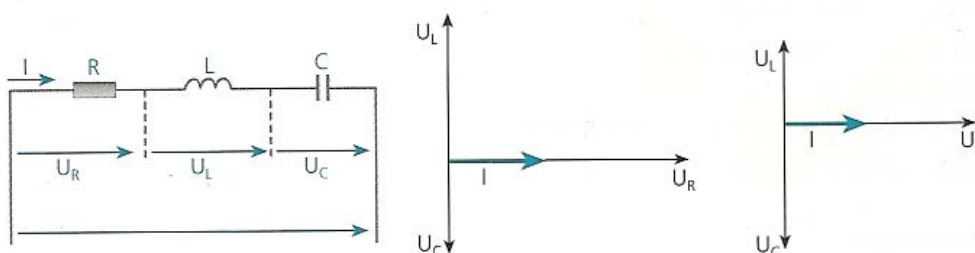


Figura 11.22 - Representação da tensão e corrente num circuito série RLC

As tensões em L e C estão em quadratura com a corrente I, sendo \mathbf{U}_L em avanço em relação a \mathbf{I} (como sabemos dos circuitos puramente indutivos a corrente está em atraso em relação à tensão) e \mathbf{U}_C em atraso em relação a \mathbf{I} (pois nos circuitos com condensadores ideais a corrente está avançada em relação à tensão).

- Se \mathbf{U}_L for dominante face a \mathbf{U}_C , teremos um circuito predominantemente indutivo.
- Se \mathbf{U}_C for dominante face a \mathbf{U}_L , teremos um circuito predominantemente capacitivo.

Para obtermos o vector U teremos de proceder como anteriormente, ou seja somar vectorialmente as tensões na resistência, na bobina e no condensador. Por facilidade, efectua-se previamente a **soma de $U_L + U_C$** dos vectores equipolentes aplicados à extremidade de U_R . Obteremos:

Circuito puramente indutivo

No circuito puramente indutivo $U_L > U_C$ logo $\varphi > 0$.

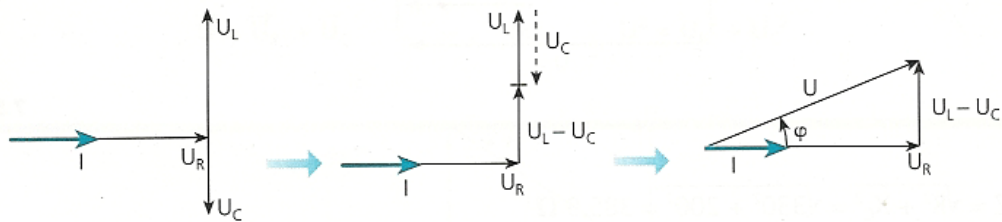


Figura 11.23 - Obtenção do triângulo das tensões e corrente num circuito puramente indutivo

Circuito puramente capacitivo

No circuito puramente capacitivo $U_L < U_C$ logo $\varphi < 0$.

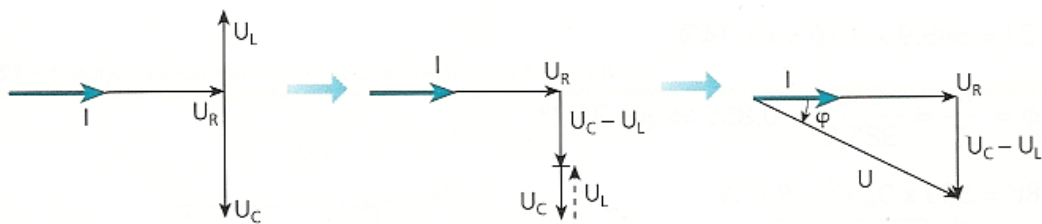


Figura 11.24 - Obtenção do triângulo das tensões e corrente num circuito puramente capacitivo

Circuito puramente resistivo

No circuito puramente resistivo $U_L = U_C$ logo $\varphi = 0$, uma vez que se anulam L e C.

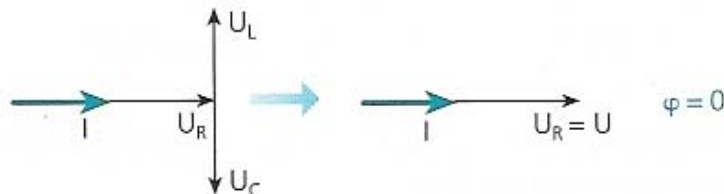


Figura 11.25 - Diagrama da corrente e tensões num circuito puramente resistivo

Analogamente, como nos circuitos anteriores, teremos o triângulo das tensões e das impedâncias, embora neste caso teremos dois triângulos, um para os circuitos predominantemente indutivos $\varphi > 0$, e outro para circuitos predominantemente capacitivos $\varphi < 0$.

