

MANUAL DO ALUNO

DISCIPLINA ELETRICIDADE E ELETRÓNICA

Módulos 1, 2, 3 e 4

República Democrática de Timor-Leste
Ministério da Educação



FICHA TÉCNICA

TÍTULO

MANUAL DO ALUNO - DISCIPLINA DE ELETRICIDADE E ELETRÓNICA
Módulos 1 a 4

AUTOR

JORGE FLÁVIO

COLABORAÇÃO DAS EQUIPAS TÉCNICAS TIMORENSES DA DISCIPLINA
XXXXXXX

COLABORAÇÃO TÉCNICA NA REVISÃO
XXXXXXXXXX

DESIGN E PAGINAÇÃO

UNDESIGN - JOAO PAULO VILHENA
EVOLUA.PT

IMPRESSÃO E ACABAMENTO
XXXXXX

ISBN

XXX - XXX - X - XXXXX - X

TIRAGEM

XXXXXXX EXEMPLARES

COORDENAÇÃO GERAL DO PROJETO
MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO DE TIMOR-LESTE
2013



Índice

Corrente Contínua	9
Apresentação.....	10
Introdução	10
Objetivos de aprendizagem	10
Âmbito de conteúdos	11
História da eletricidade	12
Constituição da matéria.....	19
Constituição do átomo	19
Estado fundamental e estado excitado de um átomo	21
Exercícios	24
Propriedades e características gerais dos materiais	25
Classificação geral dos materiais	25
Propriedades e grandezas gerais dos materiais	26
Grandezas características dos materiais elétricos	28
Principais materiais condutores	29
Principais materiais isolantes	32
Exercício.....	34
Modos de eletrização	35
Eletrização por fricção	35
Eletrização por contacto	36
Eletrização por indução	36
Fontes e Formas de Energia	38
Fontes de energia	39
Fontes de energia renováveis	39
Fontes de energia não renováveis	41
Formas de energia	41
Impactos ambientais	42
Princípio da Conservação da Energia	45
Circuito elétrico. Constituição e função de cada elemento.	47
Conceito de circuito aberto e circuito fechado.....	48



Definição de sobreintensidade, sobrecarga e curto-circuito.	48
Geradores elétricos	49
Força eletromotriz e resistência interna de um gerador	49
Resistência elétrica	52
Fatores que afetam a resistência de um condutor. Resistividade	53
Código de cores das resistências	54
Variação da resistência com a temperatura. Coeficiente de temperatura.	56
Condutância elétrica	57
Exercícios	57
Associação de resistências.....	57
Associação em série	58
Associação em paralelo	58
Associação mista	59
Exercícios	60
Bibliografia	61
Análise de Circuitos em Corrente Contínua	63
Apresentação.....	64
Introdução	64
Objetivos de aprendizagem	64
Âmbito de conteúdos	65
Lei de Ohm	66
Enunciado a lei de OHM	66
Exercícios	67
Divisão Potenciométrica	70
Divisor de Tensão.....	70
Potenciômetro como divisor de tensão.....	71
Exercícios	72
Leis de Kirchhoff	73
Primeira Lei de Kirchhoff ou Lei dos Nós	73
Segunda Lei de Kirchhoff ou Lei das Malhas.....	74
Exercícios	77
Teorema de Thévenin	78



Exercício.....	83
Teorema de Norton	84
Exercício.....	87
Teorema da Sobreposição.....	88
Exercício.....	89
Lei de Joule. Potência e Energia	90
Condensadores.....	92
Tipo de Condensadores	92
Capacidade de um condensador	93
Exercício.....	94
Código de cores	94
Código de letras.....	94
Análise de circuitos com condensadores.....	95
Circuito série.....	95
Exercícios	97
Constante de tempo num circuito RC.....	97
Condensadores em corrente contínua	98
Bibliografia	100
Magnetismo e Eletromagnetismo	103
Apresentação.....	104
Introdução	104
Objetivos de aprendizagem	104
Âmbito de conteúdos	105
Efeitos magnéticos da corrente elétrica	106
Produção de Campo Magnético por Corrente Elétrica	110
Atividade prática	117
Bibliografia	118
Corrente Alternada Monofásica.....	121
Apresentação.....	122
Introdução	122
Objetivos de aprendizagem	122

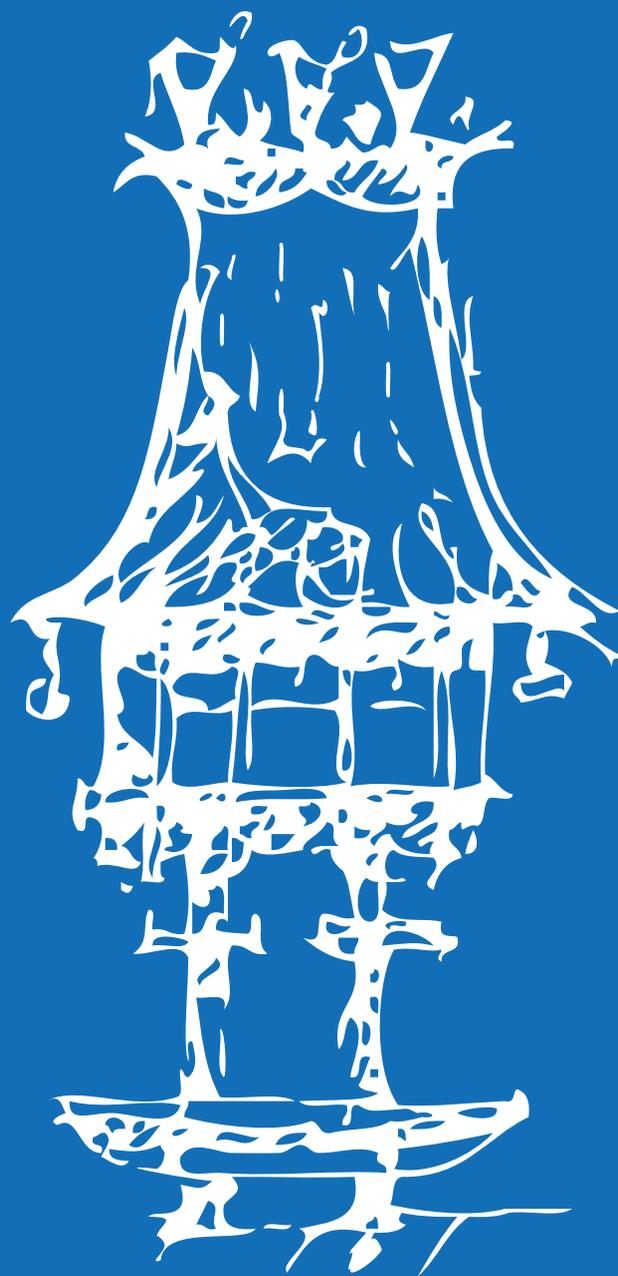


Âmbito de conteúdos	123
Corrente Alternada.....	124
Corrente Alternada versus Corrente Contínua	124
Grandezas constantes.....	125
Grandezas Variáveis - Não periódicas.....	125
Grandezas Variáveis - Periódicas	125
Características da corrente alternada sinusoidal	127
Período	127
Frequência	127
Amplitude ou Valor máximo	127
Valor médio	128
Valor eficaz	129
Exercício.....	130
Representação gráfica de uma grandeza sinusoidal.....	131
Exercício	134
Noção de Impedância.....	135
Circuito puramente resistivo	136
Circuito puramente indutivo.....	137
Exercício.....	139
Circuito puramente capacitivo.....	139
Exercício.....	142
Circuitos RL.....	144
Exercício.....	145
Circuitos RC	146
Exercício.....	147
Circuitos RLC.....	148
Exercício.....	150
Potência em C.A.	151
Potência ativa, aparente e reativa	151
Fator de potência.....	152
Análise prática do fator de potência.....	153
Exercício.....	154



Introdução aos sistemas trifásicos	156
Comparação entre os sistemas trifásicos e os sistemas monofásicos	156
Produção - Alternador Trifásico	156
Sistema Equilibrado	158
Condutor Neutro	159
Tensões Simples e Compostas	159
Ligação de Recetores Trifásicos - Triângulo e Estrela	161
Cálculo de Potência dos Sistemas Trifásicos	163
Exercícios	164
Bibliografia	165







Corrente Contínua

Módulo 1

Apresentação

Este módulo tem carácter teórico-prático, por isso deverá decorrer, em parte, em ambiente laboratorial de modo que os alunos possam verificar e confirmar experimentalmente os fenómenos elétricos analisados no estudo teórico da corrente contínua.

Esta disciplina tem como intenção tornar o aluno apto a compreender a linguagem e as técnicas utilizadas, possibilitando assim um melhor aproveitamento na sequência dos estudos desta e das outras disciplinas técnicas e também na comunicação adequada com os profissionais da área.

Introdução

A abordagem deste módulo de corrente contínua leva-nos a um melhor entendimento dos vários tipos de aparelhos existentes no mercado, que incorporam alguns destes circuitos assim como a melhor escolha deste tipo de equipamentos para que se ajuste às crescentes evoluções disponíveis pelas diversas marcas.

Este módulo requer um conhecimento básico de matemática e física.

Objetivos de aprendizagem

- Identificar as principais grandezas de um circuito elétrico e respetiva simbologia.
- Enunciar e aplicar a lei de OHM.
- Identificar os vários métodos de medida usados em eletrotecnia.
- Utilizar corretamente os aparelhos de medida.
- Calcular erros de medida.
- Enunciar e aplicar a lei de Joule.
- Identificar as grandezas: energia e potência elétrica e suas respetivas unidades S.I. acrescentando exercícios práticos.
- Relacionar as grandezas características de um gerador em vazio e em carga.



Âmbito de conteúdos

- As grandezas mais importantes do circuito elétrico.
- A lei de OHM.
- A lei de JOULE.
- Os aparelhos e técnicas de medida.
- Associação de resistências.
- Energia e potência elétrica. Rendimento.
- Geradores e Recetores.



História da eletricidade

A história da eletricidade 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 Eletricidade 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 eletricidade estática.



Fig. 1: O âmbar é uma resina fóssil de uma espécie de pinheiro já desaparecido

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 os 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-a por «elétrica». Mais tarde publica a obra que o irá imortalizar - *De Magnete*.

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



Os marcos na história da descoberta e controle da eletricidade começam por volta de 1729 com a descoberta por Stephen Gray da condução da eletricidade, distinguindo entre condutores e isolantes elétricos, bem como da indução eletrostática.

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

Em Outubro de 1745, o holandês Ewald Georg von Kleist descobre que a eletricidade 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 elétricas e era constituído por dois corpos condutores separados por um isolante fino.



Fig. 2: A garrafa de Leiden

Em 1750, Benjamin Franklin descobre que os relâmpagos são o mesmo que descargas elétricas e propõe a ideia de para-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 eletricidade, 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 atração e repulsão entre dois corpos eletrizados (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 elétrica - watt [W].

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

Nesse mesmo ano Alessandro Volta prova que a eletricidade 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 contrações nesta. Ao agregar estes discos um por cima dos outros, Volta cria a primeira pilha elétrica, a primeira forma controlada de eletricidade contínua e estável. Em sua honra, foi dado o seu nome à unidade de medida de potencial elétrico - volt [V].



Fig. 3: Pilha de Volta

Em 1802, Humphry Davy faz experiências no campo da eletrólise 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 refração da luz é explicada por Augustin-Jean Fresnel que estabelece também a teoria da luz polarizada.

Em 1819, Hans Christian Oersted deteta e investiga a relação entre a eletricidade e o magnetismo (eletromagnetismo).



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

Também em 1820, Pierre Simon Laplace, que desenvolveu uma importante atividade 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 eletromagnéticas e descobre o conceito de indução elétrica, construindo o primeiro motor elétrico. No mesmo ano, Georg Simon Ohm, ao trabalhar no campo da corrente elétrica desenvolveu a primeira teoria matemática da condução elétrica 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 elétrica - ohm [Ω].

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

Em 1831, Michael Faraday descobre o fenômeno da indução eletromagnética 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 elétrica 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 elétrica.

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 eletromagnético 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 adotado 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 exato em calor.

Em 1852, Gabriel Stokes dá a primeira explicação sobre o fenômeno 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 elétricas, o galvanômetro. Havia também já apresentado um trabalho sobre termodinâmica, em que estabelecia o princípio 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 dinamoelétrica, 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 hidroelétrica. A primeira central hidroelétrica é instalada nas cataratas do Niagara em 1886.

A distribuição de eletricidade 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 elétricas, através de duas máquinas Gramme a funcionar, uma como geradora e a outra como motora. Neste mesmo ano, é publicado o *Tratado sobre Eletricidade 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 eletromagnéticas geradas por uma bobine de indução, demonstra que as ondas de rádio e luz são ambas ondas eletromagnéticas, 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 elétrica.



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

Na década subsequente, ensaiam-se os primeiros transportes de energia elétrica em corrente contínua. Máquinas elétricas 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 elétricos em Berlim em 1881 e construída a primeira rede de distribuição elétrica 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 alternada, 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 eletromagnética, conhecida por vetor 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 contrações 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 detetar ondas de rádio e ser utilizado como recetor 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 elétricas.

Em 1897, Joseph Jone Thompson descobre o eletrão, 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 atual definição de estrutura do átomo, até então considerada a mais pequena porção de matéria não divisível.



Constituição da matéria

Constituição do átomo

O modelo atômico proposto por Bohr no início do século, embora atualmente esta teoria não seja inteiramente considerada, é útil para a visualização da estrutura atômica.

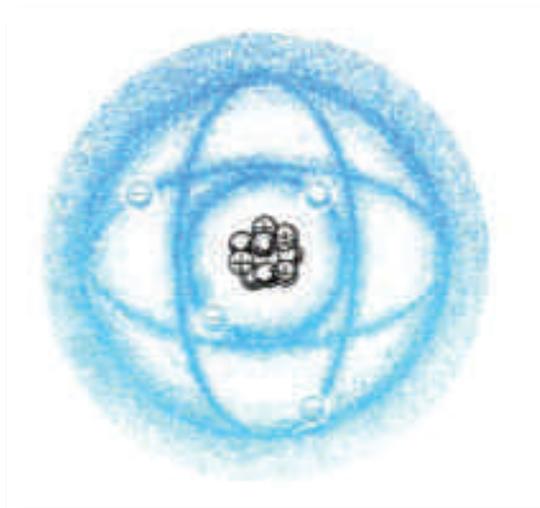


Fig. 4: O átomo e as suas partículas subatômicas

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

A massa do átomo encontra-se praticamente toda concentrada no núcleo, os eletrões 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
Elétrão	e	0,00055 \approx $\frac{1}{1840}$	-1	Distribuídos pelos diferentes níveis de energia

Fig. 5: 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 elétrica.

No estado normal o átomo é constituído por igual número de protões e eletrões e como a carga elétrica do protão é numericamente igual à do eletrão (embora uma seja positiva e a outra negativa), resulta que no conjunto o átomo não tem carga elétrica, isto é, é eletricamente 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 à soma das energias dos seus eletrões. Os eletrões, 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 à 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 eletrões que é dado pela fórmula:

$$2n^2$$

onde n é o nível de energia.

NÍVEL DE ENERGIA n	N.º MÁXIMO DE ELETRÕES $2n^2$
1	$2 \times 1^2 = 2$
2	$2 \times 2^2 = 8$
3	$2 \times 3^2 = 18$
4	$2 \times 4^2 = 32$

Fig. 6: Níveis de energia e n.º máximo de eletrões

Como dissemos atrás, os eletrões encontram-se em órbita 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 eletrões

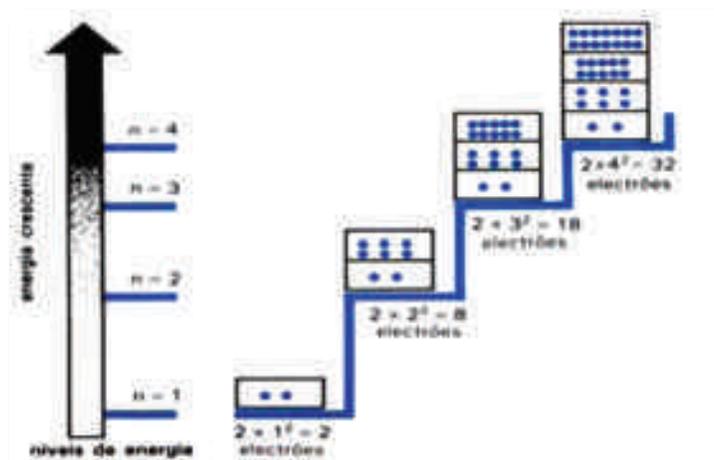


Fig. 7: Os níveis de energia e a distribuição dos eletrões

Estado fundamental e estado excitado de um átomo

À medida que nos afastamos do núcleo, os eletrões ficam menos atraídos por este. Os eletrões situados na camada mais externa são chamados de eletrões de valência. Quando se aplica a certos materiais energia externa como calor, luz ou energia elétrica, os eletrões 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 eletrónica (distribuição dos eletrões pelos níveis de energia) é o seguinte:

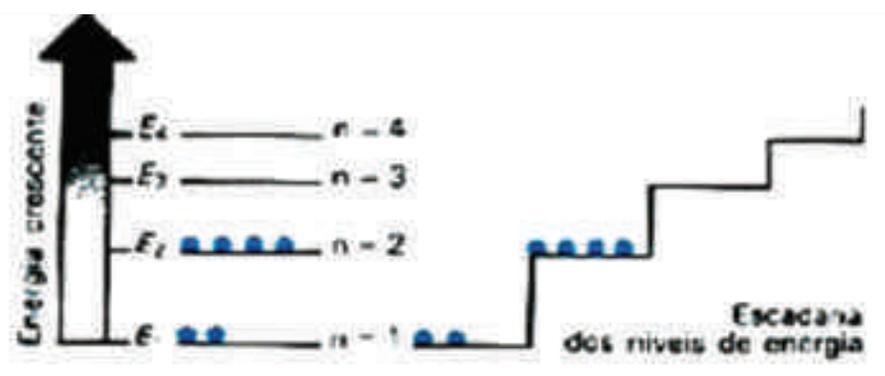


Fig. 8: Diagrama dos níveis de energia do átomo de carbono - estado fundamental



Nesta situação verificamos que o número de prótons é igual ao número de eletrões e, além disso, que os eletrões 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 eletrão do 2º nível possa transitar para um dos degraus superiores. Consoante a quantidade de energia recebida, assim ele conseguirá subir para o nível $n=3$, $n=4$,

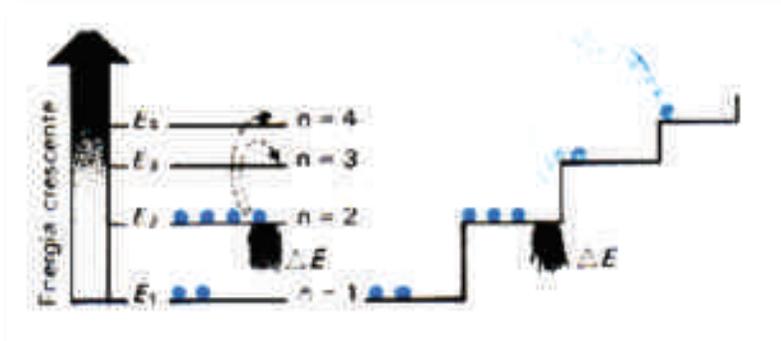


Fig. 9: Diagrama dos níveis de energia do átomo de carbono - estado excitado

Contudo, se a energia aplicada ao átomo for suficientemente grande, alguns dos eletrões de valência abandonarão o átomo. Estes eletrões são chamados de Eletrões Livres. É o movimento dos eletrões livres que produz a corrente elétrica num condutor metálico.

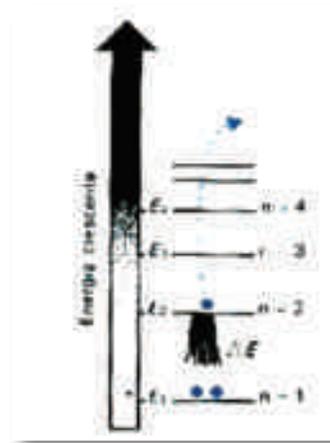


Fig. 10: Diagrama da transição do eletrão para fora do átomo - Eletrão Livre

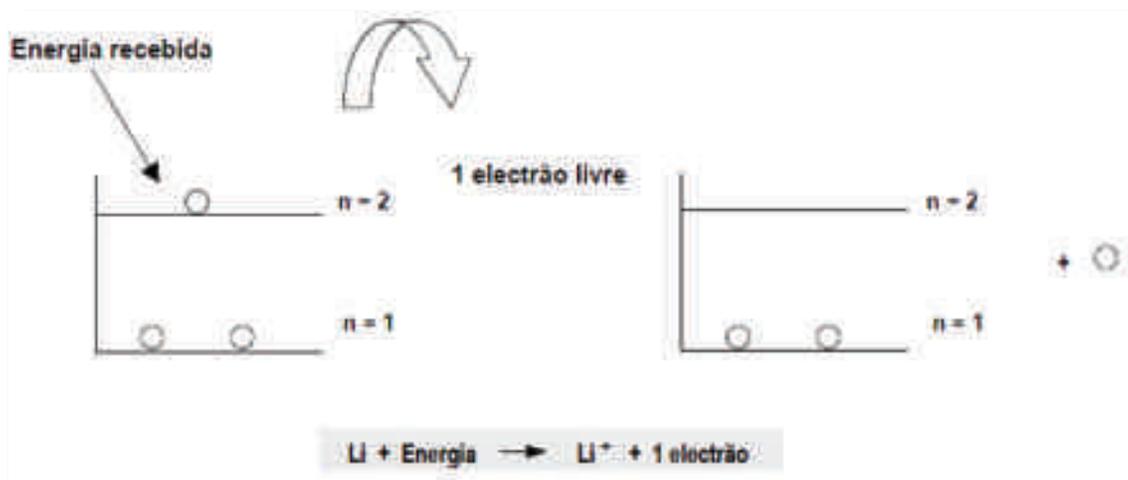
Os átomos ao perderem ou ganharem eletrões transformam-se em iões, ora positivos se perdem eletrões, ora negativos se ganham eletrões.