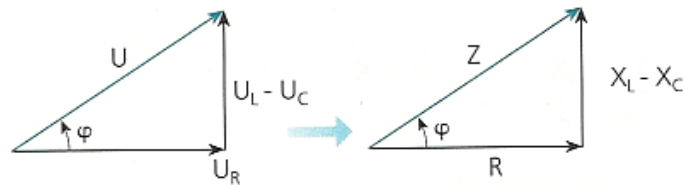


Figura 11.26 - Obtenção do triângulo das impedância num circuito puramente indutivo

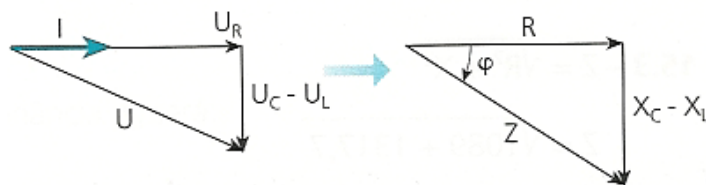


Figura 11.27 - Obtenção do triângulo das impedância num circuito puramente capacitivo

Pela aplicação do teorema de Pitágoras obtemos:

$$Z = \sqrt{R^2 + (X_L + X_C)^2}$$

$\cos \varphi = \text{cateto adjacente} / \text{hipotenusa} \Rightarrow \cos \varphi = R / Z$ ou de outra forma: $R = Z \cos \varphi$

$\text{Sen } \varphi = \text{cateto oposto} / \text{hipotenusa} \Rightarrow \text{sen } \varphi = X_C / Z$ ou de outra forma: $X = Z \text{ sen } \varphi$

$\text{Tg } \varphi = \text{cateto oposto} / \text{cateto adjacente} \Rightarrow \text{tg } \varphi = X / R$

EXERCÍCIOS DE APLICAÇÃO - CIRCUITO SÉRIE RLC

1. O circuito série RLC representado na figura 11.28 é alimentado por uma tensão sinusoidal de 10V, 500 Hz. Sendo $R = 33 \Omega$, $L = 10\text{mH}$ e $C = 4,7 \mu\text{F}$, calcule:

- 1.1 A reactância indutiva.
- 1.2 A reactância do circuito.
- 1.3 A impedância do circuito.
- 1.4 O valor da intensidade de corrente no circuito.
- 1.5 O valor das tensões na resistência, na indutância e no condensador.

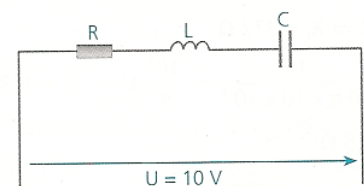


Figura 11.28 - Circuito RLC em análise

2. Um circuito série é formado por uma bobina de 1,2H de coeficiente de auto-indução um condensador de $10 \mu\text{F}$ / 100 V e uma resistência de valor desconhecido. Ao conjunto é aplicada uma tensão de 13,35 V, 50 Hz, sendo o circuito percorrido por uma corrente de 0,15 A. Determine:

- 2.1 A impedância do circuito.
- 2.2 A reactância do circuito.
- 2.3 O valor da resistência desconhecida.
- 2.4 O valor das tensões no condensador e na bobina.



Capítulo 12 – Potência em C.A.

Considerando um circuito indutivo real, fazemos a decomposição do **vector corrente** segundo os eixos, obtendo-se os vectores I_r e I_a .



Figura 12.1 - Componentes activa e reactiva da corrente

O vector I_a , designa-se por **corrente activa em fase com a tensão U**, será igual a:

$$I_a = I \cos \varphi$$

O vector I_r é designado por **corrente reactiva**, estando em **quadratura com a tensão U**:

$$I_r = I \sin \varphi$$

12.1 Potência activa, aparente e reactiva

Potência Activa

É a potência média igual ao produto da tensão pela componente **activa da corrente**

$$P = U \cdot I_a = U \cdot I \cdot \cos \varphi$$

Representa-se por P e expressa-se em Watts (W) e mede-se com o wattímetro.

É esta a potência consumida pelas resistências que vai produzir calor que nelas se liberta por efeito de Joule.

Potência Aparente

É igual ao produto de U por I:

$$S = U \cdot I$$

Representa-se por S e exprime-se em volt-ampère (VA).

É a potência dos circuitos indutivos e capacitivos. A potência activa nestes circuitos é nula.

Potência Reactiva

É o produto da tensão pela componente reactiva da corrente.

$$Q = U \cdot I_r = U \cdot I \cdot \text{sen } \varphi$$

Representa-se por Q. A unidade em que é expressa é o volt-ampère reactivo (VAR)

A energia oscilante em certo intervalo de tempo é medida pelos contadores de energia reactiva.

As três potências relacionam-se vectorialmente, originando um triângulo, designado por **triângulo das potências**, que também pode ser construído por multiplicação dos lados do triângulo das tensões pela corrente I.