A este processo dá-se o nome de ionização.



Exemplificando:

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

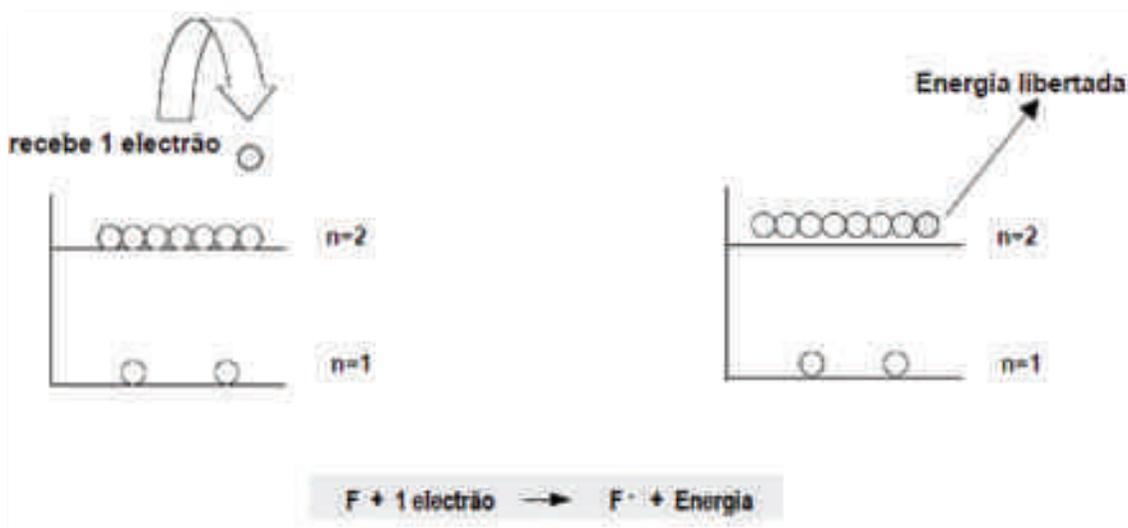


Se for aplicado uma energia suficiente o elétron do nível 2 «saltará» para fora do átomo transformando-se num elétron livre, o átomo transforma-se num ião positivo (Li^+), ficando assim mais estável.

O lítio é considerado um material condutor.

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

Vejamos o que se passa com o átomo de Flúor (F) com número atômico igual a 9.



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



Como não possui elétrons 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 elétrons livres. Esses elétrons livres podem existir em grande quantidade ou serem em número reduzido, dependendo do tipo de material que o constitui. Assim podemos definir dois tipos de corpos ou materiais:

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

Exercícios

1. O átomo de lítio tem um número atômico igual a 3. Descreva a sua configuração eletrônica e indique o número de prótons e o número de elétrons que constituem o átomo.
2. Defina convenientemente ionização.



Propriedades e características gerais dos materiais

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 elétricos são divididos em quatro grupos:

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

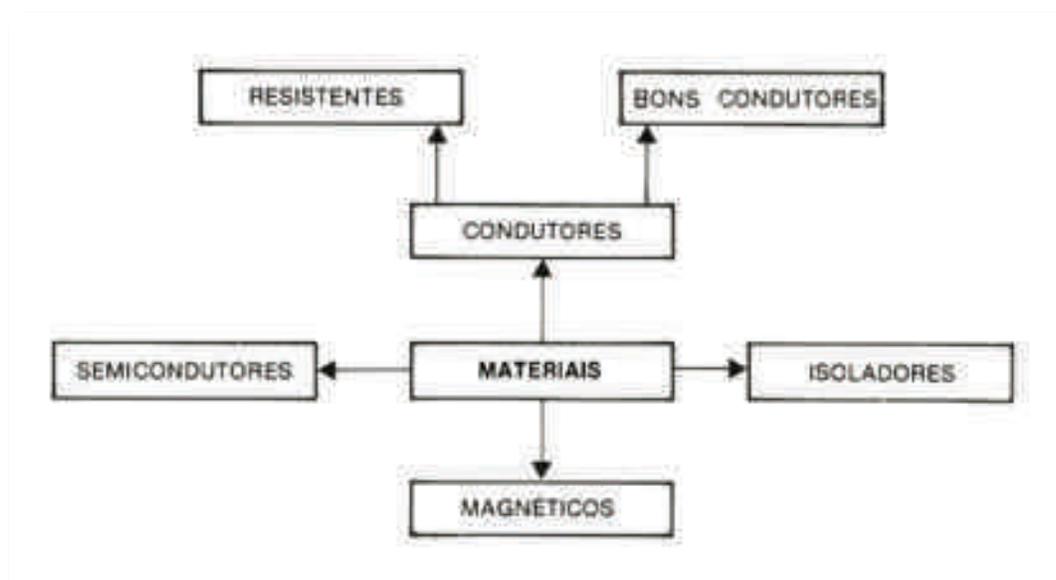


Fig. 11: Diagrama dos tipos de materiais elétricos

Os materiais utilizados em eletrotecnia 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 elétrica, 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 elétrica. 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 elétrica, 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.

Propriedades e grandezas gerais dos materiais

As propriedades e grandezas dos materiais dividem-se em elétricas, 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 a 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 ação que lhe provoca deformação. Exemplo: Mola.

4. Fusibilidade

Propriedade dos materiais a passar do estado sólido ao estado líquido por ação 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 a resistir à tensão de rutura, por torção ou compressão. A tensão de rotura 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 ação do calor.

8. Condutividade térmica

Propriedade que os materiais têm de conduzir com maior ou menor facilidade o calor. Normalmente, os bons condutores elétricos 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 em conduzir com maior ou menor facilidade as linhas de força do campo magnético. Exemplos: ferro-silício, aço, ferro-fundido.

11. Resistência à fadiga

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

12. Resistência à corrosão

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

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 elétricos.
- Ferro e aços - onde é importante o fenómeno da corrosão. Esta oxidação dá origem à destruição completa da estrutura respetiva.

Grandezas características dos materiais elétricos

1. Resistência

É a maior ou menor dificuldade que um corpo apresenta à passagem da corrente elétrica.

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 à passagem da corrente elétrica. 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 elétrica 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 dum 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.

Principais materiais condutores

Os principais materiais elétricos utilizados para o fabrico de condutores são o cobre, 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 cromoníquel - ligas resistentes.

A seguinte tabela 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	0,0029	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 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.

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



MATERIAIS RESISTENTES E LIGAS RESISTENTES	COMPOSIÇÃO	RESISTIVIDADE $\Omega \cdot \text{mm}^2 / \text{m}$ ($t = 20^\circ\text{C}$)	COEF. TEMPERATURA $^\circ\text{C}^{-1}$ ($t = 20^\circ\text{C}$)	DENSIDADE ($t = 20^\circ\text{C}$)	TEMP FUSÃO ($^\circ\text{C}$)	APLICAÇÕES
Malhehort	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 + cromo	1,02	0,0009	8,05	1500	Resistências de aquecimento
Níquel - cromo	níquel + cromo	1,04	0,00004	8	1475	Resistências de aquecimento
Grafite	carvão	0,5 a 4	-0,0004	2,25		Resistências para electrónica

Tabela 2 - Materiais resistentes e ligas resistentes

Após a análise da tabela, podemos concluir o seguinte:

Todas as ligas resistentes têm resistividades elevadas.

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, 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, fator 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 azébre, que o protege contra a ação dos agentes atmosféricos.



Relativamente aos materiais resistentes são de salientar as seguintes características:

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

Principais materiais isolantes

Os materiais isolantes existem nos circuitos elétricos 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 fatores principais que contribuem para este envelhecimento são:

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

As principais propriedades dos materiais isolantes são indicadas a seguir:

- Resistividade elétrica
- Rigidez dielétrica
- Estabilidade térmica
- Temperatura máxima de utilização
- Fator de perdas
- Versatilidade



Para cada aplicação, será escolhido o material que melhores condições reúna, de acordo com as exigências da função. Na tabela a seguir 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 elétrica.
- 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 ser mais flexíveis no seu tratamento e na sua utilização.
- Os isolantes gasosos, como o ar, são baratos.

MATERIAL	RESISTIVIDADE MΩ.cm (a 20°C)	RIGIDEZ DELECTRICA 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 lâmina do colector das máquinas eléctricas.
	Porcelana	$\approx 10^7$	35	-	Estável ao longo do tempo, porosa, recoberta de esmalte torna-se impermeável.	Base para terminais, isoladores para linhas.
	Vidro	$> 10^9$	10-40	200-250	Grande resistência mecânica.	Tubos para lâmpadas fluorescentes e incandescentes.
	Quartzo	$\approx 10^{10}$	20-30	-	Suporta temperaturas elevadas.	Lâmpadas de vapor de mercúrio.
	Óleos	$10^7 - 10^8$	10-25	60-200	Devem ser semest 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.
ORGANICOS	Outros	Fibrocimento, mármore.				
	Borracha natural	10^9	20-30	-	Elastica, resistente, muito sensível a agentes exteriores.	Isolador de condutores, luvas, tapetes isoladores.
	Algodão	10^7	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 subterráneos.
Outros	Ebonite, verniz, cartão, madeira.					

Tabela 3 - Materiais resistentes e ligas resistentes



PLÁSTICOS	Poliétileno	10^{16}	40	60-80	Resistente à acção solar e dos ácidos. Grande resistividade.	Suporte de enrolamentos, caixas para TV e rádio, isolamento de condutores.
	Policlorato de vinilo	$10^{14}-10^{15}$	30-50	170-105	Não é inflamável. Resistente às acções químicas.	Isolamento de condutores, fabrico de tubos.
	Poliestireno	10^{15}	55	80-90	Resina sintética facilmente moldável.	Fabrico de placas e caixas com alto poder isolante.
	Resina epóxi (araldite)	$10^{15}-10^{16}$	20-40	80-120	Pode ser facilmente moldada, produzindo diversos aparelhos e peças.	Pára - raios , caixa para cabos.
	Resina fenólica (bakelite)	$\sim 10^{12}$	10-20	120	Inalterável aos agentes exteriores. Grande resistividade.	Fabricação de peças para aparelhagem eléctrica.
GÁSOSOS	Air	10^{12}	1	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 4 - Materiais resistentes e ligas resistentes

Exercício

1. Como podem ser classificados os materiais utilizados na indústria eléctrica.
2. Defina maleabilidade e ductilidade.
3. Explique o significado da seguinte afirmação: «O Coeficiente de temperatura do alumínio é $0.004 \text{ } ^\circ \text{C}^{-1}$ ».



Modos de eletrização

Um material torna-se eletrizado quando um número elevado de átomos desse material perde ou ganha eletrões. Conforme veremos adiante, existem diversos meios de efetuar tal processo.

Eletrização por fricção

Friccionando uma vareta de vidro com um pano de lã ou de seda, e aproximando-a depois de pequenos pedaços de papel, verificamos que estes são atraídos para a vareta. A vareta depois de friccionada ficou eletrizada positivamente e o pano de seda ficou eletrizado negativamente.

Verifica-se que os eletrões à superfície da vareta de vidro são facilmente desalojadas pelo atrito e pela fricção.

É um fenómeno deste género que provoca o aparecimento da eletricidade estática num automóvel.

Por vezes, com tempo seco, ao sairmos do automóvel apanhamos um pequeno choque. Isto não é mais do que uma descarga elétrica provocada pela acumulação da carga eletrostática na carroçaria, ou nos ocupantes da viatura.

A eletricidade estática surge no automóvel devido ao atrito ou à fricção do ar na carroçaria, à fricção da embraiagem, dos travões e do próprio condutor com os estofos. Note-se que não é possível eletrizar metais, se não houver o cuidado de os segurar por intermédio de um corpo isolador.

Na realidade, e pelo que foi dito, a eletrização desses corpos também se produz quando agarrados pela mão, mas a eletricidade desenvolvida reparte-se imediatamente por toda a superfície do corpo humano, escoando-se para a terra.

A carroçaria metálica do automóvel, devido à fricção do ar, fica eletrizada uma vez que não se estabelece o contacto com a terra carregado negativamente. Isto deve-se à existência dos pneus que constituem um isolador.



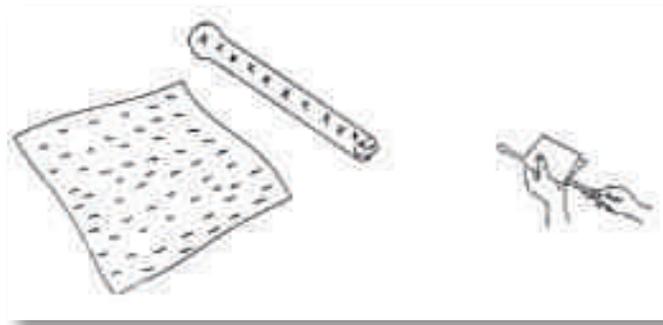


Fig. 12: Eletrização dum vareta de vidro com um pano de seda criando eletricidade estática

Eletrização por contacto

Se pusermos um corpo eletrizado negativamente em contacto com outro de carga neutra, a sua carga negativa será transferida para o outro, eletrizando-o também negativamente. Se o corpo eletrizado tiver uma carga positiva, o corpo neutro ficará com uma carga também positiva.



Fig. 13: Eletrização do eletroscópio por contacto

A este fenómeno dá-se o nome de eletrização por contacto.

Eletrização por indução

Se aproximarmos um corpo eletrizado negativamente, sem tocar, a um corpo neutro que esteja ligado através de um condutor (por exemplo, o nosso dedo) à terra, os eletrões deste último escapar-se-ão para a terra, sendo portanto estabelecido o contacto elétrico com a terra.

Ao tirar o dedo, dado que os eletrões não poderão voltar à origem, o corpo ficará com uma carga positiva.



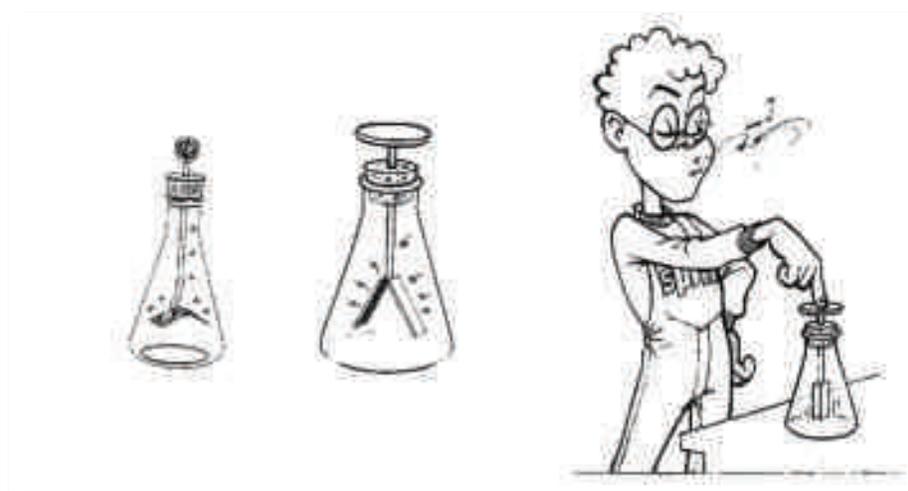


Fig. 14: Eletrização por indução

Cargas eletrostáticas podem ser desagradáveis (ou mesmo perigosas), mas também podem ser benéficas em algumas situações práticas.

Para quem repara certo tipo de equipamentos eletrônicos bastante sensíveis a cargas eletrostáticas, bem como para aqueles que o produzem, existe no mercado aparelhagem como pulseiras condutoras ou tapetes, para que o técnico reparador tenha sempre assegurada a ligação à terra.

Por outro lado, semicondutores mais complexos, como o caso de microprocessadores e alguns tipos de circuitos integrados, são postos à venda de uma forma bastante cuidada, como por exemplo, embrulhados em papel de alumínio, pelo motivo anteriormente descrito.

Qualquer manuseamento direto com a parte ativa destes componentes pode ser fatal para o componente, porque a carga eletrostática pode neste caso ser responsável pela sua avaria irreversível.



Fontes e Formas de Energia

A Energia está em tudo que nos rodeia!



Nestas situações associa-se energia à saúde ou à atividade.



Diariamente, ouvimos ou lemos frases como:

A água é uma **energia** limpa.

O carvão é uma **energia** suja.

Estes cereais dão muita **energia**.

É necessário resolver o problema **energético**.

Em frases como estas, a palavra energia é utilizada como sinónimo de fonte de energia.

Fontes de energia

As fontes de energia podem classificar-se em:

- Fontes de energia primárias - quando ocorrem livremente na Natureza.
Ex.: Sol, água, vento, gás natural, petróleo bruto
- Fontes de energia secundárias - quando são obtidas a partir de outras.
Ex.: eletricidade, gasolina, petróleo.

As fontes de energia primárias podem ser:

- Fontes de energia renováveis são aquelas que se renovam continuamente na Natureza, sendo, por isso inesgotáveis.
- Fontes de energia não renováveis são aquelas cujas reservas se esgotam, pois o seu processo de formação é muito lento comparado com o ritmo de consumo que o ser humano faz delas.

Fontes de energia renováveis

O Sol

Esta energia pode ser utilizada para produzir:

- Calor através de coletores solares.
- Eletricidade através de painéis fotovoltaicos.



O vento

Esta energia pode ser utilizada para produzir eletricidade através de aerogeradores.

A Água

A energia da água pode ser aproveitada recorrendo aos modernos recursos da ciência e tecnologia.

Por isso, constroem-se barragens hidroelétricas para produzir eletricidade.

A biomassa

A biomassa consiste no aproveitamento da energia acumulada nos combustíveis tradicionais (lenha) e em algumas plantas com elevado teor energético (milho, cana-de-açúcar).

Os geiseres

O calor proveniente do interior da Terra pode ser aproveitado.

A água de uma jazida geotérmica pode ser recuperada sob a forma de calor e ser aproveitada para produzir eletricidade.

As marés

O aproveitamento desta energia pode ser feito através de centrais elétricas que funcionam por ação da água das marés.

É necessária uma diferença de 5 metros entre a maré alta e a maré baixa para que este aproveitamento se torne rentável.



Fontes de energia não renováveis



Gás natural



Carvão



Petróleo bruto

Estas fontes de energia não renováveis são combustíveis fósseis.

Parte da eletricidade que utilizamos provém destes combustíveis e é produzida em centrais térmicas.

O calor que se liberta durante a queima destes combustíveis pode ser utilizado para mover as turbinas das centrais e produzir eletricidade que chega às nossas casas através dos cabos de alta tensão.

Também se pode produzir energia elétrica nas centrais nucleares.

Nestas centrais a fonte de energia é normalmente o urânio.

Formas de energia

De acordo com os efeitos que a energia produz, ou conforme os fenómenos a que está associada, atribuímos-lhes diferentes qualificações:



Energia solar - é a energia que está associada à radiação solar.

Energia luminosa - é a energia que está associada à radiação solar, à luz de uma lâmpada ou de uma vela.

Energia hídrica - é a energia que está associada à água armazenada numa barragem.

Energia das ondas ou marés - é a energia que está associada às ondas do mar ou à subida e descida das marés.

Energia geotérmica - é a energia que está associada ao calor proveniente do interior da Terra.

Energia eólica - é a energia que está associada ao vento.

Energia sonora - é a energia que está associada às ondas sonoras.

Energia elétrica - é a energia que está associada à corrente elétrica.

Energia térmica - é a energia que está associada às variações de temperatura de um corpo.

Energia química - é a energia que está associada ao carvão, petróleo, alimentos, medicamentos.

Impactos ambientais

Energias renováveis

Energia solar:

- Energia limpa.
- Ao instalar uma central fotovoltaica altera-se a paisagem existente e o equilíbrio natural.



Energia eólica:

- Energia limpa.
- Os parques eólicos alteram a paisagem.
- Se for colocado em rotas migratória pode provocar a morte de muitas aves.

Energia hidráulica:

- Energia limpa.
- As centrais hidroelétricas (barragens) provocam inundações alterando o equilíbrio dos ecossistemas.

Energia da biomassa:

- Energia limpa.
- A produção de eletricidade através da combustão liberta gases nocivos e partículas para a atmosfera, contribuindo para o aquecimento global.

Energia da geotérmica:

- Energia limpa.
- A libertação de vapor a alta pressão provoca poluição sonora e a libertação de calor altera o ecossistema em redor.

Energias não renováveis**Energia nuclear:**

- Energia poluente.
- É altamente perigosa.
- Em caso de acidente liberta-se radioatividade que é prejudicial a qualquer organismo, permanecendo no meio durante muito tempo.

Energia dos combustíveis fósseis:

- Energia poluente.
- Alteram os habitats naturais onde se efetuam as extrações.
- A queima dos combustíveis liberta para a atmosfera gases poluentes.



- A exploração dos combustíveis fósseis conduz ao seu esgotamento uma vez que as reservas são cada vez menores.

Assim podemos dizer que:

- A energia manifesta-se à nossa volta e nas atividades que desenvolvemos de muitas formas: nada acontece sem energia. A energia faz parte do Universo que nos rodeia.
- As fontes de energia podem ser renováveis ou não renováveis conforme o tempo que leva a repor-se a energia que delas vai sendo utilizada.
- O século XX recorreu essencialmente a energias poluentes ou sujas, como o petróleo, gás natural ou carvão. O século XXI irá abrir as portas às energias limpas, que além de não serem poluentes são inesgotáveis.
- O Sol é a principal fonte de energia renovável e é a origem de toda a energia que consumimos na Terra.
- A energia manifesta-se de diferentes modos, sendo detetada pelos efeitos que produz.
- A energia, que é só uma, pode ser qualificada de acordo com os efeitos que produz, com os fenómenos a que está associada ou de acordo com a fonte de onde provém.



Princípio da Conservação da Energia

O princípio da conservação da energia foi proposto por Helmholtz em 1847, quando estudava o metabolismo muscular. Em 1865, Clausius propôs que a energia do Universo seria uma constante. Nesta mesma época, através de uma série famosa de experiências, Joule demonstrou a equivalência entre calor (Q) e trabalho (W). O calor é uma forma de energia e não uma substância, como propunha Lavoisier.

A primeira lei diz que a energia não pode ser criada nem destruída, mas apenas transformada de uma modalidade em outra (o princípio da conservação da energia). Mudanças nas propriedades físicas e químicas de um dado sistema são acompanhadas por variações de energia. O entendimento do princípio da conservação, contudo, conduz à conclusão de que a energia interna (E) de um dado sistema é função do estado termodinâmico.

Um sistema relativamente isolado do resto do universo, ao sofrer uma mudança de estado, indo, por exemplo, do estado 1 para o estado 2, é acompanhado de uma variação de energia (ΔE). Fazendo o sistema voltar ao seu estado inicial (do estado 2 para o estado 1) por um método completamente diferente, a variação total da energia interna (ΔE), ao se completar o ciclo, deve ser igual a zero. Se não fosse assim, haveria a criação ou o desaparecimento de energia, o que contraria o princípio da conservação de energia proposto.

Desse modo, desprende-se que a energia interna E depende apenas do estado inicial e final do sistema. Não depende do caminho percorrido pelo sistema. Também não importa se o estado inicial e final está em equilíbrio ou fora do equilíbrio. Raciocínio análogo se aplica a qualquer grandeza que se conserva: qualquer grandeza não varia enquanto o sistema varia, dependendo do processo a que ele é submetido. Essas grandezas invariantes são denominadas função de estado.

As funções de estado são as propriedades que não mudam durante as transformações por que passa o sistema. De um ponto de vista matemático, são funções de duas ou mais variáveis, possuem diferencial exato, podem ser integradas desde o estado inicial até o estado final e como toda quantidade que se conserva é independente do caminho. Considere, por exemplo, um sistema fechado, composto por um gás ideal contido num



cilindro dotado de um pistão fixo, em equilíbrio, no estado 1. Se este sistema sofrer uma solicitação externa (por exemplo, aquecimento por uma fonte de calor) ele evoluirá para um estado 2. Como o pistão está preso, o calor (Q) fornecido ao sistema fará com que o sistema aumente sua energia interna (de E1 para E2), pois não é possível o êmbolo se deslocar e realizar o trabalho (W).

Para qualquer sistema que sofre uma mudança de estado, como ocorre na equação abaixo, pode escrever-se,

$$(\Delta U = q - w)$$

Em que E é a energia interna, q é a quantidade total de calor (energia térmica) fornecida ao sistema, e w é a quantidade total de trabalho (produto da pressão do gás pelo seu volume) realizado pelo sistema durante a mudança de estado. No caso da equação acima, $w = 0$ e $\Delta U = q$.

A Primeira Lei afirma que a variação de energia interna, correspondente a uma mudança de estado entre um estado inicial e um estado final determinado, não depende do método usado para se conseguir a transformação. As quantidades q e w não são propriedades do sistema e dependem dos métodos empregues, ΔE , contudo, é uma função unicamente dos estados e é portanto independente do caminho entre eles.

Outro enunciado da primeira lei da termodinâmica, também famoso, é o seguinte: num sistema isolado, a energia permanece constante. Embora a energia assuma várias formas, a quantidade total de energia é constante e quando a energia desaparece numa forma, aparece simultaneamente noutras formas. Assim, pode dizer-se que não existe energia absoluta, mas somente energia relativa, pois só se podem medir variações de energia. Os tipos de energia mais comuns são: energia térmica ou calor, energia mecânica ou trabalho, energia elétrica, energia química, etc. Num sistema e no seu exterior, a soma das variações de energia é nula, isto é, a soma da variação de energia do sistema com a variação de energia do exterior é igual a zero.



Circuito elétrico. 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 polos do gerador através de um condutor elétrico, inserindo um interruptor e um pequeno motor, constatamos que se passa algo idêntico ao que se verifica no circuito hidráulico.

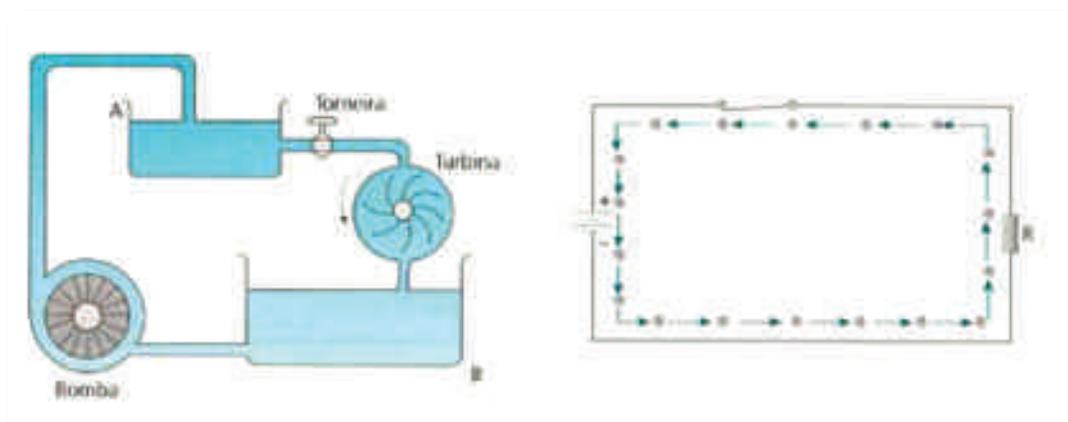


Fig. 15: Circuito hidráulico (à esquerda) e circuito elétrico (à direita)

Vejam a analogia com um circuito elétrico.

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 eletrões no seu interior do polo positivo para o polo negativo. O gerador, devido à diferença de potencial nos seus terminais, provoca um deslocamento dos eletrões do seu polo negativo para o polo positivo, através do motor. O sentido de deslocamento dos eletrões designa-se por sentido real da corrente. Contudo, está convencionado que no exterior dos geradores a corrente elétrica tem o sentido do polo positivo para o polo negativo, sentido convencional.

Designaremos por circuito elétrico o conjunto de componentes elétricos ligados de forma que possibilitem o estabelecimento de uma corrente elétrica através deles.



É evidente que um circuito elétrico 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 elétrica 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, 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. Uma representação deste problema pode ser uma ligação entre os bornos de uma pilha ou bateria com uma pinça por exemplo 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.



Geradores elétricos

Os geradores de corrente contínua mais usual são:

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

Força eletromotriz e resistência interna de um gerador

Vimos que a corrente elétrica é originada na d.d.p. (diferença de potencial) existente nos terminais do gerador. Enquanto existir essa d.d.p. manter-se-á a corrente elétrica, isto é, existe no polo negativo um excesso de eletrões e no polo positivo falta deles.

É então necessário que o gerador realize internamente trabalho e conseqüentemente gaste energia. Daqui a necessidade do gerador dispor de algum tipo de energia para transformar em energia elétrica.

Podemos dizer que a força eletromotriz (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 elétrica.

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

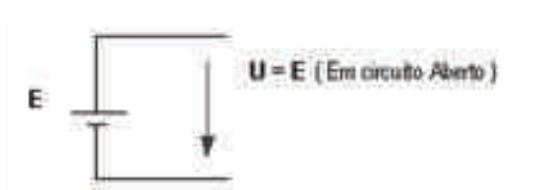


Fig. 16: Medição da força eletromotriz



O valor da f.e.m. de um gerador, em circuito fechado, não coincide exatamente com o valor da tensão lida no recetor. 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 eletrólito e no caso dos dínamos, depende da resistência dos enrolamentos da máquina. Analisemos a queda de tensão na resistência interna, consideremos o circuito seguinte:

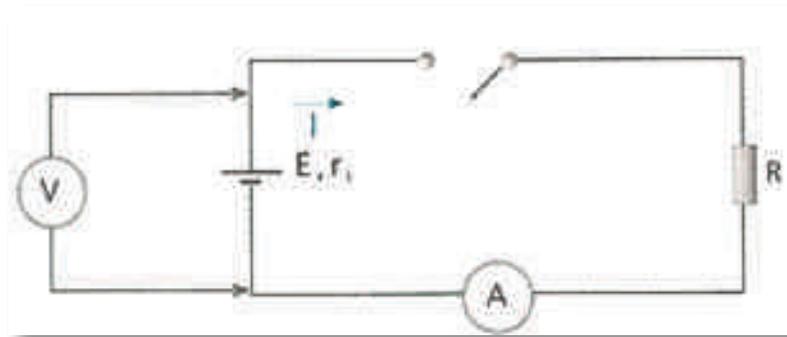


Fig. 17: Medição da força eletromotriz num circuito

Se no circuito o interruptor se encontrar fechado, haverá passagem de corrente no circuito e conseqüentemente 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 eletrões ao circular no circuito encontram duas oposições à sua passagem, a resistência R e a resistência interna r_i .



Esquemáticamente, podemos desenhar o gerador da seguinte forma:

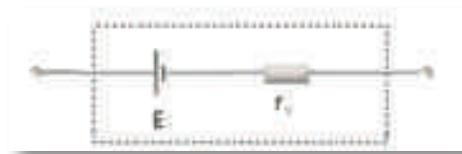


Fig. 18: Esquema equivalente de um gerador elétrico

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 gerador está em circuito aberto a f.e.m é igual à d.d.p. nos seus terminais.

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

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

Exercício

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



Resistência elétrica

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

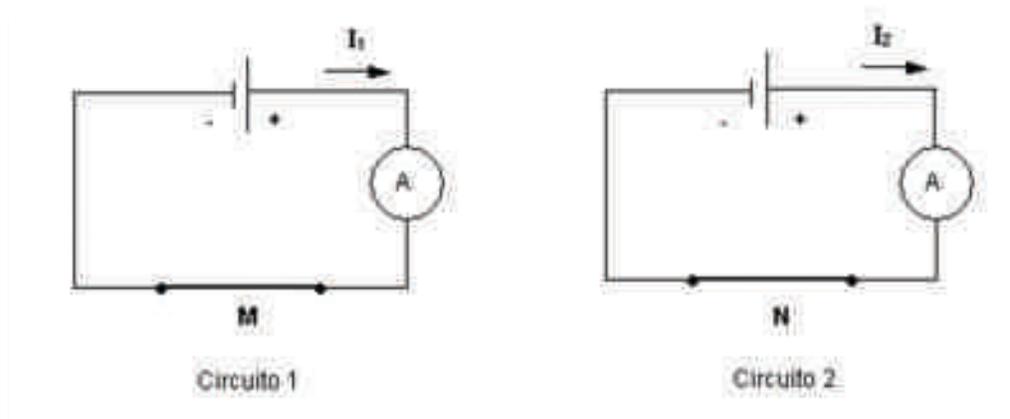


Fig. 19: Circuitos elétricos

Se os amperímetros registarem valores diferentes, então, a intensidade de corrente no circuito 1 (I_1) é diferente da intensidade de corrente no circuito 2 (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 elétricas.

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 à passagem da corrente elétrica definimos a grandeza Resistência elétrica.

A Resistência elétrica representa-se por R. Exprime-se em ohm (Ω).

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

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

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



em que:

R - Resistência elétrica - ohm (Ω)

U - Tensão ou diferença de potencial - volt (V)

I - Intensidade da corrente elétrica - ampere (A)

Múltiplo	Símbolo	Valor
KiloOhm	$K\Omega$	10^3
MegaOhm	$M\Omega$	10^6

Tabela 6 - Múltiplos da unidade

Fatores que afetam a resistência de um condutor. Resistividade.

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

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

Onde:

R - Resistência elétrica - (Ω)

ρ - Resistividade do material (lê-se ró) - ($\Omega \cdot m$)¹

L - Comprimento - (m)

S - Área de secção - (m^2)

¹ No sistema internacional (S.I.) a unidade da resistividade é $\Omega \cdot m$, onde a secção é expressa em m^2 .

Para secções expressas em mm^2 a resistividade assume a unidade $\Omega \cdot mm^2 / m$.

Como já referimos, um bom condutor possui uma resistividade da ordem dos $10^{-8} \Omega \cdot m$ ou $10^{-4} mm^2 / m$ e os materiais com resistividades superiores a $10^{10} \Omega \cdot m$ ou $10^{14} \Omega \cdot mm^2 / m$ são designados por isoladores.



Código de cores das resistências

As tabelas abaixo permitem a leitura de resistências que utilizam um código de cores para a identificação do seu valor.

Na maior parte das vezes o código de cores é impresso como listas sobre o corpo da resistência. A leitura das listas deve ser feita a partir da que começa mais perto de uma extremidade da resistência, ou seja, a lista mais perto da extremidade é a 1 a seguinte a 2 e assim sucessivamente.

As resistências comuns geralmente apresentam 3 ou 4 listas e as de precisão possuem 5 listas.

Resistências comuns:

1ª e 2ª lista=Valor

3ª Lista = Multiplicador

4ª Lista = Tolerância

Nas resistências com tolerância de 20% só há três listas.

Resistências de precisão:

1ª, 2ª e 3ª lista=Valor

4ª Lista = Multiplicador

5ª Lista = Tolerância



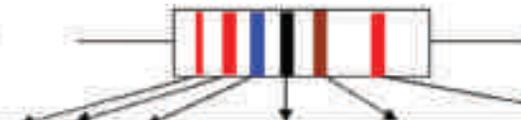
Cor	1º e 2º algarismo	Multiplicador	Tolerância
Preto	0	x1	
Castanho	1	x10	
Vermelha	2	x100	
Laranja	3	x1000	
Amarelo	4	x10 000	
Verde	5	x100 000	
Azul	6	x1 000 000	
Violeta	7	x10 000 000	
Cinzento	8	-----	
Branco	9	-----	
Dourado	-----	x0,1 (*)	± 5%
Prateado	-----	x0,01 (*)	± 10%
Sem cor	-----	-----	± 20%

Nota: O valor obtido vem expresso em Ohm (Ω) (*) 3º anel dourado — R · 10⁻¹; 3º anel prateado — R · 10⁻²



Código de cor das resistências de precisão (5 ou 6 Listas)

Deve iniciar-se a leitura pelo anel mais fino.



Cor	1º, 2º e 3º algarismo	Multiplicador	Tolerância	Coefficiente de temperatura ($\times 10^{-5}/^{\circ}\text{C}$)
Preto	0	$\times 1$		200
Castanho	1	$\times 10$	$\pm 1\%$	100
Vermelho	2	$\times 100$	$\pm 2\%$	50
Laranja	3	$\times 1000$		25
Amarelo	4	$\times 10\ 000$		15
Verde	5	$\times 100\ 000$	$\pm 0,5\%$	
Azul	6	$\times 1\ 000\ 000$	$\pm 0,25\%$	10
Violeta	7	$\times 10\ 000\ 000$	$\pm 0,1\%$	5
Cinzento	8	-----		1
Branco	9	-----		
Dourado	-----	$\times 0,1$		
Prateado	-----	$\times 0,01$		

Nota: O valor obtido vem expresso em Ohm (Ω)

Tabela 7 - Leitura do valor das resistências

Exercícios:

Castanho (1) + Preto (0) + Castanho (+1) = _____

Castanho (1) + Preto (0) + Vermelho (+2) = _____

Castanho (1) + Preto (0) + Laranja (+3) = _____

Vermelho (2) + Violeta (7) + Vermelho (+2) = _____

Vermelho (2) + Violeta (7) + Vermelho (+2) + Dourado (5%) = _____

Amarelo (4) + Violeta (7) + Amarelo (+4) + Prata (10%) = _____

Verde (5) + Azul (6) + Amarelo (+4) = _____

Verde (5) + Castanho (1) + Verde (+5) = _____

Laranja (3) + Laranja (3) + Verde (5) + Vermelho (+2) = _____

Laranja (3) + Laranja (3) + Verde (5) + Vermelho (+2) + Vermelho (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 1Ω , do material considerado, quando a temperatura aumenta 1°C .

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

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

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

Onde:

ρ_2 - Resistividade do material à temperatura T_2 (temperatura mais alta) - ($\Omega \cdot m$)

ρ_1 - Resistividade do material à temperatura T_1 (temperatura mais baixa) - ($\Omega \cdot m$)

α - Coeficiente de temperatura - ($^\circ\text{C}^{-1}$)

T_2 - Temperatura mais alta - ($^\circ\text{C}$)

T_1 - Temperatura mais baixa - ($^\circ\text{C}$)

R_2 - Resistência do material à temperatura T_2 (temperatura mais alta) - (Ω)

R_1 - Resistência do material à 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.



Condutância elétrica

A resistência é como vimos, a oposição que um material oferece à passagem da corrente elétrica. 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 elétrica representa-se por G . Exprime-se em Siemens (S).

O valor da condutância elétrica é dado pela expressão:

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

em que:

G - Condutância elétrica - (S)

R - Resistência elétrica - (Ω)

Exercícios

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 $\rho_{20^\circ\text{C}} = 0,056 \mu\Omega\cdot\text{m}$.

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.

Associação de resistências

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



As associações ou agrupamentos podem ser de três tipos:

- Série - tem apenas um terminal comum ou seja, um terminal de um deles está ligado a um só terminal do outro.
- Paralelo - tem 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 elétrons logo, estes terão de percorrer todos os componentes constituintes deste.

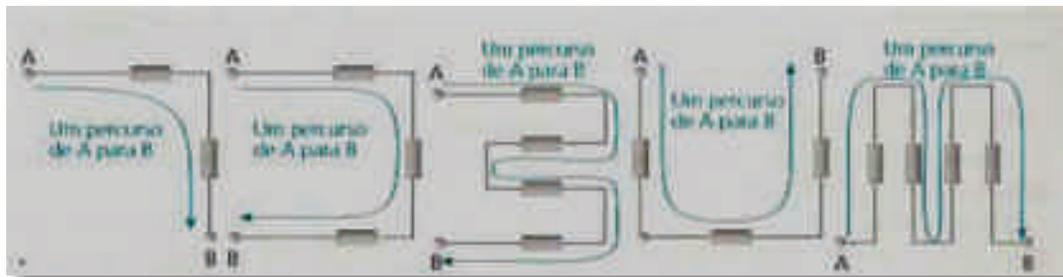


Fig. 21: Resistências associadas em série

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 do 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 elétrões, a maior quantidade destes percorrerá o caminho com menos oposição.



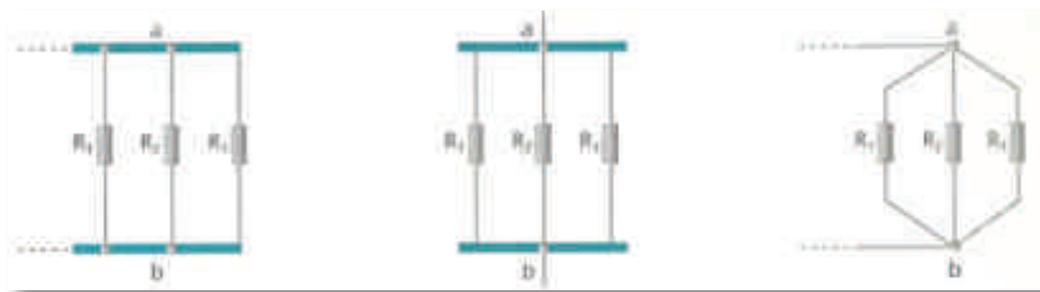


Fig. 22: Resistências associadas em paralelo

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 do 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.

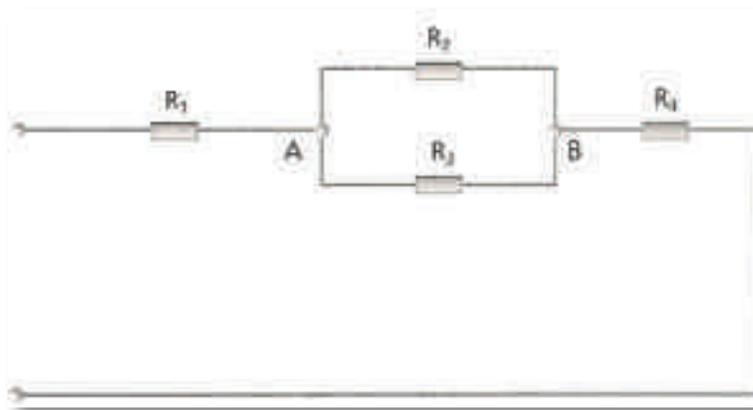
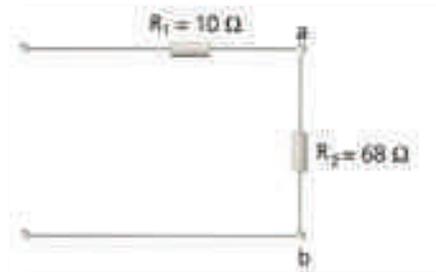


Fig. 23: Associação mista de resistências

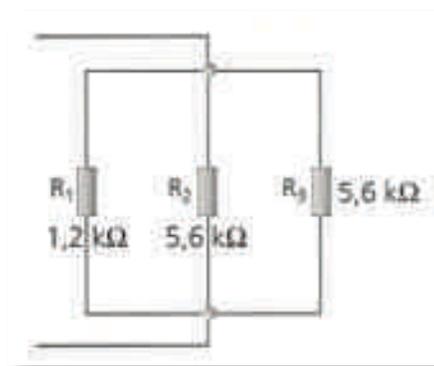


Exercícios:

3. Determine a resistência equivalente do circuito da figura seguinte.



4. Calcule a resistência total do circuito da figura que se segue.



Bibliografia

ANGULO, J. M., *Enciclopédia de Electrónica Moderna, Vol. 1*. Madrid. Editorial Paraninfo. (s.d.).