Figura 12.2 - Triângulo das potências num circuito RL

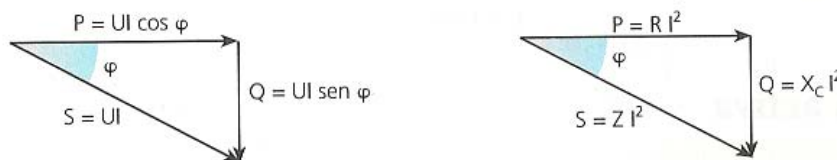


Figura 12.3 - Triângulo das potências num circuito RC

12.2 Factor de potência

Interessa relacionar a potência activa com a máxima potência disponível para determinado valor de corrente.

$$\text{Factor de potência} = \frac{\text{Potência activa}}{\text{Potência aparente}} = \frac{P}{S}$$

Analisando os triângulos acima verifica-se que o **factor de potência** é o co-seno do ângulo ou seja, **cos φ**.

12.2.1 Análise prática do factor de potência.

Problema do factor de potência. Correção do factor de potência.

Nos utilizadores que dispõem de instalações com bobinas, o $\cos \varphi$ é reduzido a baixos valores, o que origina um aumento da energia reactiva que, apesar de não ser consumida, corresponde a uma corrente de circulação. A corrente nos condutores não é toda aproveitada como seria desejável.

Vejam os casos concretos:

Imaginemos duas fábricas consumindo a mesma potência de 400 kW a uma tensão de 5 kV mas com distintos factores de potência: $\cos \varphi$ na fábrica 1 = 1 e $\cos \varphi$ na fábrica 2 = 0,5.

Ao fim de igual tempo de funcionamento, os dois utilizadores terão consumido a mesma energia. Calculemos as correntes utilizadas por cada um:

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

FABRICA 1 :

$$I_1 = P_1 / (U_1 \cdot \cos \varphi_1) = 400 / (5 \times 1) = 80 \text{ A}$$

FABRICA 2 :

$$I_2 = P_2 / (U_2 \cdot \cos \varphi_2) = 400 / (5 \times 0,5) = 160 \text{ A}$$

A segunda instalação, para a mesma potência, necessita do dobro da intensidade de corrente da primeira. Daqui resultam consequências tanto para produtores como para consumidores. Assim, tanto produtores como distribuidores de energia terão de dispor de alternadores com potências mais elevadas para poderem fornecer a corrente, o que provocará um dimensionamento de toda a aparelhagem, linhas de transporte e distribuição para maiores intensidades. Logicamente, existirão maiores quedas de tensão e perdas por efeito de Joule. A potência de perdas aumenta com o quadrado da intensidade de corrente. Deste modo, é exigido um pagamento consoante a energia reactiva que circula para o que se instalam contadores de energia reactiva.

A empresa fornecedora de energia nacional estabelece que, quando a energia reactiva ultrapassa 3 / 5 da activa, cada Kvar excedente é pago a 1 / 3 do preço do kWh.

Quanto aos utilizadores, também é conveniente disporem de um elevado factor de potência porque, se tal não suceder, terão de sobredimensionar aparelhagem de manobra e protecção, o que equivale a maiores custos.

Como resolver tal problema?

A solução consiste em colocar em paralelo com o receptor um condensador que absorva uma corrente I_C de grandeza igual à componente reactiva da corrente I_r de modo a anularem-se. O conjunto fica puramente óhmico, ou seja $\cos \varphi = 1$, sendo nula a potência reactiva.

Quando existem vários receptores, a compensação poderá ser efectuar-se individualmente, por grupos ou para toda a instalação.

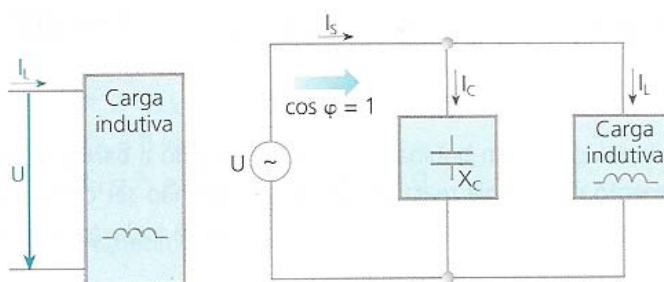


Figura 12.4 - Compensação do factor de potência



Capítulo 13 – Transformador monofásico

Por ser necessário adaptar a tensão às diferentes aplicações, que podem variar desde as dezenas de Volt, nas diversas aplicações da electrónica, até algumas centenas de Volt, na indústria e iluminação, surgem os **transformadores**.



Figura 13.1 - Simbologia do transformador monofásico

Os transformadores são máquinas estáticas, sem peças em movimento, cuja finalidade é a de transmitir, por meio dum campo magnético alternado, energia eléctrica de um circuito para outro sem ligação directa, com o nível tensão desejado, sem alterar a frequência.

Quando o transformador recebe energia e a **transfere num valor superior** dizemos que o transformador é **elevador**.

Quando o transformador recebe energia e a **transfere num valor inferior** dizemos que o transformador é **abaixador**.

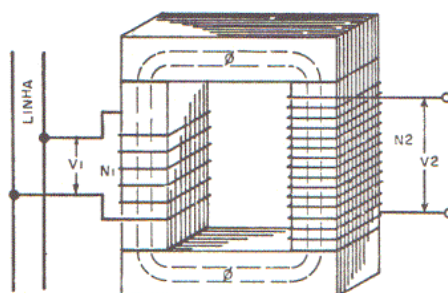


Figura 13.2 - Transformador monofásico

Um transformador monofásico é constituído por dois enrolamentos em fio de cobre isolado, colocados no mesmo circuito magnético fechado.

O enrolamento ligado á fonte de alimentação designa-se por **primário**, enquanto o enrolamento que fornece a energia chama-se **secundário**. O circuito magnético deverá ser folheado (formado por pequenas chapas juntas umas ás outras e isoladas) para serem reduzidas as perdas.

O enrolamento com maior n.º de espiras o de **alta tensão** (A.T.), e o com menor n.º de espiras é o enrolamento de **baixa tensão** (B.T.). O enrolamento de alta tensão pode ser tanto o primário como o secundário, conforme se trate, respectivamente dum transformador **abaixador** ou **elevador**.

Funcionamento de um transformador ideal

O princípio de funcionamento de um transformador baseia-se na produção, numa das bobinas, de um campo magnético alternado. Se as linhas desse campo atravessarem a outra bobina, aos seus terminais surgirá uma f.e.m. induzida da mesma frequência do sinal aplicado.

Admitindo que todas as linhas de força do campo magnético primário atravessam o enrolamento secundário, a f.e.m. induzida dependerá da razão entre o n.º de espiras do primário e do secundário.

Um transformador ideal é aquele que não tem perdas, ou seja, aquele cuja potência do secundário, $P_2 = U_2 \cdot I_2$, é igual à potência do primário, $P_1 = U_1 \cdot I_1$.

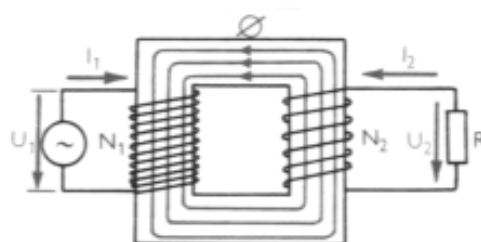


Figura 13.3 - Transformador em carga

Vejam como relacionar as grandezas de entrada e de saída. Suponha-se que em determinado instante é aplicada ao primário uma tensão U_1 que faz circular nesse enrolamento uma corrente I_1 , através de N_1 espiras, que provoca um fluxo com o sentido indicado na figura. Este fluxo, fechando-se ao longo do circuito magnético, fará surgir uma f.e.m. induzida no secundário, com sentido tal que tende a produzir nesse enrolamento uma oposição ao fluxo, isto é explicado recorrendo à Lei de Lenz que nos diz que uma corrente induzida tem uma direcção tal que se opõe ao efeito que a originou.

Assim, para o fluxo magnético criado, a f.e.m. induzida, em cada bobina será proporcional ao n.º de espiras nessa mesma bobina.

A relação básica num transformador é dada por:

$$\frac{U_1}{U_2} = \frac{N_1}{N_2}$$

Relativamente a corrente, teremos:

$$\frac{I_1}{I_2} = \frac{N_2}{N_1}$$

O transformador é um conversor de energia eléctrica, de alta eficiência (podendo ultrapassar 99% de rendimento), que altera tensões e correntes, e isola circuitos.

Perdas num transformador. Transformador Real

Nas considerações que fizemos admitimos que o transformador era ideal, contudo na prática não é isso que se passa, pois o rendimento de um transformador varia entre 80% e 98%, dependendo dos diferentes tipos de perdas. As principais são:

- Perdas no ferro (Núcleo onde estão enroladas as espiras): fugas magnéticas, correntes de Foucault.
- Perdas no cobre : resistência dos enrolamentos
- Perdas devido a capacidade parasitas: capacidade repartida entre as espiras de cada enrolamento; capacidade entre enrolamentos; capacidade entre cada enrolamento e a terra.

As perdas não podem ser totalmente suprimidas, mas podem ser notavelmente reduzidas por escolha e disposição dos elementos que compõem o transformador.

O **rendimento de um transformador** será dado por:

$$\eta = \frac{\text{Potência de saída}}{\text{Potência de saída} + \text{Potência de perdas}}$$

Características de um transformador

As características a seguir indicadas, são algumas das que encontramos nos transformadores:

- Frequência
- Tensões nominais
- Potência nominal (S) : $S = U.I$, trata-se da potência aparente, expressa em VA
- Correntes nominais
- Corrente em vazio (I_0)
- Queda de tensão (ΔU) – diferença entre as tensões no secundário, em vazio e em carga.
- Rendimento

Tipos de transformadores

Transformador de alimentação

È usado em fontes, convertendo a tensão da rede na necessária aos circuitos electrónicos. O seu núcleo é feito com chapas de aço - silício, que tem baixas perdas, em baixas frequências, por isto é muito eficiente. Às vezes possuem blindagens, invólucros metálico.