MATIAS, José, *Electricidade, Vol. 1*. Didáctica Editora. (s.d.).

MATIAS, José, *Práticas Laboratoriais de Electrotecnia e Electrónica, 10.º Ano. Curso Tecnológico de Electrotecnia e Electrónica*. Didáctica Editora. (s.d.).

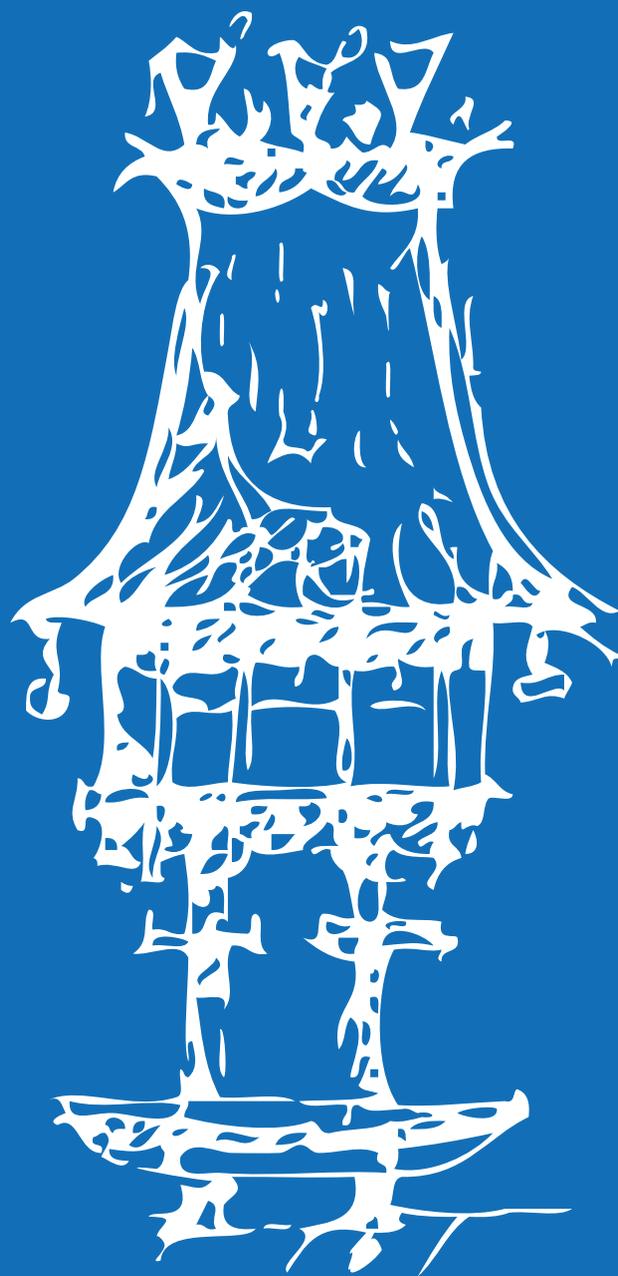
MATIAS, José, *Sistemas Analógicos e Digitais, 10.º Ano, Vol. 1. Curso Tecnológico de Electrotecnia e Electrónica*. Didáctica Editora. (s.d.).

PEREIRA, A. Silva e outros. *Electricidade, 10.º Ano. Curso Tecnológico de Electrotecnia e Electrónica*. Porto Editora. (s.d.).

PEREIRA, A. Silva e outros. *Práticas Laboratoriais de Electrotecnia e Electrónica, 10.º Ano. Curso Tecnológico de Electrotecnia e Electrónica*. Porto Editora. (s.d.).

PEREIRA, A. Silva e outros, *Sistemas Analógicos e Digitais, 10.º Ano. Curso Tecnológico de Electrotecnia e Electrónica*. Porto Editora. (s.d.).







Análise de Circuitos em Corrente Contínua

Módulo 2

Apresentação

Este módulo tem carácter teórico-prático, por isso deverá decorrer, em parte, em ambiente laboratorial para que o aluno possa analisar e comprovar o funcionamento do circuito elétrico alimentado por corrente contínua, constituído por componentes passivos.

Esta disciplina tem como intenção tornar o aluno apto a compreender a linguagem e as técnicas utilizadas, possibilitando assim um melhor aproveitamento na sequência dos estudos desta e das outras disciplinas técnicas e também na comunicação adequada com os profissionais da área.

Introdução

A abordagem deste módulo de corrente contínua leva-nos a um melhor entendimento dos vários tipos de aparelhos existentes no mercado, que incorporam alguns destes circuitos assim como a melhor escolha deste tipo de equipamentos para que se ajuste às crescentes evoluções disponíveis pelas diversas marcas.

Este módulo requer um conhecimento básico de matemática, física e eletrónica básica.

Objetivos de aprendizagem

- Distinguir ligações em série de ligações em paralelo.
- Analisar um circuito recorrendo à lei de Ohm generalizada, fazendo os cálculos necessários para determinar as grandezas elétricas essenciais.
- Determinar tensões e correntes num circuito recorrendo às leis de Kirchhoff.
- Montar pequenos circuitos usando placas de ensaio ou Kits didáticos adequados.
- Dimensionar pequenos circuitos, atendendo às principais características tecnológicas dos componentes a usar.
- Analisar as medidas efetuadas num circuito, no sentido de detetar algum tipo de anomalia.
- Fazer uma estimativa dos valores a medir usando os conhecimentos teóricos adquiridos.



- Enunciar e aplicar os teoremas de Thevenin e de sobreposição.
- Identificar a constituição de um condensador.
- Caracterizar as associações de condensadores.

Âmbito de conteúdos

- Lei de Ohm generalizada.
- Lei de Kirchhoff que servem para análise de circuitos com resistência.
- Métodos de simplificação de circuitos.
- Divisor de tensão e divisor de corrente.
- Teorema de Thevenin e teorema da sobreposição.
- O condensador em Corrente Contínua.



Lei de Ohm

A lei de OHM é uma fórmula matemática que estabelece a relação entre as três grandezas fundamentais da eletricidade: a corrente, a resistência e a tensão (tensão: também conhecida como diferença de potencial). Foi descoberta pelo alemão George S. Ohm.

As grandezas elétricas são representadas por símbolos (letras), representadas na tabela a seguir.

Grandeza	Símbolo	Unidade
Tensão	U ou V	Volt (V)
Corrente	I	Ampere (A)
Resistência	R	Ohm (Ω)
Potência	P	Watts (W)

Tabela 1 - Relação entre grandezas, Símbolos e Unidades

As informações desta tabela são de extrema importância e o interessado em aprender os segredos da eletrônica deve saber utiliza-las corretamente.

Enunciado a lei de OHM:

Tensão:

A diferença de potencial entre os terminais de um circuito é igual ao produto da resistência desse circuito pela intensidade da corrente elétrica que passa pelo circuito.

Exemplo prático: Num circuito elétrico, uma corrente de 2 amperes ao passar por uma resistência de 10 ohm, provoca uma diferença de potencial de 20 volts sobre esta resistência.

Veja como fica a representação da lei de OHM através de uma fórmula matemática:

$$V = R \times I$$

Corrente:

A intensidade da corrente elétrica que percorre o circuito é igual à divisão da diferença de potencial entre os terminais desse circuito pela resistência que esse circuito apresenta à passagem da corrente elétrica.



Exemplo prático: Num circuito, quando aplicamos uma diferença de potencial (tensão) de 20 volts sobre os terminais de uma resistência de 10 ohm, gera-se uma corrente elétrica de 2 amperes.

Veja como fica a representação da lei de OHM através de uma fórmula matemática:

$$I = V / R$$

Resistência:

A resistência que um circuito apresenta à passagem da corrente elétrica é igual à divisão da diferença de potencial (tensão) entre os terminais desse circuito pela intensidade da corrente que por ele passa.

Exemplo prático: Num circuito em que aplicamos uma diferença de potencial de 20 volt e medimos uma corrente elétrica de 2 ampere, obtemos uma resistência à passagem da corrente de 10 ohm.

Veja como fica a representação da lei de OHM através de uma fórmula matemática:

$$R = V / I$$

Exercícios:

1. Uma resistência de 100 Ω é atravessada pela intensidade de corrente de 2,2 A. Qual o valor da tensão nas extremidades da resistência?
2. Uma lâmpada tem 30 Ω de resistência e uma d.d.p., entre os seus terminais de 1,5 V. Qual o valor da intensidade de corrente que a percorre?

Potência:

Existe ainda uma grandeza que é muito utilizada na eletrônica, não faz parte da lei de OHM mas está ligada diretamente a ela. É a potência elétrica.

Saber qual a potência elétrica na dissipação de calor dos componentes eletrônicos e seus circuitos é de extrema importância para o bom funcionamento dos mesmos.

A potência elétrica produzida é medida em WATTS, sua unidade é o W e seu símbolo de grandeza é o P.

Exemplo prático: Num circuito, onde aplicamos uma diferença de potencial de 20 volts e obtemos uma corrente elétrica de 2 amperes, produzimos uma potência elétrica de



40 Watts. Teoricamente o nosso circuito formado pela resistência de 10 ohm teria que suportar uma potência de 40 W.

Veja como fica a representação através de uma fórmula matemática:

$$P = V \cdot I \text{ ou } P = R \cdot I^2$$

A potência elétrica é igual ao produto da tensão pela intensidade de corrente que percorre a resistência.

Montagem prática:

O circuito é funcional quando temos as três grandezas da eletricidade presentes, a tensão produzida por uma fonte de energia, a resistência elétrica produzida pelo circuito e a corrente elétrica que percorre o circuito realizando o seu funcionamento.

Veja como seria o nosso circuito exemplo:

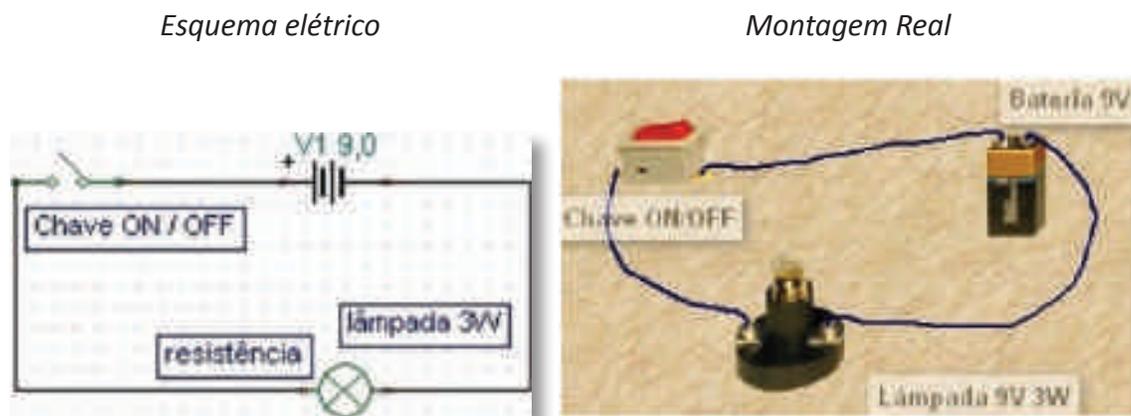


Fig. 1: Exemplo de uma montagem Teórica e Prática

Com o circuito proposto acima podemos calcular todas as grandezas da eletricidade, lembramos que devemos conhecer os valores de no mínimo duas das grandezas.

Dados conhecidos, fornecidos pelo fabricante dos componentes:

Bateria: Tensão 9V

Lâmpada: Tensão 9V, potência 3W

Com estas informações e utilizando as fórmulas da lei de OHM, encontraremos todos os dados restantes como: a corrente elétrica do circuito e a resistência da lâmpada no circuito.



Cálculo da corrente elétrica:

Fórmula: $I = P / V$

$$I = 3 / 9 \Rightarrow I = 0,333 \text{ A}$$

O resultado será de aproximadamente 333 mA (miliampères), esse será o valor de corrente elétrica que percorre o nosso circuito.

«Se a nossa intenção era de acrescentar um fusível protetor ao circuito, descobrimos que o fusível não poderia ter uma capacidade inferior a 333 mA pois queimaria.»

Cálculo da resistência da lâmpada:

Fórmula: $R = V / I$

$$R = 9 / 0,333 \Rightarrow R = 27,02 \Omega$$

O resultado será de aproximadamente de 27 Ω .

Lembramos que os resultados são aproximados, pois não contamos com a tolerância dos valores dos componentes no ato da sua fabricação.

Os demais cálculos são realizados utilizando o mesmo processo, adequando a fórmula a cada caso.



Divisão Potenciométrica

Divisor de Tensão

Ao conjunto de n resistências associadas em série dá-se o nome de divisor de tensão.

Num circuito divisor de tensão, determina-se a queda de tensão numa ou noutra resistência, queda essa, que é uma fração da tensão total aplicada.

Supondo que a uma associação em série de duas resistências se aplica uma tensão V , a tensão existente entre os terminais de cada elemento é:

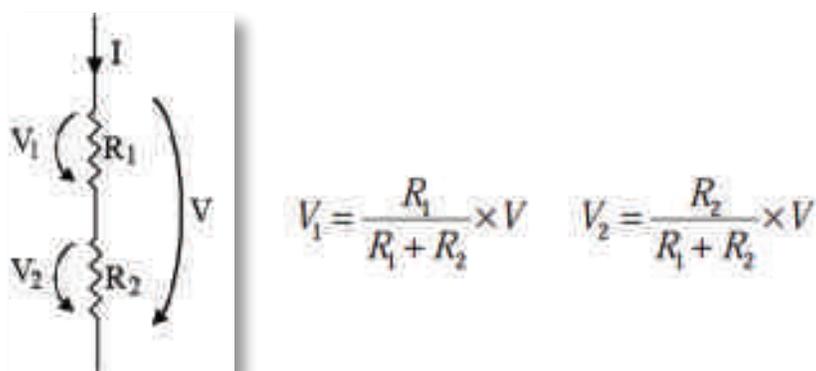


Fig. 2 - Serie de duas resistências

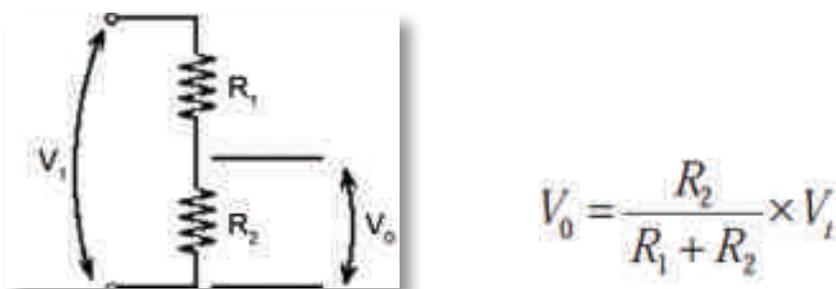


Fig. 3 - Divisor de tensão numa serie de duas resistências

Se a uma associação em série de n resistências se aplica uma tensão V , a tensão existente entre os terminais de cada elemento é:

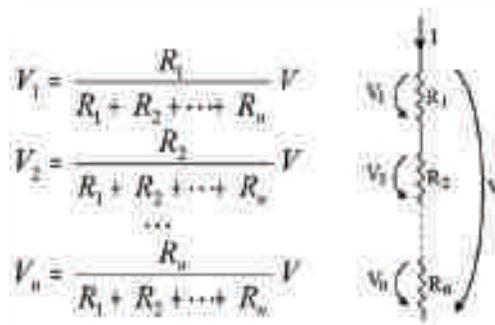


Fig. 4 - Série de n resistências



Se a uma associação em série de 3 resistências se aplica uma tensão V_i , a tensão existente entre os terminais de cada elemento é:

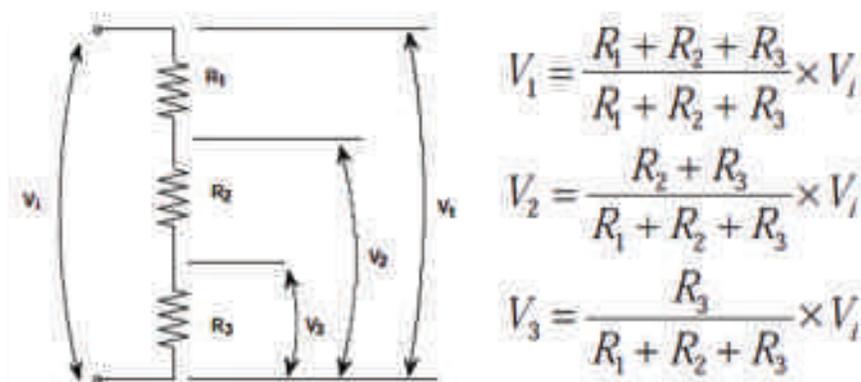


Fig. 5 - Série de 3 resistências

O divisor de tensão aplica-se somente quando se conhece a tensão aos terminais de uma associação em série de resistências.

Potenciômetro como divisor de tensão

O divisor de tensão, cuja resistência elétrica é variável / ajustável, é designado por potenciômetro.

A resistência do potenciômetro (geralmente, é uma resistência com três terminais onde a conexão central é deslizante e manipulável) é dividida, pelo contacto deslizante, em duas, R_{13} e R_{32} , ligadas em série.

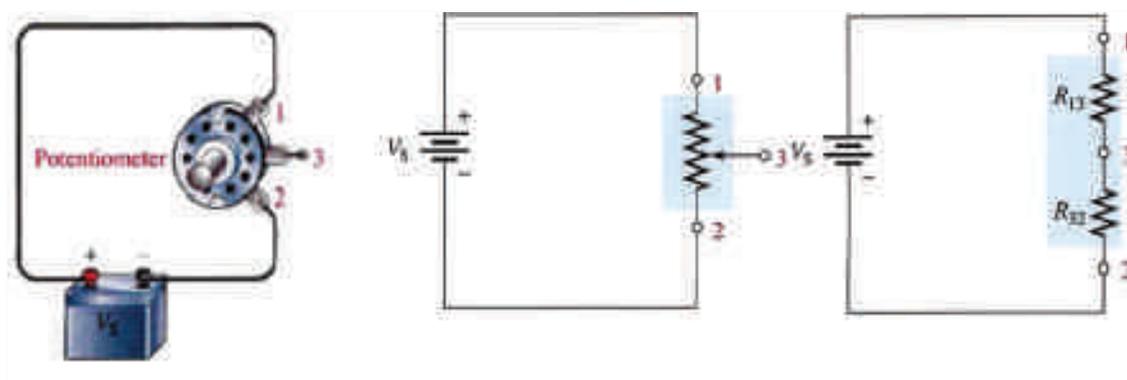
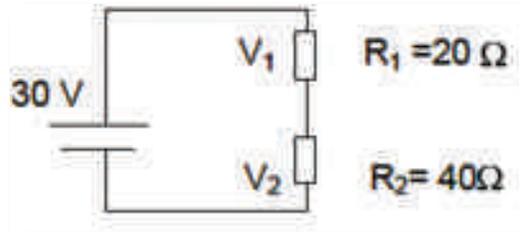


Fig.6: Resistências do Potenciômetro

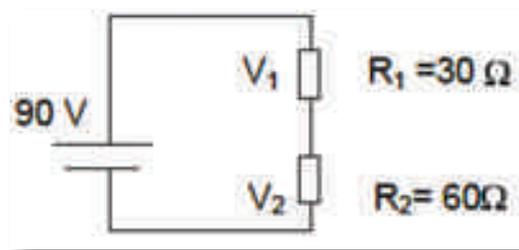


Exercícios:

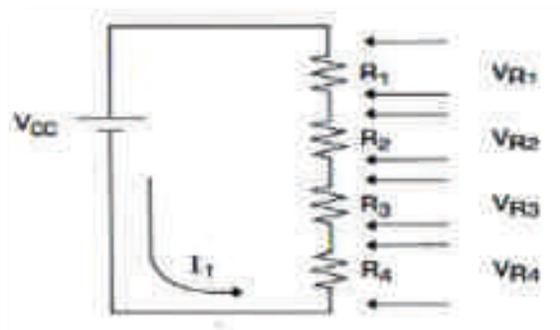
1. Calcular o valor da tensão V_1 e V_2 no circuito. Idem para $V=60$, $R_1= 30\Omega$, $R_2= 20\Omega$



2. Calcular o valor da tensão V_1 e V_2 no circuito.



3. Calcular o valor de V_{r_1} , V_{r_2} , V_{r_3} , V_{r_4} no circuito usando divisor de tensão com:
 $V_{CC}= 60V$, $R_1 = 5\Omega$, $R_2 = 10\Omega$, $R_3= 20\Omega$, $R_4= 15\Omega$



Leis de Kirchhoff

Até aqui aprendemos técnicas para resolver circuitos não muito complexos. Basicamente todos os métodos foram baseados na 1ª Lei de Ohm. Agora vamos aprender as Leis de Kirchhoff.