Transformador de áudio

Usado em aparelhos de som a válvulas e certas configurações com transístores, no acoplamento entre etapas amplificadoras e saída para o altifalante. Geralmente, é semelhante ao transformador de alimentação em forma e no núcleo de aço - silício, embora também se use a ferrite. A sua resposta de frequência dentro da faixa de áudio, 20 a 20 000 Hz, não é perfeitamente plana, mesmo usando materiais de alta qualidade no núcleo, o que limita o seu uso.

Transformador de distribuição

Encontrado nos postes e entradas de força em alta tensão (indústrias), são de alta potência e projectados para ter alta eficiência (da ordem dos 99%), de modo a minimizar o desperdício de energia e o calor gerado. Possui refrigeração a óleo, que circula pelo núcleo dentro da carcaça metálica com grande área de contacto com o ar exterior. O seu núcleo também é constituído com chapas de aço - silício, e pode ser monofásico ou trifásico (três enrolamentos).

Transformador de RF

Empregam-se em circuitos de rádio frequência – RF – acima de 30 KHz, no acoplamento entre etapas dos circuitos de rádio e TV. A sua potência em geral é baixa, e os enrolamentos têm poucas espiras. O núcleo é de ferrite, material sintético composto de óxidos de ferro, níquel, zinco, cobalto e magnésio em pó, aglutinados por um plastificante. A ferrite caracteriza-se por ter alta permissividade, que se mantém em altas frequências (o que não acontece com chapas de aço - silício). Costumam ter blindagem de alumínio, para dispersar interferências, inclusive de outras partes do circuito.

Autotransformadores

Se aplicarmos uma tensão a uma parte de um enrolamento (uma derivação 9, o campo induzirá uma tensão maior nos extremos do enrolamento. Este é o princípio do autotransformador.

Uma característica importante dele é o menor tamanho, para certa potência, que um transformador. Isto não se deve apenas ao uso de uma só bobina, mas ao facto da corrente de saída ser parte fornecida pelo lado alimentado, parte induzida pelo campo, o que reduz este, permitindo um núcleo menor, mais leve e mais barato. A desvantagem é não ter isolamento entre a entrada e a saída, limitando as aplicações.

Aplicações prática dos transformadores – Transporte e distribuição de energia eléctrica

As exigências técnicas e económicas impõem a construção de centrais, em geral situadas muito longe dos centros de aproveitamento, pois devem utilizar a energia hidráulica dos lagos e rios das montanhas. Surge assim a necessidade do transporte da energia eléctrica por meio de linhas de comprimento notável. Por motivos económicos e de construção, as secções dos condutores destas linhas devem ser mantidos dentro de determinados limites, o que torna necessária a limitação da intensidade das correntes nas mesmas. Assim sendo, as linhas deverão ser construídas para funcionar com uma tensão elevada, que em certos casos atinge as centenas de milhares de Volts. Estas realizações são possíveis em virtude da corrente alternada poder ser transformada facilmente de baixa para alta tensão e vice-versa, por meio de transformadores.

Os geradores instalados nas centrais geram a energia eléctrica com a tensão de aproximadamente 6000 Volts. Para se efectuar o transporte desta energia, eleva-se a tensão a um valor oportuno por meio de um transformador elevador. Na chegada da linha, outro transformador executa a função inversa, isto é, reduz a tensão ao valor necessário para a utilização. Podem então ser escolhidas nas diferentes fases, diferentes tensões, ou seja, a gerada na central, a de transporte e a de distribuição, dando a cada uma o valor que se apresenta mais conveniente. Naturalmente, nestas transformações o valor da intensidade de corrente sofrerá a transformação inversa à da tensão, pois o produto das mesmas, isto é , a potência eléctrica, deve ficar inalterada.

EXERCÍCIOS DE APLICAÇÃO - TRANSFORMADORES MONOFÁSICOS

1. Um transformador de campainha converte 220 V em 12 V. Se o enrolamento primário possui 330 espiras, qual o número de espiras do secundário.



Capítulo 14 – Introdução aos sistemas trifásicos

14.1 Comparação entre os sistemas trifásicos e os sistemas monofásicos

Apresentam-se a seguir algumas vantagens dos sistemas trifásicos em relação aos monofásicos, a nível da sua produção, transporte e utilização:

- Considerando dois alternadores, um monofásico e outro trifásico, de igual volume e preço, o segundo tem uma potência aproximadamente 50% superior ao primeiro. Tal deve-se ao facto de haver um maior aproveitamento do perímetro do estator, isto é, há mais bobinas que são sede de f.e.ms. induzidas.
- O somatório da secção dos condutores necessários para transportar uma determinada potência é menor que nos sistemas monofásicos, em igualdade de condições de potência transportada, perdas e tensão nominal de transporte.
- Para transportar uma dada quantidade de energia bastam três (ou quatro, com neutro) fios em trifásico, enquanto em monofásico seriam necessários seis fios de igual secção (ou dois de secção tripla).
- A capacidade dos sistemas trifásicos de produzir campos magnéticos girantes, permite a utilização dos motores assíncronos trifásicos, aparelhos simples, robustos e económicos que detêm a quase totalidade do mercado em tracção eléctrica industrial.
- A partir de um sistema trifásico podem obter-se três sistemas monofásicos (tal como em nossas casas).

14.2 Produção - Alternador Trifásico

Descrevemos anteriormente a produção de corrente alternada sinusoidal por meio de um alternador. Na realidade, a maior parte dos alternadores geram tensões trifásicas, isto é, tem três bobinas idênticas e independentes, dispostas simetricamente no estator, formando ângulos de 120° entre si.

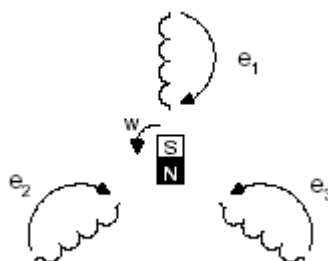


Figura 14.1 - Produção de três f.e.m.'s por meio de um alternador trifásico

Quando o rotor roda, induz-se em cada bobina uma f.e.m. alternada sinusoidal. Estas f.e.m. têm igual amplitude máxima e estão desfasadas de 120° umas das outras, ou seja, de $1/3$ de período.

Estas grandezas podem representar-se em termos matemáticos como:

$$e_1 = E_{m1} \cdot \text{sen.}(\omega t)$$

$$e_2 = E_{m2} \cdot \text{sen.}(\omega t - 120^\circ)$$

$$e_3 = E_{m3} \cdot \text{sen.}(\omega t - 240^\circ)$$

Estas f.e.ms. (tensões) podem representar-se graficamente tal como na figura seguinte:

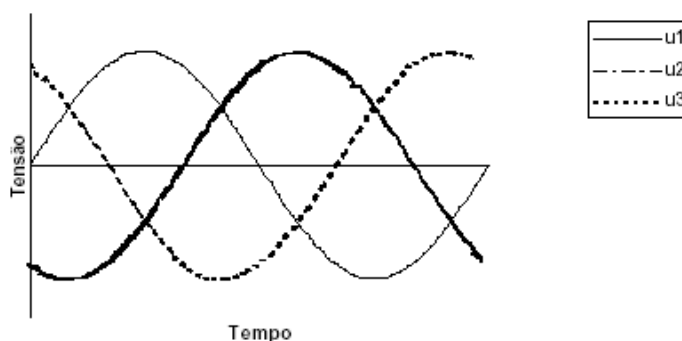


Figura 14.2 - Tensão num sistema trifásico

Assim, este alternador designa-se por **alternador trifásico**, dado que produz três tensões alternadas com fases diferentes. O alternador que apenas produz uma tensão designa-se por **alternador monofásico**. Tal como na corrente alternada monofásica, estas grandezas temporais podem representar-se vectorialmente.

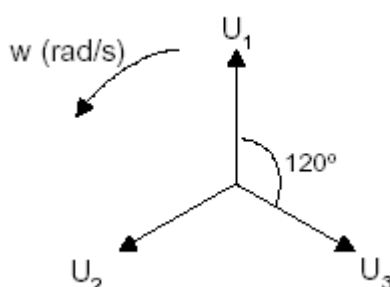


Figura 14.3 - Vectores tensão num sistema trifásico

14.3 Sistema Equilibrado

Consideremos as três bobinas do alternador atrás descrito, a alimentarem três receptores idênticos (resistências, neste caso), um em cada fase.

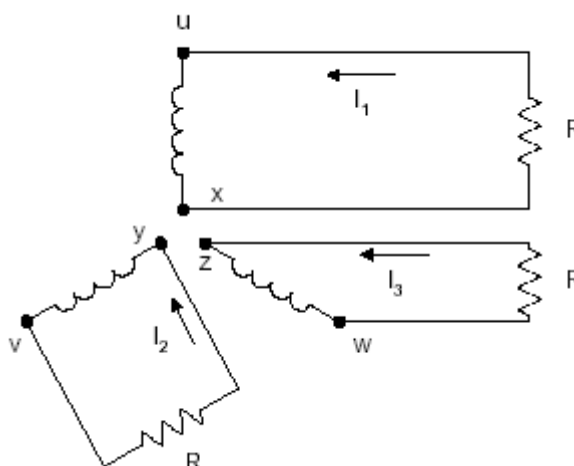


Figura 14.4 - Alimentação independente de três receptores idênticos

Para alimentar independentemente três receptores, é portanto necessário utilizar seis fios. Se os três receptores tiverem a mesma impedância, estes são percorridos por três corrente I_1 , I_2 e I_3 , com idêntico valor eficaz mas desfasadas de 120° .

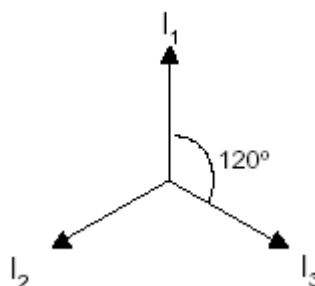


Figura 14.5 - Vectores corrente num sistema trifásico equilibrado

Diz-se então que o sistema está **equilibrado**, pois a soma das três correntes é sempre nula (a soma de três vectores iguais e desfasados de 120° é um vector nulo).