As Leis de Kirchhoff consistem num método de resolução de circuitos mais complexos, aqueles que arranjam resistências, geradores e recetores de forma não trivial.

São duas as leis de Kirchhoff. A primeira refere-se a conservação de carga, enquanto a segunda diz que independente do caminho que se faça ao percorrer um circuito, voltando ao mesmo ponto, o potencial vai ser o mesmo. Faremos então uma abordagem mais profunda.

Primeira Lei de Kirchhoff ou Lei dos Nós

Essa lei diz que a soma das correntes elétricas que chegam a um nó é igual à soma das correntes que saem desse nó. Chamamos nó de um circuito, a qualquer ponto do qual partam dois ou mais «fios». Uma ilustração desta lei segue na figura seguinte.

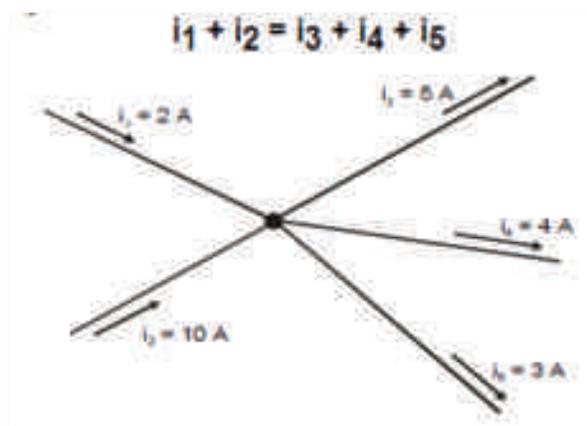


Fig.7: Lei dos nós

1ª Lei de Kirchhoff ou Lei dos Nós: Num nó, a soma das intensidades de correntes que chegam é igual à soma das intensidades de correntes que saem.



Segunda Lei de Kirchhoff ou Lei das Malhas

Antes de enunciarmos a Segunda lei de Kirchhoff, devemos aprender alguns nomes que cercam todo o assunto. Devemos saber o que é um ramo e o que é uma malha.

Um ramo é um segmento de um circuito compreendido entre dois nós, independente dos elementos do circuito que estão entre esses dois nós.

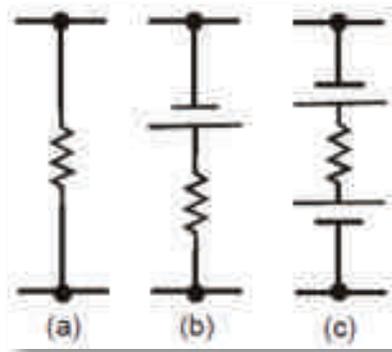


Fig.8: Exemplos de ramos

Uma malha é um conjunto de ramos de maneira a constituir um circuito fechado. Temos na figura seguinte um circuito com duas malhas, que são mostradas separadamente na figura 10. Observe que a resistência R_2 pertence às duas malhas (malha A e malha B).

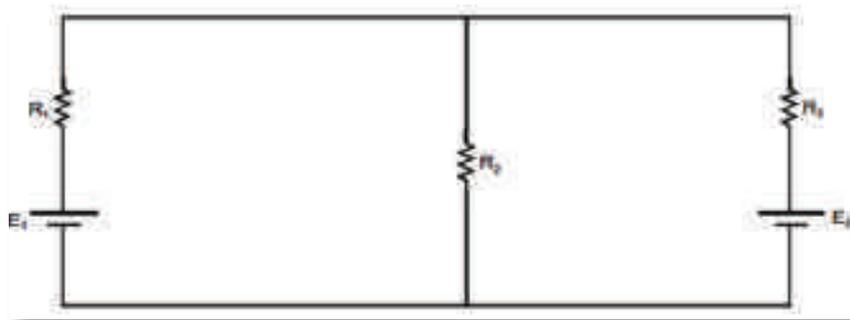


Fig.9: Circuito com 2 malhas

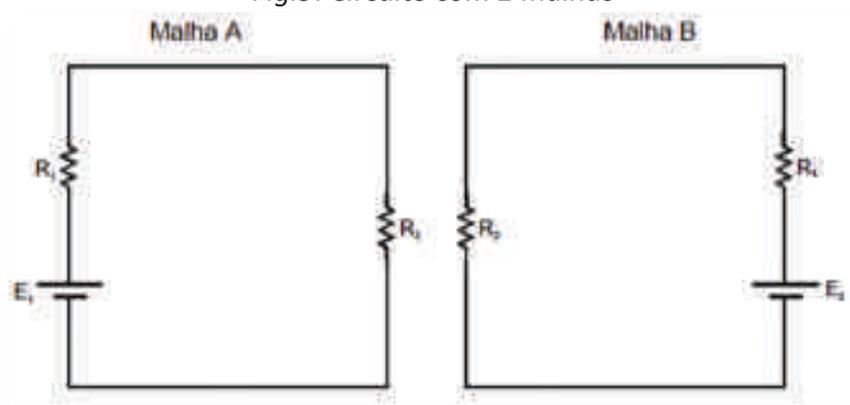


Fig.10: Malhas do circuito da figura 9



O primeiro passo para resolver um problema com mais do que uma malha é identificar quem é o gerador.

Não existindo necessariamente um único, sabemos com certeza que, de entre vários geradores e recetores, um gerador é aquele com maior força eletromotriz. Identificado o gerador, colocamos então o sentido da corrente (do + para o -), quando isso não for possível, podemos assumir um sentido qualquer.

Definido o sentido para percorrer a malha, monta-se uma equação para cada malha, essa equação vem da soma das tensões (ou d.d.p.) de cada elemento da malha, lembrando que a tensão na resistência é dada pela lei de Ohm, $U = R \times I$, e a do gerador e do recetor é dada diretamente pelo E , f.e.m.

Por exemplo:

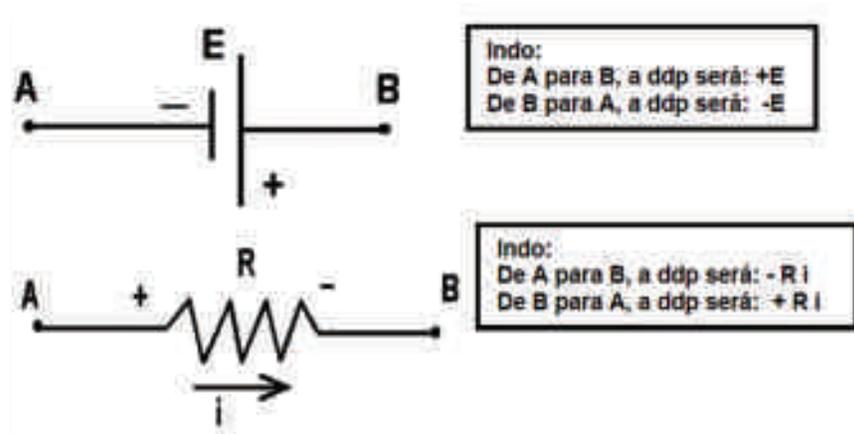


Fig.11: Como calcular a d.d.p. nos elementos dos circuitos

A segunda lei afirma que, ao percorrermos uma malha num determinado sentido, partindo e voltando ao mesmo ponto, a soma das tensões sobre cada elemento do circuito é nula. Como exemplo, analisemos o circuito da figura 11.

2ª Lei de Kirchhoff ou lei das Malhas: Percorrendo uma malha num determinado sentido, partindo e voltando ao mesmo ponto, a soma das tensões sobre cada elemento do circuito é nula.



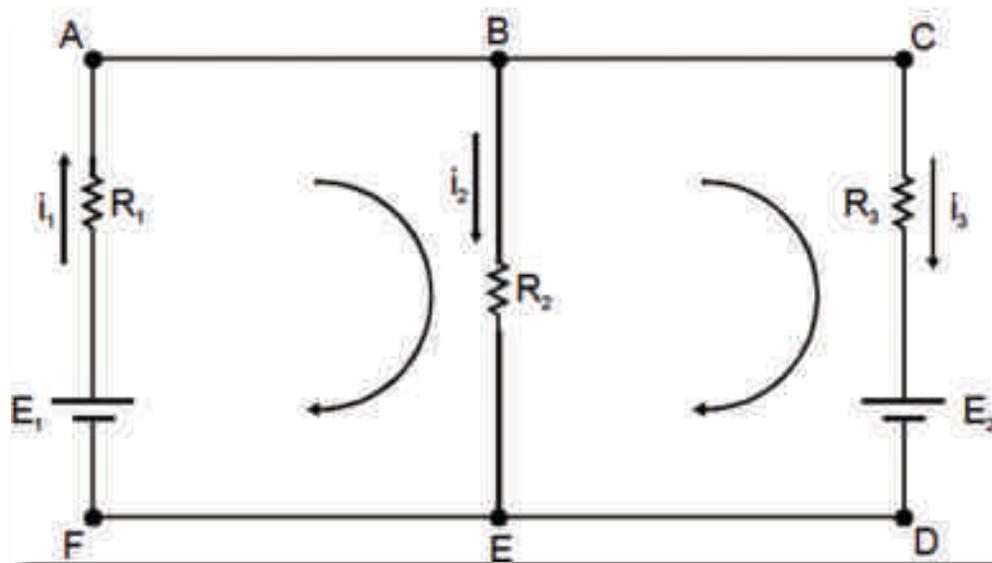


Fig.12: Sentidos da corrente e o sentido que será usado para aplicar a 2ª lei de Kirchoff

Aplicando a primeira lei de Kirchoff no nó B, temos:

$$i_1 = i_2 + i_3$$

Percorrendo a malha ABEF no sentido indicado, partindo do ponto A. Iremos somar os potenciais dando uma volta no circuito.

$$- R_2 i_2 + E_1 - R_1 i_1 = 0$$

Devemos observar que se fizéssemos a mesma soma só que considerando o sentido contrário o resultado seria o mesmo.

Percorrendo a malha BCDE no sentido indicado partindo do ponto B. Iremos somar os potenciais dando uma volta no circuito.

$$- R_3 i_3 - E_2 + R_2 i_2 = 0$$

Temos três equações e três variáveis. Com isso, temos a solução do problema.

Convenções:

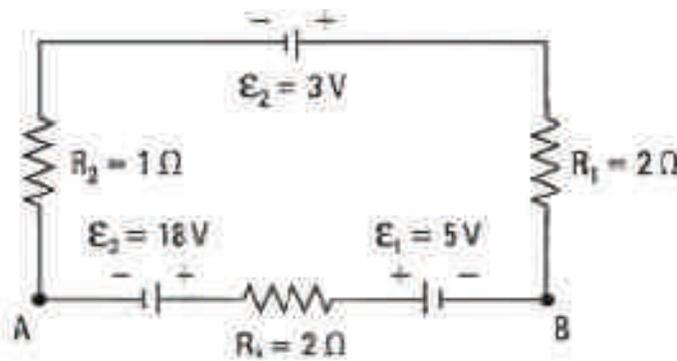
1. Quando atravessamos uma resistência no sentido da corrente, temos uma d.d.p. negativa, ou seja, acontece uma queda de potencial. Se atravessarmos a resistência no sentido contrário ao da corrente, temos um potencial positivo.
2. A d.d.p. nos terminais de um gerador ou recetor é dada dependendo da forma como a corrente passa pelo elemento. Se passa do polo positivo para o polo negativo temos uma d.d.p. negativa, caso contrário, a d.d.p. será positiva.



Por se tratar de um método para resolver circuitos complexos, o estudo das Leis de Kirchhoff é mais eficiente resolvendo os exercícios.

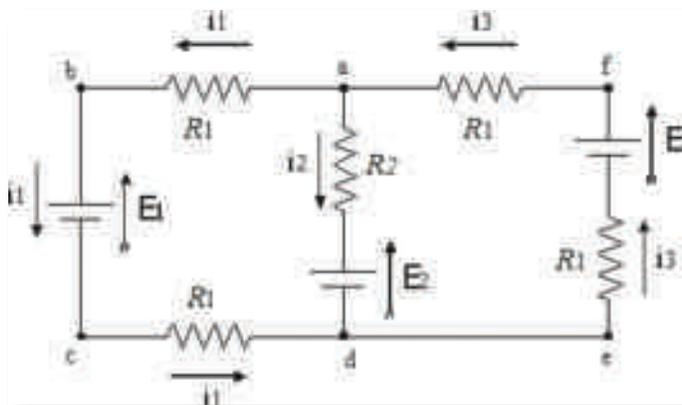
Exercícios

1. O circuito é constituído por três resistências, dois recetores e um gerador. Determine:



- O sentido da corrente elétrica;
- A resistência elétrica equivalente do circuito;
- A intensidade da corrente elétrica no circuito;
- A d.d.p. entre os pontos A e B.

2. A figura seguinte mostra um circuito cujos elementos têm os seguintes valores: $E_1=2,1$ V, $E_2=6,3$ V, $R_1=1,7\Omega$, $R_2=3,5\Omega$. Ache as correntes nos três ramos do circuito.



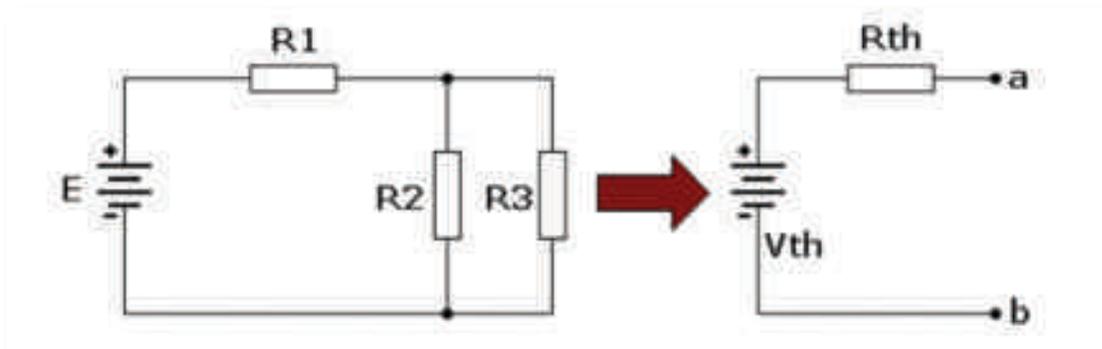
Teorema de Thévenin

O teorema de Thévenin estabelece que qualquer circuito linear visto de um ponto, pode ser representado por uma fonte de tensão (igual à tensão do ponto em circuito aberto) em série com uma impedância (igual à impedância do circuito vista deste ponto).

A esta configuração chamamos de Equivalente de Thévenin em homenagem a Léon Charles Thévenin, e é muito útil para simplificarmos circuitos maiores num circuito equivalente com apenas dois elementos a partir de um determinado ponto, onde se deseja por exemplo, saber as grandezas elétricas como tensão, corrente ou potência.

Resumindo: qualquer rede linear com fonte de tensão e resistências, pode ser transformada em uma R_{th} (resistência equivalente de Thévenin) em série com uma fonte V_{th} (tensão equivalente de Thévenin), considerando-se dois pontos quaisquer.

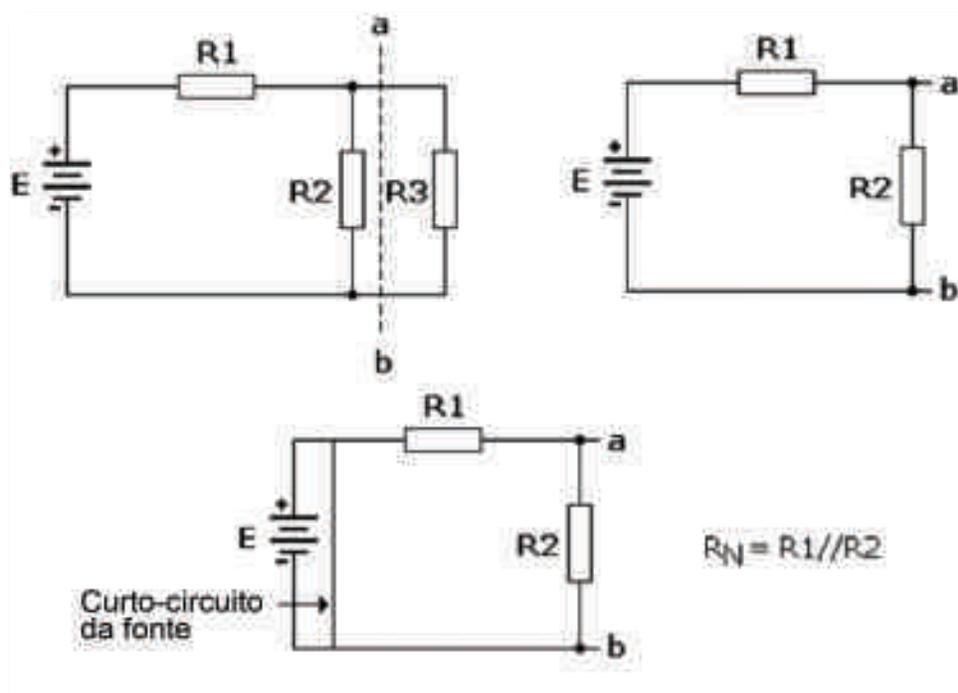
Vejamos um circuito básico:



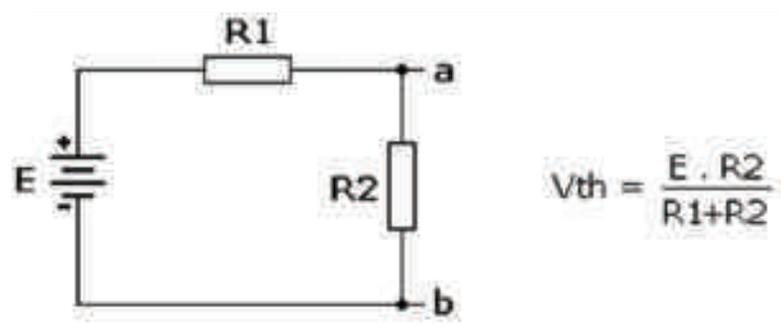
Procedimento para a obtenção do circuito equivalente de Thévenin a partir da resistência R_3 .

1. Considerando-se que R_3 é uma carga qualquer, elimina-se a mesma do circuito obtendo-se assim os pontos a e b ;
2. Coloca-se a fonte E no curto;
3. Com a fonte em curto, calcula-se a resistência equivalente vista através dos pontos a e b ;





4. Elimina-se o curto da fonte, e calcula-se agora a tensão entre os pontos a e b, onde se observa tratar-se de um divisor de tensão.

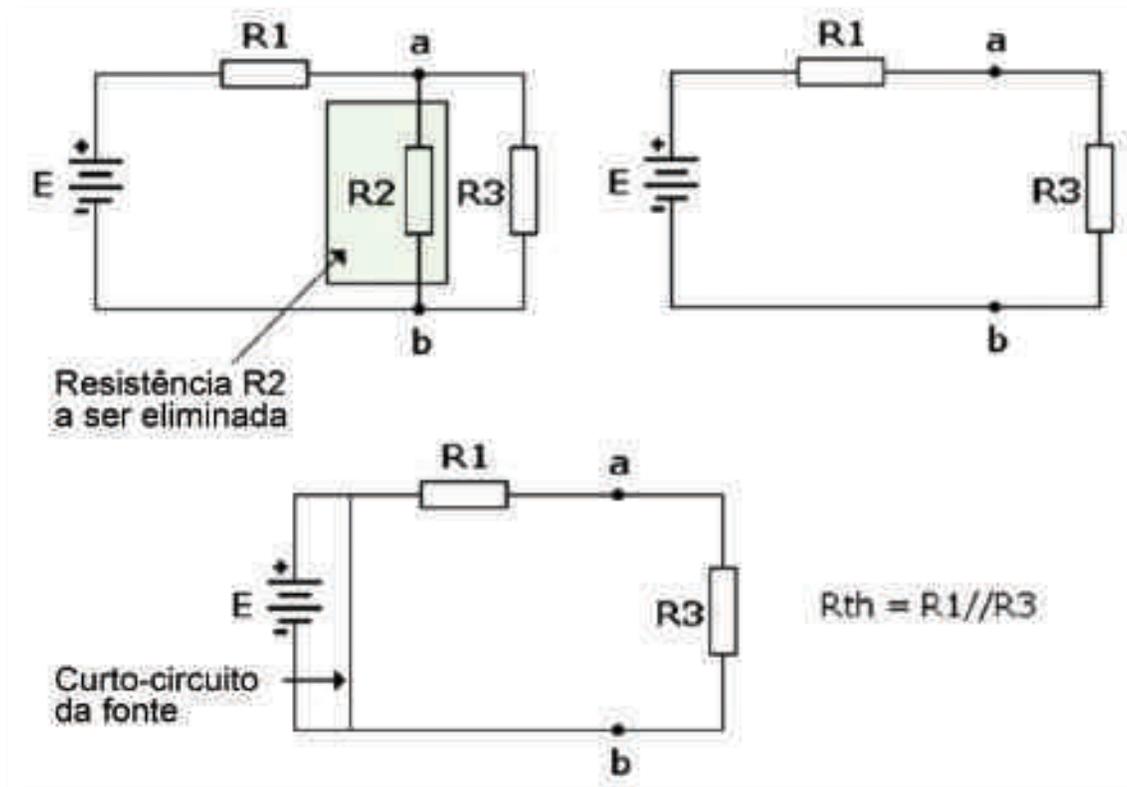


Procedimento para a obtenção do circuito equivalente de Thévenin, a partir da resistência R2.

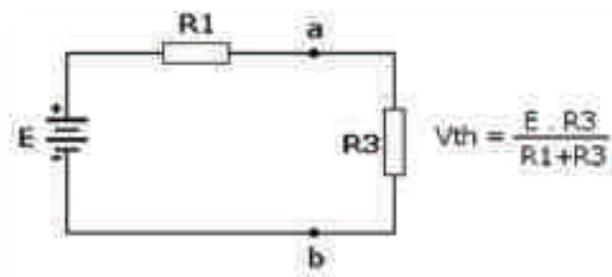
Voltando ao circuito inicial, a título de aprendizagem e fixação do conceito, veremos como ficaria o circuito equivalente de Thévenin a partir da resistência R2.

1. O procedimento é idêntico ao anterior, só que agora eliminaremos a resistência R2;
2. Calcula-se a resistência equivalente de Thévenin vista a partir dos pontos a e b;

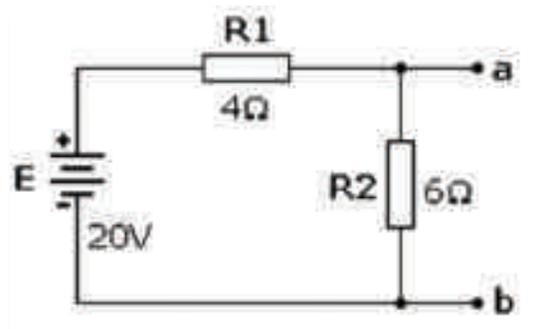




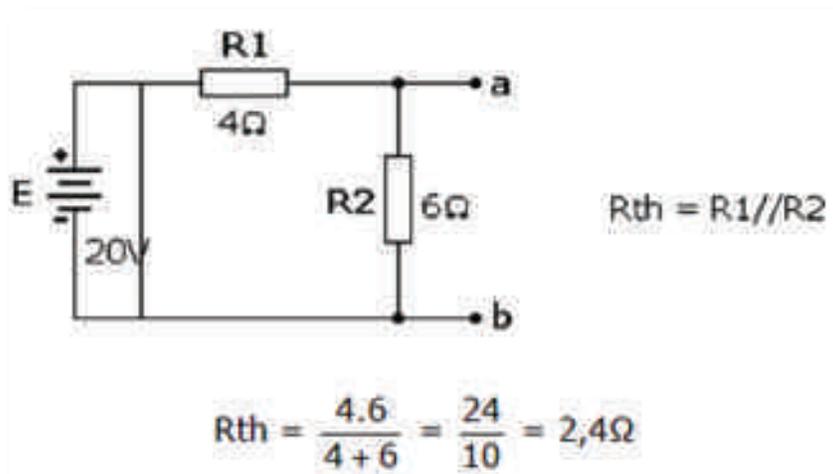
3. Como anteriormente descrito, elimina-se o curto da fonte e calcula-se a tensão equivalente de Thévenin. Neste caso, V_{th} é a tensão nos extremos de R3, que será a mesma entre os pontos a e b.



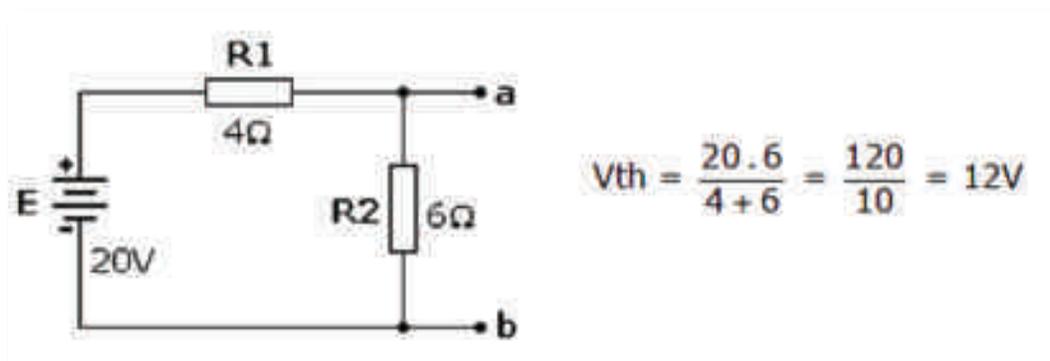
EXEMPLO 1: Calcule o equivalente Thévenin no circuito abaixo:



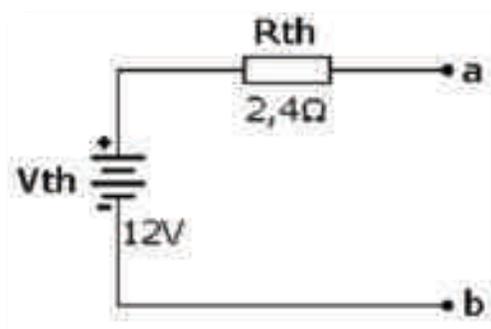
1. Colocando a fonte em curto, podemos calcular a R_{th} :



2. Eliminando-se o curto da fonte, calcula-se agora V_{th} , que é a tensão nos extremos de $R2$



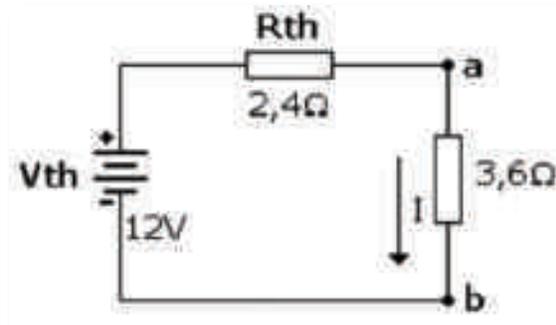
3. O circuito equivalente Thévenin ficará então composto por V_{th} e R_{th} conforme ilustra a figura abaixo:



Neste caso, a partir deste circuito equivalente, podemos calcular rapidamente a corrente, potência ou tensão em qualquer resistência ligada entre os pontos a e b.

Para mostrar a utilidade da aplicação do teorema de Thévenin, calculemos a corrente numa carga resistiva de $3,6\Omega$ inserida entre os pontos a e b, das duas maneiras:

1. Usando o circuito equivalente de Thévenin:



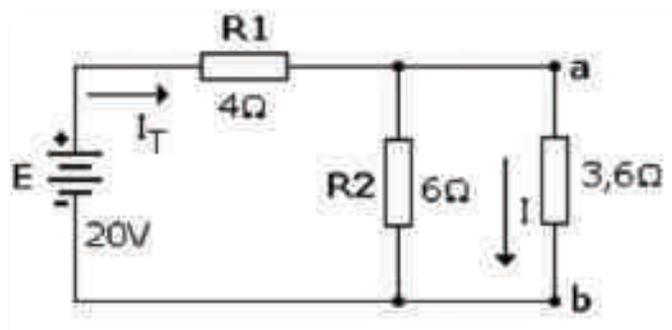
A corrente na carga será:

$I = V_{th} / R_{th} + R$ pois as resistências estão em série

$$I = 12 / 2,4 + 3,6$$

$$I = 12 / 6 = 2A$$

2. Usando o circuito original (sem o equivalente de Thévenin)



Cálculo de I_T

$$I_T = E / R_T$$

$$R_T = R_1 + R_2 // 3,6\Omega = 4\Omega + 6\Omega // 3,6\Omega$$

$$R_T = 4\Omega + 2,25\Omega = 6,25\Omega \quad (6\Omega // 3,6\Omega = 2,25\Omega)$$

$$I_T = 20V / 6,25\Omega = 3,2A$$

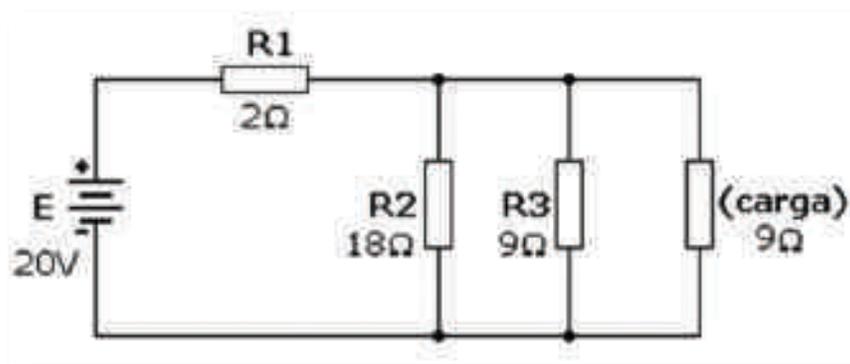


$$I = \frac{3,2 \cdot 6}{9,6} = \frac{19,2}{9,6} = 2A$$

Verifica-se que o resultado é o mesmo, porém com um processo de cálculo muito mais trabalhoso, principalmente se tivermos que calcular valores de correntes em resistências de diversos valores, como por exemplo, uma resistência variável (potenciômetro).

Exercício:

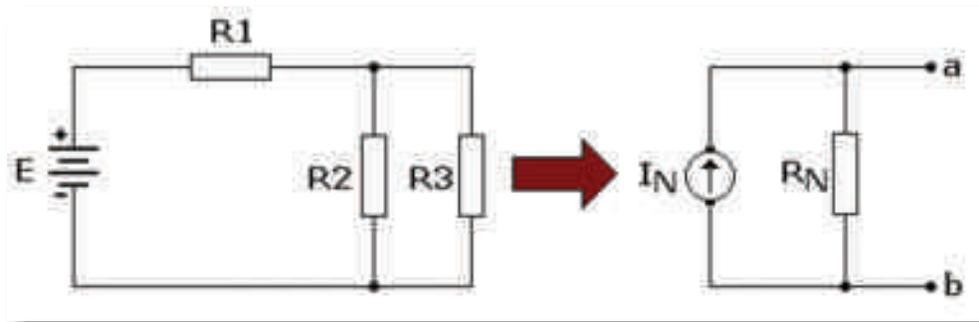
1. Calcular a tensão, corrente e potência na carga utilizando o teorema de Thévenin:



Teorema de Norton

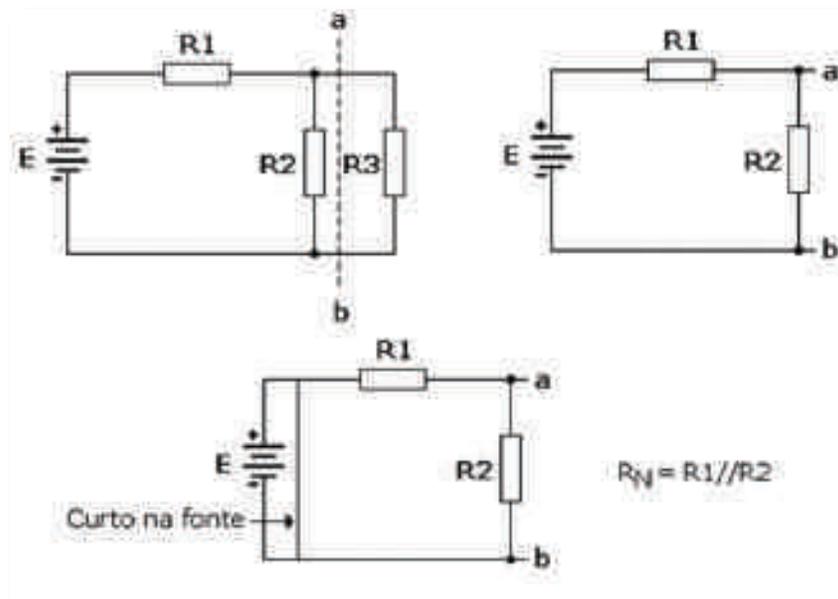
Serve para simplificar redes no que diz respeito a correntes e não a tensões, como é o caso do método de Thévenin.

O teorema de Norton, tal como o Teorema de Thévenin, permite simplificar redes elétricas lineares, reduzindo-as a um circuito mais simples: um gerador de corrente com uma resistência em paralelo.



Procedimento para a obtenção do circuito equivalente de Norton, a partir da resistência R3.

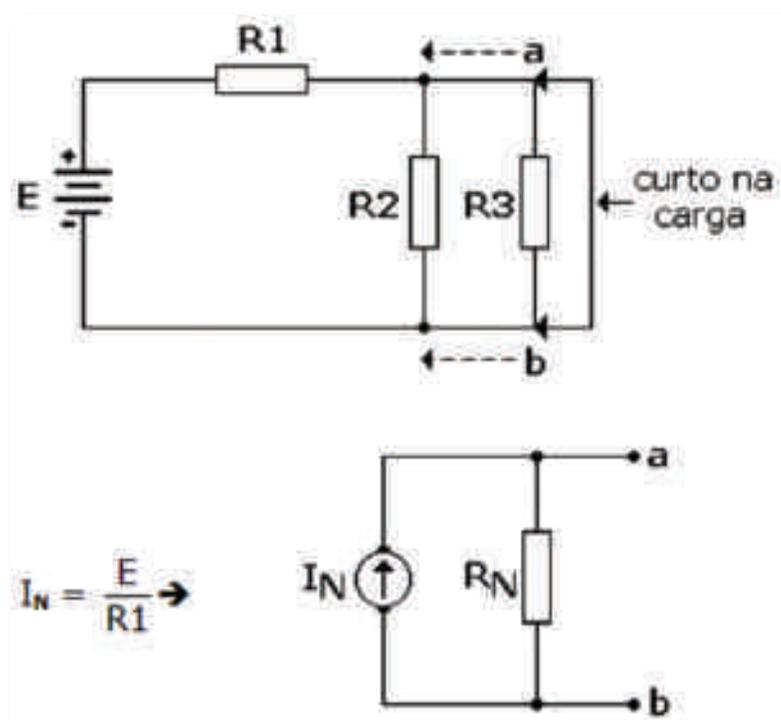
1. Considerando-se que R3 é uma carga qualquer, elimina-se a mesma do circuito obtendo-se assim os pontos a e b;
2. Coloca-se a fonte E em curto;
3. Com a fonte em curto, calcula-se a resistência equivalente vista através dos pontos a e b;



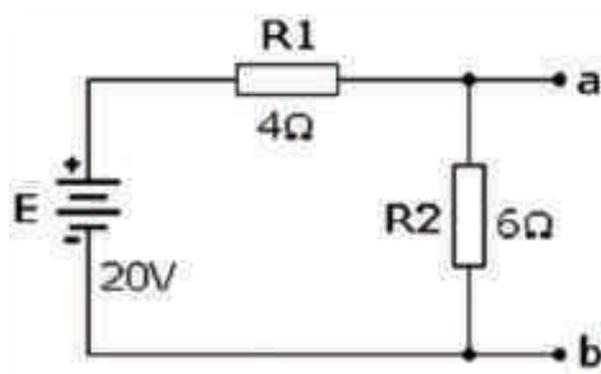
Observa-se que o procedimento para calcular a resistência equivalente de Norton é idêntico ao usado no método de Thévenin.

4. Elimina-se o curto da fonte, coloca-se a carga em curto e calcula-se agora a corrente entre os pontos a e b. Observa-se que as resistências R2 e R3 estão em curto devido ao curto colocado na carga.

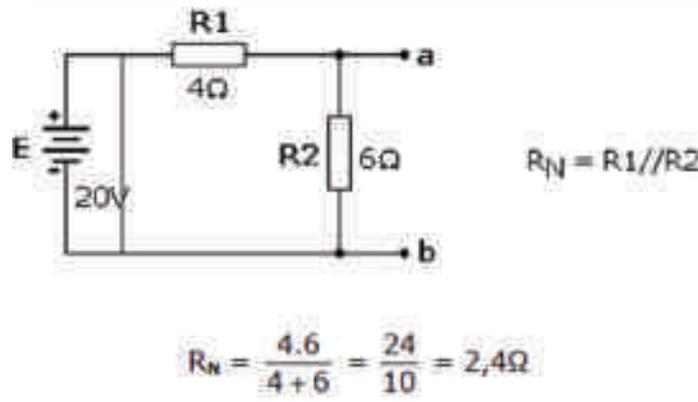
Assim, os pontos a e b deslocam-se para os extremos de R2 e a corrente equivalente de Norton é a corrente que circula no circuito devido a R1.



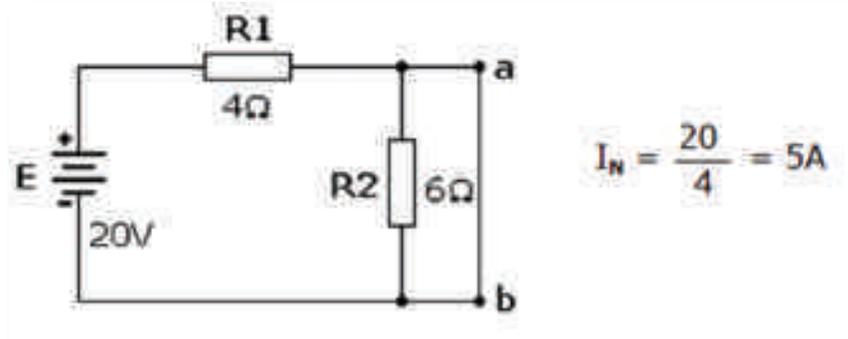
EXEMPLO 1: Calcule o equivalente Norton no circuito abaixo: (este exercício foi resolvido no capítulo anterior pelo método de Thévenin)



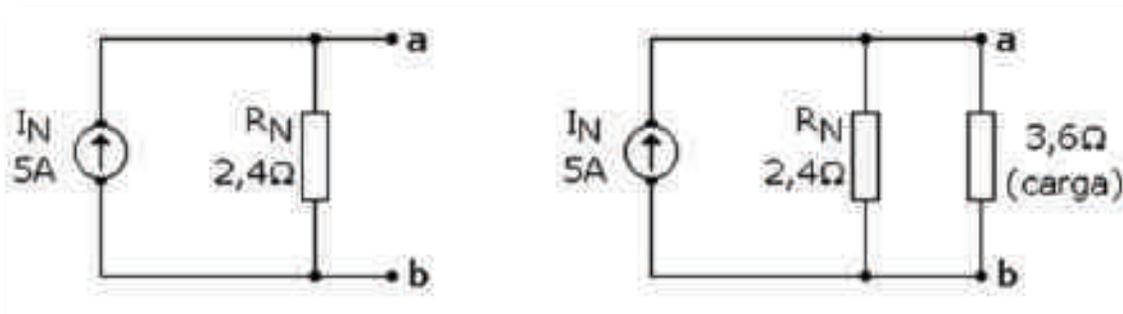
Colocando a fonte em curto, podemos calcular a R_N :



4. Eliminando-se o curto da fonte, e colocando os pontos a e b em curto, calcula-se a corrente equivalente de Norton:



O circuito equivalente Norton ficará então composto por I_N e R_N conforme ilustra a figura abaixo:



Neste caso, a partir deste circuito equivalente, podemos calcular rapidamente a corrente, potência ou tensão em qualquer resistência ligada entre os pontos a e b, a exemplo do que ocorria com o método de Thévenin.

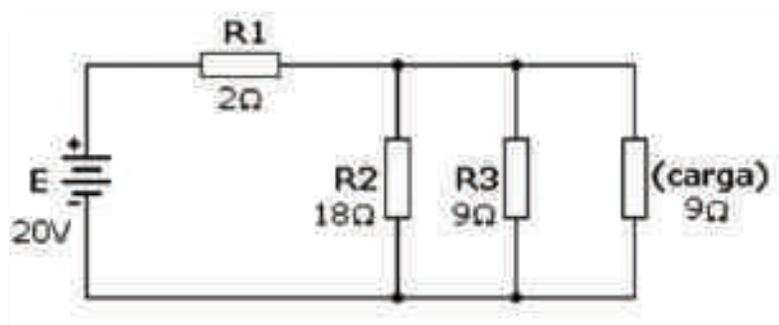
Colocando uma carga de $3,6\Omega$ entre a e b, teremos uma corrente na mesma, conforme cálculo abaixo:



$$I(\text{carga}) = \frac{5 \cdot 2,4}{2,4 + 3,6} = \frac{12}{6} = 2\text{A}$$

Exercício:

1. Calcular a tensão, corrente e potência na carga utilizando o teorema de Norton: (este exercício foi resolvido no capítulo anterior pelo método de Thévenin)



Teorema da Sobreposição

Num circuito, qualquer tensão (ou corrente) pode ser calculada como sendo o resultado da soma algébrica das diversas tensões (ou correntes) produzidas individualmente por cada fonte independente do circuito, quando todas as outras fontes independentes existentes no circuito são colocadas em repouso.