14.4 Condutor Neutro

Se reunirmos os três terminais x, y, z, num único ponto **N**, chamado de **ponto neutro** e substituirmos os três condutores de retorno (vindos dos receptores) por um único condutor - **condutor neutro** (ou fio neutro), a corrente nesse condutor será nula.

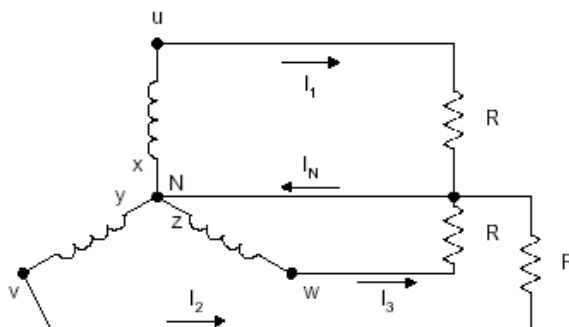


Figura 14.6 - Sistema equilibrado de cargas com neutro (corrente no neutro é nula)

Pode desta forma distribuir-se a energia eléctrica por meio de **quatro** condutores, sendo **três** designados por **condutores de fase** (activos) ou simplesmente **fases**, em linguagem corrente.

As três fases simbolizam-se normalmente pelas letras **R, S e T**. O condutor de neutro está normalmente ligado à terra, pelo que se encontra ao potencial zero.

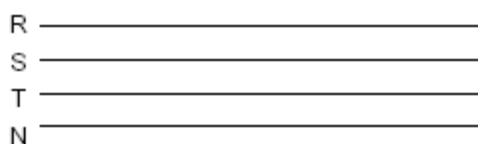


Figura 14.7 - Transporte de energia eléctrica trifásica por meio de quatro condutores

14.5 Tensões Simples e Compostas

Num sistema trifásico existem diferentes tensões:

Tensões simples - U_s - Tensão entre cada condutor de fase e o neutro. Nas redes de distribuição de baixa tensão, aproximadamente 230 V.

Tensões compostas - U_c - Tensão entre dois condutores de fase. Nas redes de distribuição de baixa tensão, aproximadamente 400 V.

Na figura seguinte, U_{RN} é uma tensão simples e U_{ST} é uma tensão composta:

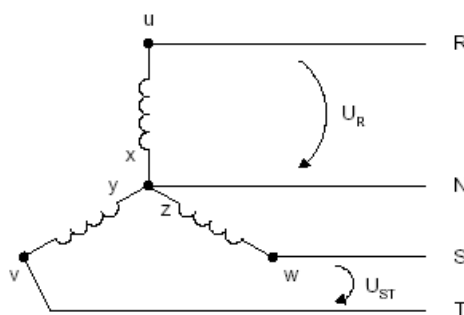


Figura 14.8 - Tensões simples e compostas

Temos portanto três tensões simples e três tensões compostas distintas entre si:

Tensões simples: U_R , U_S , U_T

Tensões compostas:

Tensão entre a fase R e a fase S - $U_{RS} = U_R - U_S$

Tensão entre a fase S e a fase T - $U_{ST} = U_S - U_T$

Tensão entre a fase T e a fase R - $U_{TR} = U_T - U_R$

Podemos também representar estas tensões em termos vectoriais:

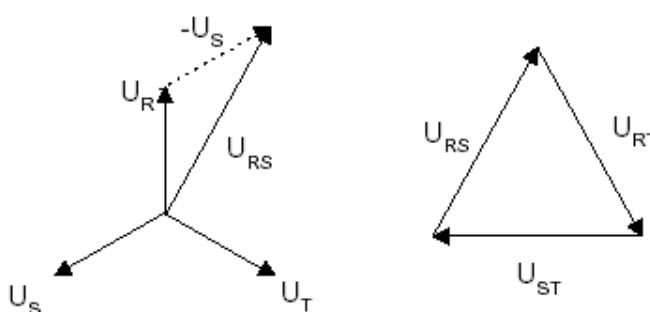


Figura 14.9 - Representação vectorial das tensões simples e compostas

Demonstra-se que o comprimento dos vectores das tensões compostas é $\sqrt{3}$ vezes superior ao das tensões simples, ou seja:

$$U_c = \sqrt{3} \cdot U_s$$

De facto, para as redes de distribuição de **baixa tensão**, temos que

$$U_s \approx 230 \text{ V} \quad \text{e} \quad U_c \approx \sqrt{3} \cdot 230 \approx 400 \text{ V}$$

Nas **redes de distribuição**, normalmente, indicam-se as tensões do modo: **230/400 V**.

Nas redes de **transporte de alta e média tensões**, apenas se indica o valor das tensões compostas. Assim, quando é indicado que uma linha tem tensões de **220 kV** ou **30 kV**, são os **valores eficazes de tensões compostas**.