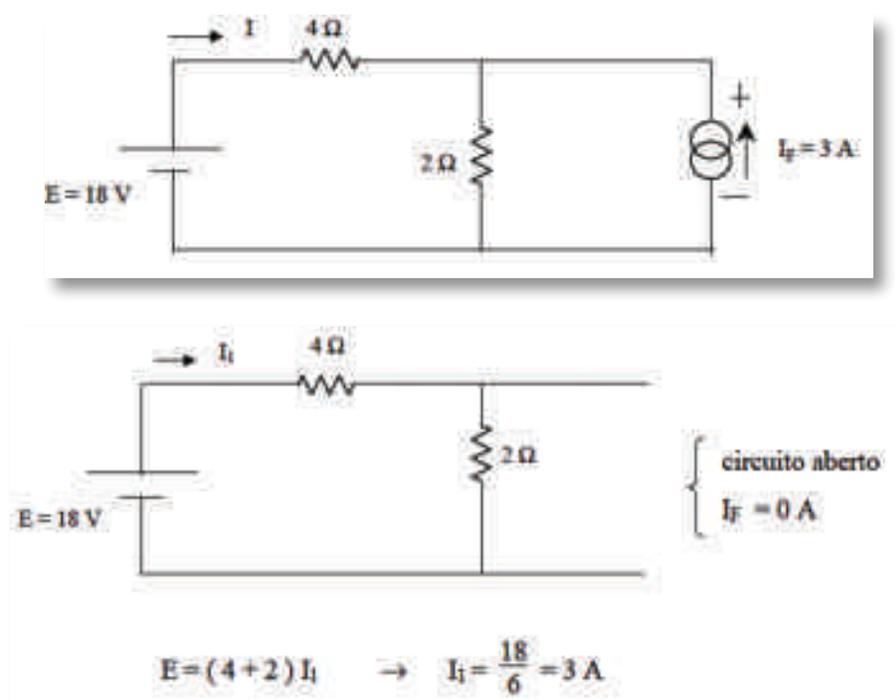
Uma fonte de tensão está em repouso se está curto-circuitada (0 volts) e uma fonte de corrente está em repouso se está em circuito aberto (0 amperes).

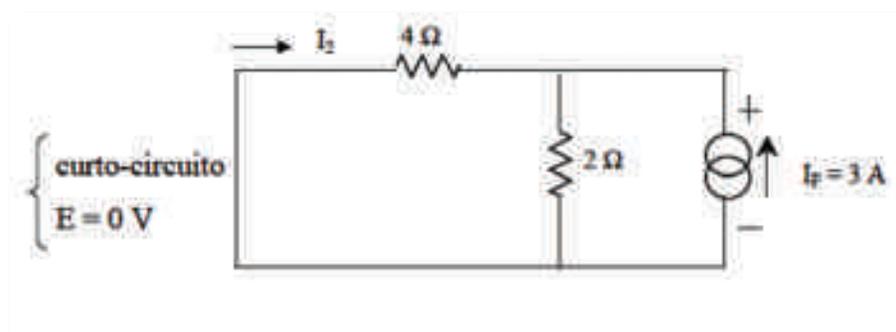
NOTAS:

- 1 - Este teorema apenas se aplica a fontes independentes; as fontes dependentes não são colocadas em repouso.
- 2 - Este teorema é sobretudo útil em corrente alternada, onde por vezes é o único método possível de resolução dos problemas

Exemplo:

Determinar a corrente I pelo método da sobreposição





Divisor de corrente:

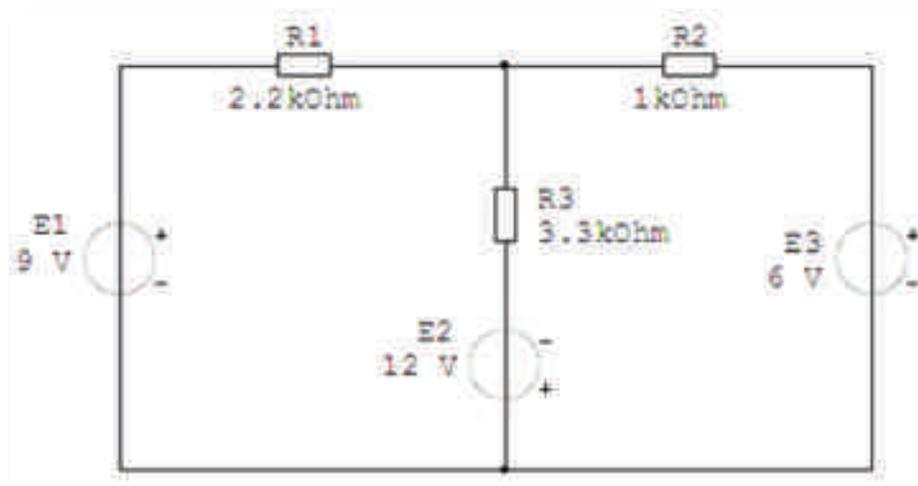
$$I_2 = -I_F \frac{2}{4+2} = -1\text{ A}$$

Logo

$$I = I_1 + I_2 = 3 - 1 = 2\text{ A}$$

Exercício:

1. Dado o circuito, determine pelo método da Sobreposição, a tensão e a corrente na resistência R2.



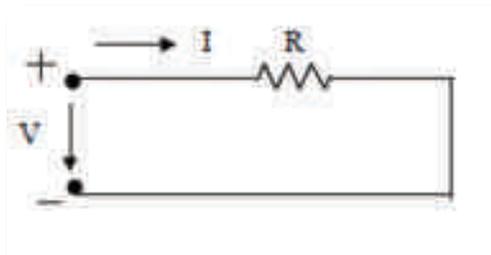
Lei de Joule. Potência e Energia

Sabe-se já que, quando um condutor é percorrido por corrente, ou seja, quando os eletrões livres que nele existem se movimentam por ação de um campo elétrico exterior, ocorrem choques dos eletrões livres com as partículas estacionárias que formam o material.

Então, sempre que há um choque, a energia cinética que o campo elétrico tinha fornecido aos eletrões livres para eles se moverem, anula-se sendo convertida em calor, fazendo aumentar a temperatura do condutor. Há portanto uma transformação da energia do campo elétrico em calor.

Pode então exprimir-se a quantidade de calor libertada por um condutor, no que se refere à queda de tensão entre os seus extremos e da corrente que nele circula.

Seja V a queda de tensão ou a d.d.p. entre os extremos do condutor e seja Q a carga movendo-se através do condutor ($Q = I t$).



Por definição de d.d.p., sabe-se que $V = \frac{W}{Q}$, isto é, o trabalho realizado pelas forças do

campo elétrico para mover os eletrões livres no interior do condutor é:

$$W = V Q = V I t$$

Este trabalho (ou energia), como já se disse, transforma-se em calor sempre que há choques dos eletrões livres com as partículas estacionárias do condutor.

Este trabalho (ou energia), como já se disse, transforma-se em calor sempre que há choques dos eletrões livres com as partículas estacionárias do condutor.



Então o calor ou energia de Joule (W_{Joule}) desenvolvida no condutor será $W_{Joule} = V I t$ e como $V = R I$ pode escrever-se que $W_{Joule} = R I^2 t = \frac{V^2}{R} t$

$$W_{Joule} = R I^2 t \quad \text{Expressão matemática da lei de Joule}$$

A energia elétrica convertida em calor no tempo t num condutor é proporcional ao quadrado de corrente que o percorre.

E a energia elétrica dissipada por unidade de tempo, ou seja, a potência elétrica dissipada será P_{Joule}

$$P_{Joule} = \frac{W_{Joule}}{t} = VI = RI^2 = \frac{V^2}{R}$$

No Sistema Internacional a unidade de potência é o watt (W) e a unidade de energia elétrica é o (W. s) ou o (kWh).

Aplicações: A produção de calor em condutores devido à passagem de corrente elétrica é largamente usada em aplicações práticas. Exemplos: ferro elétrico, fogão, aquecedores domésticos e industriais, lâmpadas; etc.



Condensadores

O condensador é um componente utilizado na eletrónica cuja principal função é o armazenamento de energia eléctrica. São constituídos, basicamente, por duas placas de metal separadas por um material isolante chamado de dieléctrico. A cada uma dessas placas de metal é ligado um fio que constitui os terminais do condensador.

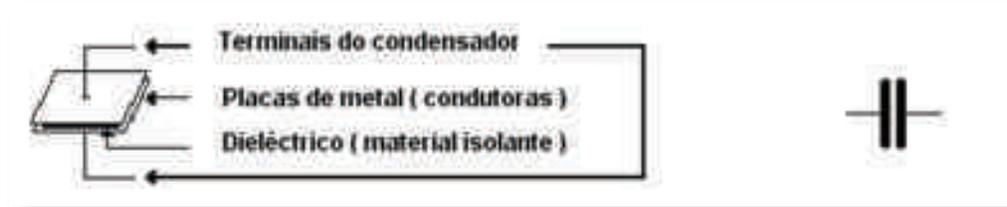


Fig. 24: Esquema interno de um condensador (à esquerda). Símbolo do condensador.

Tipo de Condensadores

Cerâmico - valores pequenos (até $1\mu\text{F}$), tensões elevadas.



Poliéster - propriedades semelhantes aos cerâmicos e valores mais elevados (até $10\mu\text{F}$)



Eletrolítico - Polarizados. Valores elevados mas com baixa precisão e estabilidade com a temperatura.



Tântalo - Polarizados. Maior capacidade volumétrica e melhor desempenho que os eletrolíticos. Baixas tensões. Dispendiosos.



Capacidade de um condensador

À propriedade do condensador em armazenar cargas elétricas ou energia elétrica dá-se o nome de capacidade. Quanto maior é o seu valor, maior será a quantidade de cargas elétricas 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 1 - Submúltiplos

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

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



em que:

Q - Carga elétrica - (C)

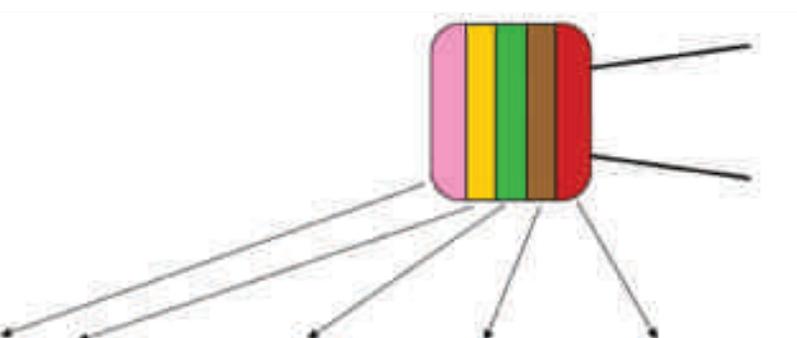
U - Tensão aplicada - (V)

C - Capacidade - Farad (F)

Exercício:

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

Código de cores



Cor	1º e 2º algarismo	Multiplicador	Tolerância	Tensão máxima
Preto	0	x1	20%	
Castanho	1	x10	± 1%	
Vermelha	2	x100	± 2%	250 V
Laranja	3	x1000	± 2,5%	
Amarelo	4	x10 000		400 V
Verde	5	x100 000	± 5%	
Azul	6	x1 000 000		630 V
Violeta	7	-----		
Cinzentos	8	-----		
Branco	9	-----	10%	

Base = pico Farads (pF)

Código de letras

É o mais habitual:



1º e 2º algarismo multiplicador
tolerância

103 M
10 000 pF = 10 nF ± 20%

10 K J
10 x 1000 = 10 000 pF = 10 nF ± 5%

Valores ≤ 10 pF:
3º algarismo = 9
(ex: 479 = 47 x 0.1 = 4,7 pF)

≤ 10 pF		> 10 pF	
B	± 0,1 pF	F	± 1%
C	± 0,25 pF	G	± 2%
D	± 0,5 pF	H	± 3%
F	± 1 pF	J	± 5%
G	± 2 pF	K	± 10%
		M	± 20%
		P	+100% - 0%
		S	+50% - 20%
		Z	+80% - 20% ou +100% - 20%

Análise de circuitos com condensadores

Uma forma simples de fixar a associação de condensadores, é o facto de, no cálculo da capacidade total CT, 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.

Circuito série

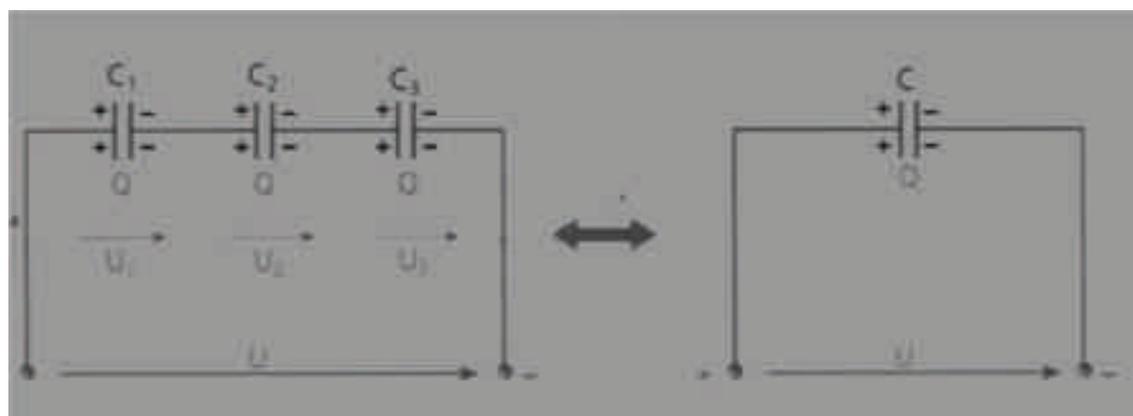


Fig. 25: Associação em série de condensadores e seu equivalente



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.

Circuito paralelo

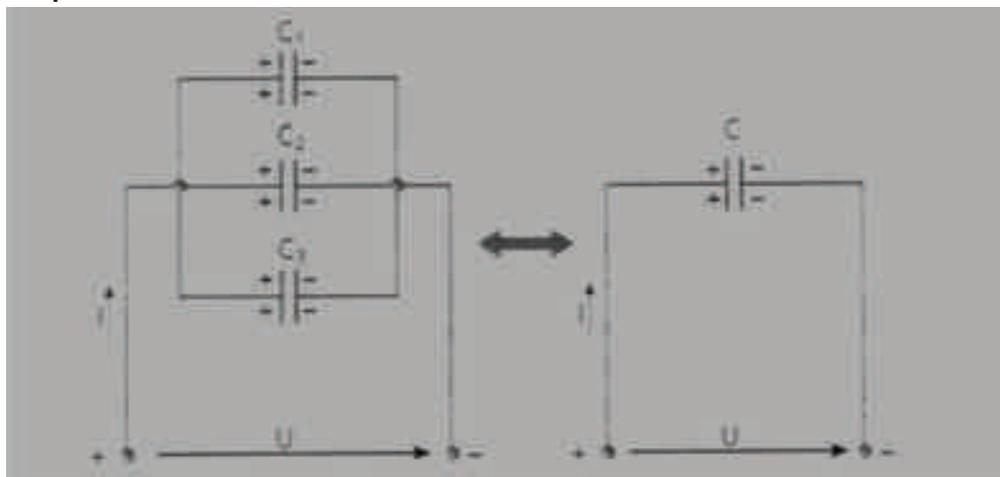


Fig. 26: Associação em paralelo de condensadores e seu equivalente.

Nos circuitos paralelos 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.

Exercícios:

2. Agrupamos três condensadores de $10\ \mu\text{F}$, $12\ \mu\text{F}$ e $47\ \mu\text{F}$ com tensão nominal de $16\ \text{V}$.

Determine:

- 2.1 A capacidade equivalente.
- 2.2 A carga armazenada quando se aplica ao conjunto dos condensadores $12\ \text{V}$.
- 2.3 A tensão nos terminais de cada condensador.

3. Associaram-se em paralelo dois condensadores de $10\ \mu\text{F}$ e $15\ \mu\text{F}$, $16\ \text{V}$. Calcule:

- 3.1 A capacidade equivalente.
- 3.2 A carga armazenada quando o conjunto é alimentado a $12\ \text{V}$.
- 3.3 A carga adquirida por cada um dos condensadores.

Constante de tempo num circuito RC

Ao aplicarmos a tensão U_{in} ao circuito da figura seguinte, 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 .

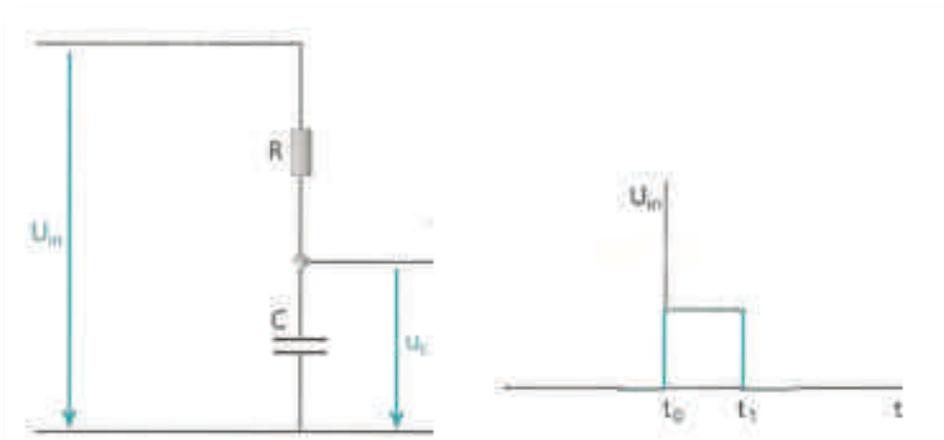


Fig. 27: Circuito de análise da carga e descarga de um condensador e respetiva forma da tensão U_{in} .



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

$$T=R.C$$

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

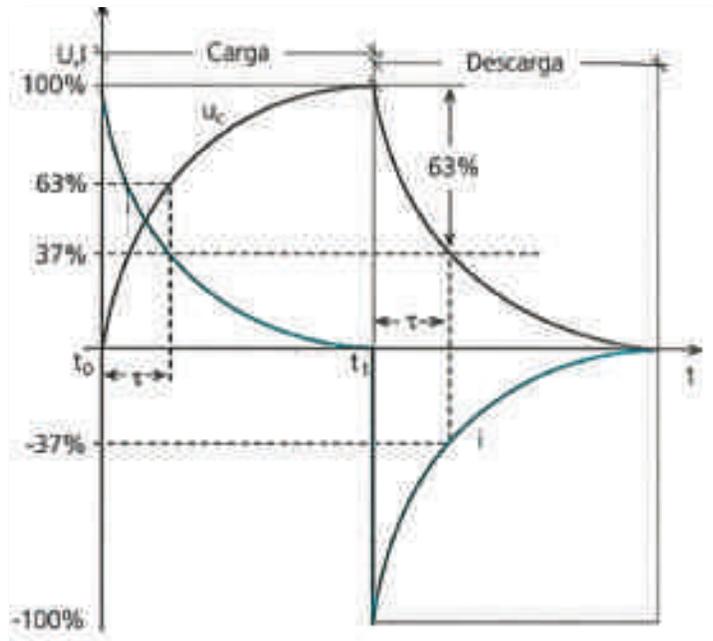


Fig. 28: Gráfico de carga e descarga de um condensador e respetivos valores de τ

No instante t_0 , a tensão U_{in} é aplicada ao circuito carregando, consequentemente, 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.

Condensadores em corrente contínua

Carga de um condensador

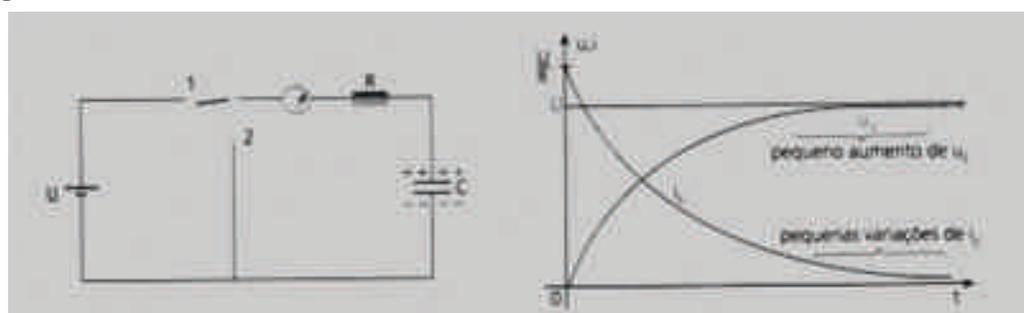


Fig. 29: Curvas de carga de um condensador e da corrente no circuito.



Ao ligarmos um circuito constituído por um condensador e um galvanómetro, (instrumento capaz de detetar 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 eletrões 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 eletrões é deslocado da armadura negativa para a armadura positiva, sendo atraído 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 eletricidade aumenta à medida que se vai efetuando 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

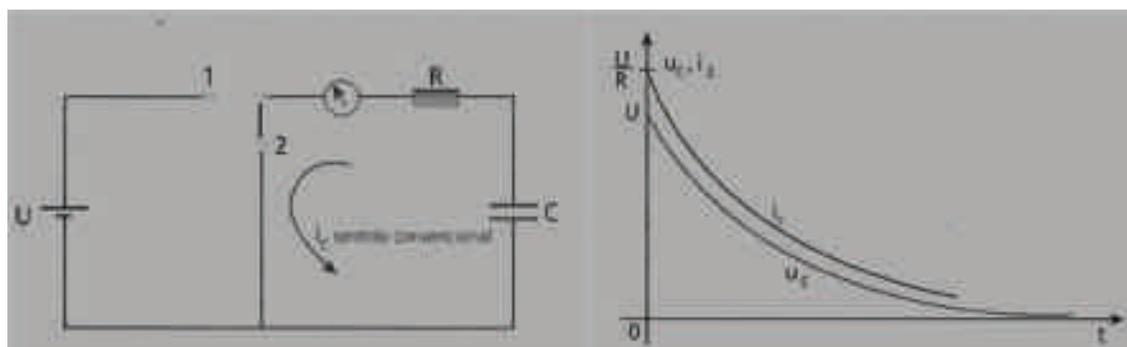


Fig. 30: Curvas de descarga de um condensador e respetivas formas de U_C e i_C .

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 eletrões 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.



Bibliografia

ANGULO, J. M., *Enciclopédia de Electrónica Moderna, Vol. 1*. Madrid. Editorial Paraninfo. (s.d.).

MATIAS, José, *Electricidade, Vol. 1*. Didáctica Editora. (s.d.).