14.6 Ligação de Receptores Trifásicos - Triângulo e Estrela

Os receptores trifásicos são formados por três elementos eléctricos (bobinas, resistências, etc.) que podem ser ligados de duas maneiras:

- Em **estrela** - Y
- Em **triângulo** - Δ

Na ligação de receptores **em estrela**, já considerada atrás, poderão ocorrer dois casos:

- Os receptores têm a mesma impedância - **sistema equilibrado**.
- Os receptores têm impedâncias diferentes - **sistema desequilibrado**.

Repare-se que num **sistema em estrela equilibrado**, o condutor neutro é dispensável (tal como foi referido atrás), isto é, ele pode ser retirado sem alteração do funcionamento dos receptores, já que a sua corrente é sempre nula. De facto, cada uma das linhas de fase faz de retorno em relação às outras duas.

Há motores trifásicos cujas bobinas estão ligadas em estrela. Assim, poder-se-ia, só idealmente, alimentar o motor apenas com as três fases, dispensando-se o neutro.

No caso da **estrela desequilibrada**, o somatório das correntes nas fases não é nulo, sendo **indispensável a ligação no condutor de neutro**. Mesmo nos casos em que a **estrela é normalmente equilibrada, não se deve cortar o neutro**, dado que se faltar uma fase (por corte de um dispositivo de protecção, por exemplo) estabelece-se um desequilíbrio de tensões. Um exemplo de um receptor trifásico desequilibrado e ligado em estrela é o fogão eléctrico. Este têm diversas resistências para o forno e para os discos. Estas resistências estão distribuídas pelas três fases, mas não têm todas o mesmo valor de resistência. Além disso, não estão sempre todas ligadas simultaneamente, pelo que é necessário levar o condutor de neutro ao aparelho. Assim, além dos três condutores de fase, temos ainda o condutor de neutro e o condutor de terra.

Saliente-se ainda que se pretende equilibrar ao máximo os sistemas trifásicos, de modo a que a corrente no condutor de neutro seja o menor possível. Uma menor corrente no neutro tem a vantagem de permitir a utilização de um condutor de menor secção, para as mesmas perdas energéticas. É por isso que o condutor de neutro é normalmente mais fino que os condutores de fase (caso das linhas de transporte de energia eléctrica com neutro).

Na **ligação de receptores em triângulo**, os receptores estão ligados entre as fases, tal como mostra a figura seguinte, para o caso de resistências:

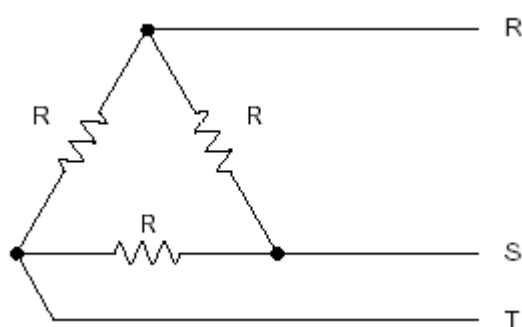


Figura 14.10 - Ligação de receptores em triângulo

Tal como na ligação de receptores em estrela, na ligação em triângulo poderão ocorrer dois casos:

- Os receptores têm a mesma impedância - **sistema equilibrado**.
- Os receptores têm a impedâncias diferentes - **sistema desequilibrado**.

A corrente num receptor (de fase) pode ser calculada dividindo a tensão composta aos seus terminais pela sua impedância. As correntes de linha podem ser determinadas de duas maneiras, consoante o sistema está equilibrado ou não:

- **Sistema equilibrado** - as correntes nas linhas (R, S, T) são $\sqrt{3}$ vezes superiores às correntes nos receptores (correntes de fase).
- **Sistema desequilibrado** - as correntes nas linhas são determinadas em termos vectoriais, através da aplicação da **Lei dos Nós de Kirchhoff** aos três nós.

Como conclusão pode dizer-se que nas montagens em estrela com neutro e em triângulo os receptores (monofásicos) funcionam independentemente uns dos outros.

14.7 Cálculo de Potência dos Sistemas Trifásicos

Quer a carga seja equilibrada ou não, podem calcular-se (medir-se) as **potências consumidas** em cada fase. Assim, somam-se as potências activas aritmeticamente de forma a obter a potência total:

$$P = P_R + P_S + P_T$$

As **potências reactivas** têm de se somar algebricamente (tendo em conta se são indutivas ou (capacitivas).

$$Q = Q_R + Q_S + Q_T$$

No caso de **sistemas equilibrados** (triângulo ou estrela), podem utilizar-se as fórmulas que seguidamente se apresentam:

$$P = \sqrt{3} \cdot U_c \cdot I_L \cdot \cos \varphi \quad , \text{ que corresponde á } \mathbf{potência activa}.$$

$$Q = \sqrt{3} \cdot U_c \cdot I_L \cdot \sin \varphi \quad , \text{ que corresponde á } \mathbf{potência reactiva}.$$

$$S = \sqrt{3} \cdot U_c \cdot I_L \quad , \text{ que corresponde á } \mathbf{potência aparente}.$$

em que:

U_c - Tensão composta (entre duas fases)

I_L - Corrente nas linhas