MATIAS, José, *Práticas Laboratoriais de Electrotecnia e Electrónica, 10.º Ano. Curso Tecnológico de Electrotecnia e Electrónica*. Didáctica Editora. (s.d.).

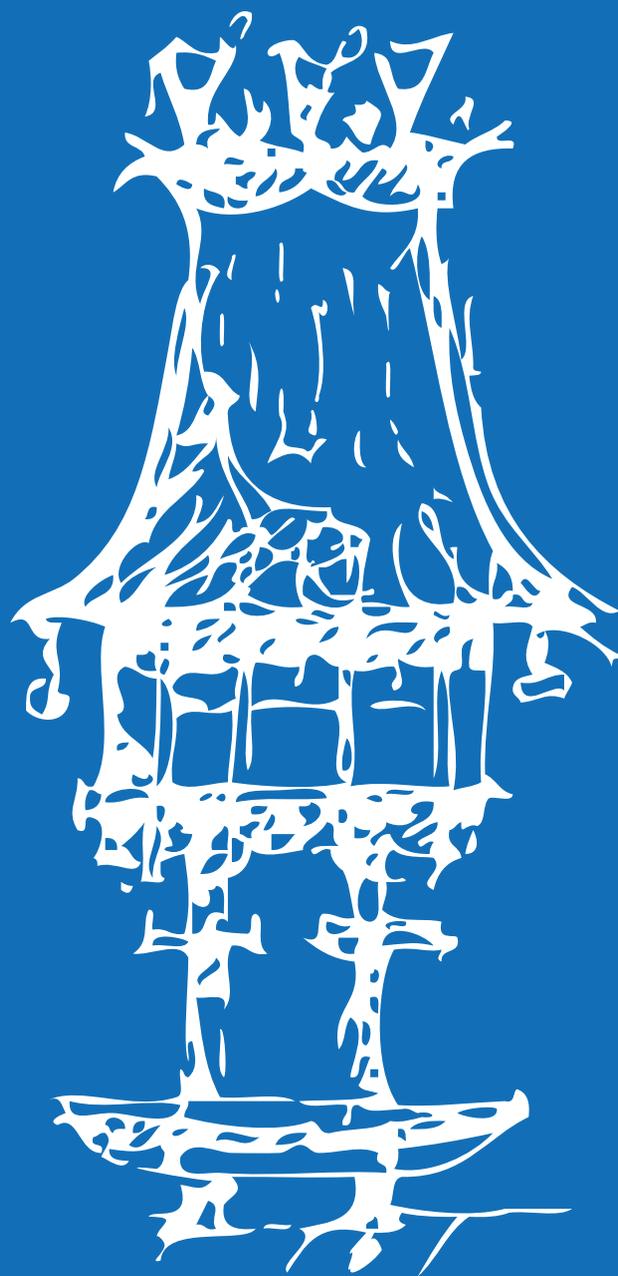
MATIAS, José, *Sistemas Analógicos e Digitais, 10.º Ano, Vol. 1. Curso Tecnológico de Electrotecnia e Electrónica*. Didáctica Editora. (s.d.).

PEREIRA, A. Silva e outros. *Electricidade, 10.º Ano. Curso Tecnológico de Electrotecnia e Electrónica*. Porto Editora. (s.d.).

PEREIRA, A. Silva e outros. *Práticas Laboratoriais de Electrotecnia e Electrónica, 10.º Ano. Curso Tecnológico de Electrotecnia e Electrónica*. Porto Editora. (s.d.).

PEREIRA, A. Silva e outros, *Sistemas Analógicos e Digitais, 10.º Ano. Curso Tecnológico de Electrotecnia e Electrónica*. Porto Editora. (s.d.).







Magnetismo e Eletromagnetismo

Módulo 3

Apresentação

Este módulo tem carácter teórico-prático, por isso deverá decorrer, em parte, em ambiente laboratorial para que os alunos conheçam e comprovem os principais efeitos magnéticos da corrente elétrica, suas grandezas e principais aplicações.

Esta disciplina tem como intenção tornar o aluno apto a compreender a linguagem e as técnicas utilizadas, possibilitando assim um melhor aproveitamento na sequência dos estudos desta e das outras disciplinas técnicas e também na comunicação adequada com os profissionais da área.

Introdução

A abordagem deste módulo de magnetismo e eletromagnetismo leva-nos a uma melhor compreensão dos vários tipos de aparelhos, que incorporam circuitos que utilizam estas características, existentes no mercado assim como a melhor escolha deste tipo de equipamentos para que se ajuste às crescentes evoluções disponíveis pelas diversas marcas.

Este módulo requer um conhecimento básico de matemática e física e circuitos eletrónicos.

Objetivos de aprendizagem

- Definir campo magnético e espectro magnético.
- Identificar e explicar o espectro magnético de um íman permanente.
- Descrever os campos magnéticos criados pelas correntes elétricas.
- Descrever as interações entre campos magnéticos e correntes elétricas.
- Explicar o fenómeno da histerese magnética.
- Compreender os circuitos magnéticos e o seu funcionamento.
- Descrever a indução eletromagnética e os fenómenos associados.
- Identificar aplicações do eletromagnetismo.



Âmbito de conteúdos

- O campo magnético.
- Campos magnéticos produzidos pela corrente elétrica.
- Forças eletromagnéticas.
- Magnetização dos materiais ferrosos.
- Circuito magnético.
- Indução eletromagnética.



Efeitos magnéticos da corrente elétrica

Antes de entrarmos em estudos sobre os efeitos magnéticos produzidos pela corrente elétrica na sua passagem pelos condutores, será necessário dar explicações, ainda que resumidas, sobre o magnetismo em geral.

O **íman natural** é um minério que atrai pedaços de ferro ou de aço. Ímanes naturais são os óxidos magnéticos (minérios de ferro) conhecidos sob o nome de «magnetita». A sua propriedade de atrair objetos de ferro é chamada «magnetismo». Uma barra de aço pode ser magnetizada pelo simples contacto com um íman natural (diz-se então que ela é íman artificial). Num íman, cada molécula representa um pequeno íman. Por esta razão, quando uma barra de aço magnetizada é cortada em muitos pedaços, cada um desses pedaços continua a ser um íman. Entre as leis que determinam a natureza de cargas elétricas e a das massas magnéticas existe muita semelhança. Por exemplo, nos ímanes distinguimos dois polos: Norte e Sul, os quais obedecem às leis relativas a cargas elétricas, isto é polos contrários atraem-se e polos idênticos repelem-se.

Em consequência disso, se aproximarmos dois ímanes de tal maneira que o polo norte de um fique próximo ao polo sul do outro, os mesmos atrair-se-ão mutuamente. Se, porém aproximarmos dois ímanes de tal forma que o polo norte de um fique próximo do polo norte do outro, os dois ímanes repelir-se-ão. O magnetismo encontra inúmeras aplicações na técnica e na ciência. Uma das formas mais conhecidas da aplicação prática dos ímanes é a bússola. Esta compõe-se de uma agulha magnetizada, suspensa no seu centro sobre um eixo, de maneira a poder mover-se com facilidade. Observa-se logo que, sempre que se desviar a agulha da posição em que se acha, ela voltará à mesma direção. Este fenómeno deve-se ao poder magnético do próprio globo terrestre, pois, com se sabe, o nosso planeta possui dois polos magnéticos. Estes estão localizados nas proximidades dos polos Norte e Sul. A ação do magnetismo terrestre obriga a agulha da bússola a colocar-se sempre na mesma direção, indicando, com as extremidades, a direção destes polos magnéticos. Colocando-se em cima de um íman (que poderá ser natural ou artificial) uma folha de papel na qual se espalha limalhas de ferro, observar-se-á que estas limalhas se distribuirão numa posição característica. No desenho assim formado ver-se-ão linhas, constituídas pelas limalhas, que unem entre si os polos do íman.



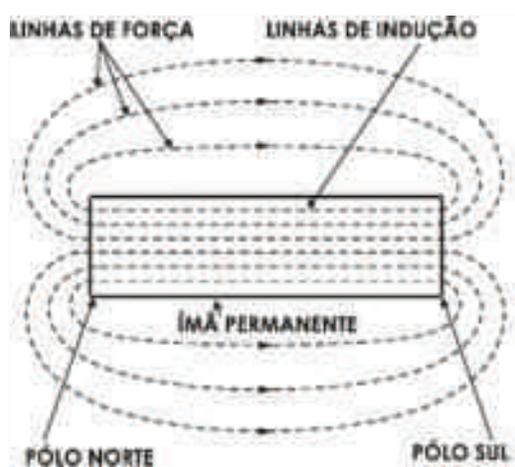


Fig. 1 - Quantidade de linhas de força magnética que existem no campo magnético

Deve-se isso ao fato de que cada partícula de limalha sofre a influência da força magnética principal, e todas as partículas se orientarão de tal maneira que indicam a direção das linhas. Estas linhas curvas assim traçadas são conhecidas como «linhas de força magnética». O espaço em torno do ímã onde há linhas de força magnética, ou seja, o espaço até onde chega à ação do ímã, chama-se «campo magnético». A quantidade de linhas de força magnética que existem no campo determina a sua intensidade.

A unidade de medição da intensidade do campo magnético é o gauss (um gauss é igual a uma linha por centímetro quadrado). As linhas de força magnética dos ímanes têm o sentido do polo norte ao polo sul, externamente. Têm porém o sentido do sul ao norte no interior do ímã. As linhas de força magnética internas chamam-se «linhas de indução». Se um ímã for dobrado de tal maneira que dois polos fiquem bem próximos entre si, as linhas de força serão concentradas num espaço relativamente reduzido e a intensidade do campo produzido neste lugar será muito grande.



Fig. 2: Exemplo de ímã dobrado



Se o íman for completamente fechado, não existirão linhas de força magnética e sim, unicamente, linhas de indução. Colocando-se um pedaço de ferro dentro de um campo magnético, observar-se-á que o ferro fica magnetizado e a posição dos seus polos será tal que parte das linhas de força do campo serão as linhas de indução. A retirar um pedaço de ferro do campo magnético, o mesmo perde a sua magnetização quase que completamente, ficando apenas uma leve magnetização (magnetismo remanescente). Se em vez de um pedaço de ferro, se colocar no campo magnético uma barra de aço, a magnetização subsistirá quase que totalmente, depois de retirá-la da ação do campo magnético. Ao colocar dentro de um campo magnético uma barra de ferro doce, observar-se-ão as seguintes modificações:

1º - A intensidade do campo aumenta e, por conseguinte, as linhas de força magnética antes existentes no campo multiplicam-se dentro do ferro.

2º - A forma do campo modificou-se, pois, todas as linhas de força procuram passar através do ferro introduzido no campo magnético. Essas duas modificações devem-se ao fato de que o ferro é mais «permeável» que o ar, para as linhas de força magnética. Em outras palavras, o ferro é melhor condutor para as linhas magnéticas que o ar. Em consequência, se se pretende reforçar o campo magnético numa determinada região, basta colocar nesse lugar um pedaço de ferro, que se encarregará de concentrar as linhas de força. Se num campo magnético de intensidade uniforme se colocar um pedaço de ferro, de acordo com o exposto, as linhas de força magnéticas serão mais numerosas dentro do ferro do que as que existiam antes no espaço por ele ocupado.

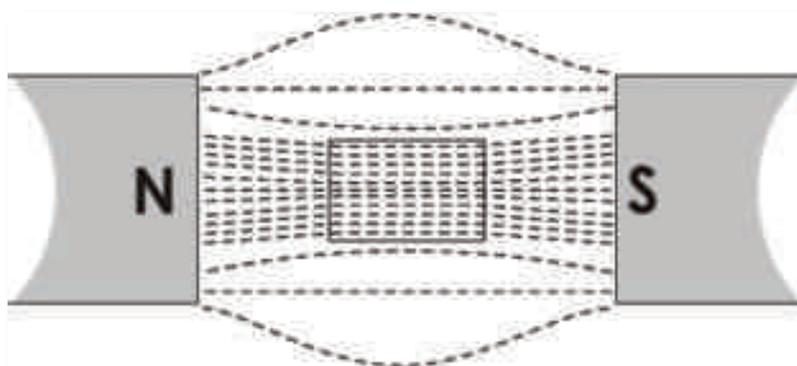


Fig. 3: Barra de ferro no interior do campo magnético

O número de vezes que se aumentou a intensidade das linhas de força magnética, no campo, chama-se «coeficiente de permeabilidade». O coeficiente de permeabilidade



é grande para o ferro, menor para o ferro fundido e ainda menor para o aço. Esses metais são «magnéticos». Os metais, como o cobre, chumbo, ou madeira, vidro etc., que não produzem modificação alguma no campo, quanta à sua intensidade ou à direção das suas linhas de força, são conhecidos como materiais «não magnéticos». Existem ainda substâncias (como bismuto) onde as linhas de força magnética ficam ainda mais reduzidas do que no ar. Estas outras substâncias são conhecidas por materiais «diamagnéticos».



Produção de Campo Magnético por Corrente Elétrica

Quando um condutor é percorrido por uma corrente elétrica, forma-se em redor do mesmo um campo magnético concêntrico. Fazendo, por exemplo, passar um condutor perpendicularmente através de uma folha de papel e espalhando-se limalhas de ferro nesta última, o campo magnético provocado pela corrente elétrica que o percorre forçará as linhas a dispor-se em linhas concêntricas. O sentido destas linhas de força magnética é determinado pela direção da corrente elétrica. Na figura seguinte, indicamos tanto o sentido do fluxo da corrente, como o sentido das linhas de força resultantes.



Fig. 4: Campo magnético provocado pela corrente elétrica

Se o condutor está enrolado de tal maneira que forma um determinado número de espiras circulares dispostas umas em continuação das outras, em forma cilíndrica, constitui um solenoide. Um solenoide também produz linhas de força magnética quando é percorrido por uma corrente elétrica.

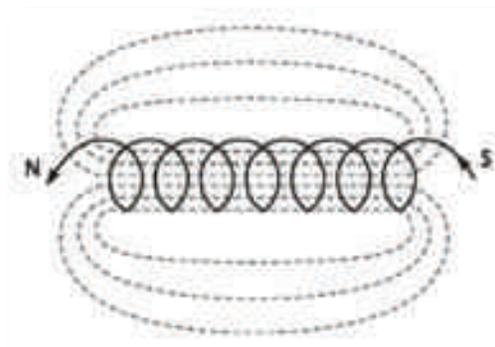


Fig. 5: Espiras circulares dispostas umas em continuação das outras



A direção destas linhas de força, são do polo norte ao polo sul, na parte externa do «solenóide», e do polo sul ao polo norte, na parte interna. O sentido do campo magnético produzido por um solenóide depende da direção da corrente que flui no mesmo. Também valem, neste caso, as regras estabelecidas para o condutor simples. A intensidade do campo magnético produzido à volta de cada espira depende da intensidade (amperagem) da corrente que circula pela mesma, porém, a força do campo magnético total de um solenóide depende:

- 1º - Da intensidade da corrente que passa pela bobina;
- 2º - Do número de espiras;
- 3º - Do diâmetro das espiras;
- 4º - Do comprimento da bobina.

Quanto mais intensa for a corrente e quanto maior o número de espiras e o diâmetro das mesmas, maior será o campo magnético produzido; porém, quanto mais comprida for a bobina, menor será a intensidade do campo magnético (para igual número de espiras). Se introduzirmos no interior da bobina um pedaço de ferro, este fará aumentar a intensidade do campo magnético, pois este material possui características tais que favorecem a formação e a propagação das linhas de força magnética, concentrando-as ao mesmo tempo o mais possível. A influência do ferro para reforçar a intensidade do campo magnético será tanto maior em proporção, quanto mais fraco for o campo sem o ferro em questão. Numa área onde a intensidade das linhas de força magnética for de 10 linhas por centímetro quadrado, com a introdução de um pedaço de ferro doce, o número das linhas aumentará cerca de mil vezes, ficando a intensidade de campo com 10.000 linhas por centímetro quadrado.

Se, porém, a quantidade de linhas de força magnética existentes antes da introdução do «núcleo de ferro», for de 50 (por centímetro quadrado), com a introdução do ferro estas aumentarão cerca de 25 vezes, passando a intensidade do campo a 12.500 linhas. Se as linhas de força magnética, antes da introdução do «núcleo», forem de 20000 (mais ou menos), então, com a introdução do ferro, a intensidade não sofrerá alteração alguma, pois as propriedades do ferro não permitem o aumento das linhas de força magnética acima desta intensidade e, por mais que aumentemos a intensidade da corrente que percorre a bobina, o campo magnético permanecerá no mesmo valor. Neste caso, quando



a densidade das linhas de força magnética atingir o máximo possível, diz-se que o ferro fica SATURADO. Esta propriedade do ferro de aumentar, ou melhor, multiplicar as linhas de força magnética que passam através dele chama-se PERMEABILIDADE e o número pelo qual fica multiplicada a densidade das linhas magnéticas chama-se «coeficiente de permeabilidade». O coeficiente de permeabilidade, para os casos acima descritos, era de 1.000 no primeiro, 25 no segundo e de 1 no último. Introduzindo-se uma barra de ferro doce no interior de um solenoide, as linhas de força magnética neste serão muito mais numerosas e a intensidade do novo campo magnético será determinada pelo coeficiente de permeabilidade do ferro. O valor do «coeficiente de permeabilidade» depende muito da natureza do metal. Este coeficiente será tanto maior para um metal magnético, quanto menor for a intensidade do campo magnético. Conclui-se que quanto menor for o campo magnético (H) em que se coloca o ferro, maior será o coeficiente de permeabilidade ou, em outras palavras, à medida que o campo aumenta de intensidade, o efeito do ferro sobre o aumento das linhas de força magnética será cada vez menor.

O coeficiente de permeabilidade não é o mesmo para todos os ferros, pois, para o ferro com alta dosagem de silício é ótimo, para o ferro forjado e recozido já é inferior e para ferro fundido é péssimo. Em consequência, o ferro mais indicado para ser empregue, a fim de obter aumento na intensidade do campo magnético produzido pela corrente elétrica, é o ferro doce ou ferro silício. A força que o campo magnético num ponto qualquer exerce sobre uma massa magnética (ferro) pode ser facilmente medida. Como no caso da corrente elétrica tínhamos o circuito elétrico, para o magnetismo temos o circuito de força magnética entre os dois polos, que é o caminho descrito pelas linhas do íman. No caso de uma bobina comum, o circuito magnético é completado através do espaço em redor da bobina. Porém, se a bobina for enrolada num anel de ferro, então as linhas de força magnética completarão o seu percurso, acompanhando o ferro, pois este oferece um caminho muito mais fácil, devido à sua maior permeabilidade.



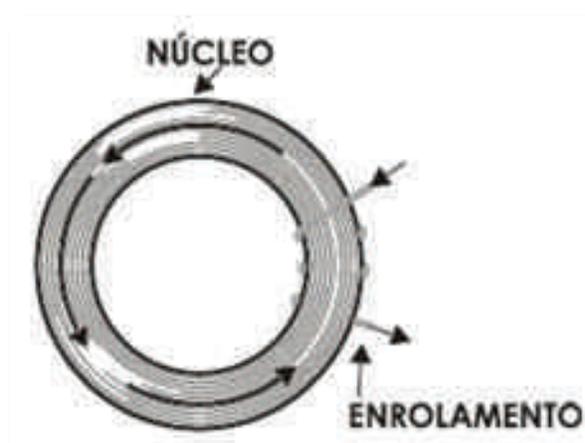


Fig. 6: Enrolamento de bobina em anel de ferro

Ainda que o núcleo de ferro sobre o qual está enrolada a bobina seja quadrado, ou mesmo de outra forma, as linhas de força magnética acompanharão todas as curvas deste.

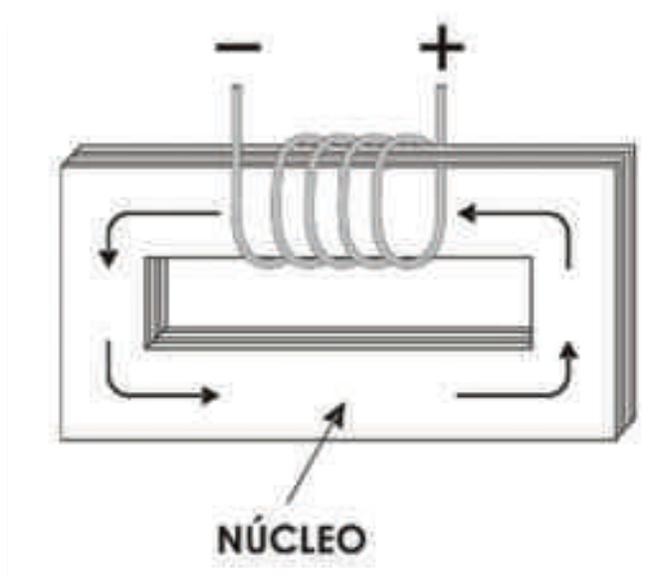


Fig. 7: Enrolamento de bobina em chapas de ferro

Do exposto acima, compreende-se que é possível produzir ímanes artificiais com o auxílio da eletricidade. Estes ímanes são chamados ELETROÍMANES e a sua aplicação na indústria, na ciência, como também na rádio, é enorme.

Temos, por exemplo, o «guindaste elétrico» para transporte de ferro. Este guindaste é um enorme eletroímã que se coloca por cima do ferro ou ferros a carregar, ligando-se a corrente elétrica à bobina. A corrente elétrica, ao passar pelos enrolamentos,



produz um campo magnético que atrai os ferros em questão, segurando-os firmemente. Depois, quando o guindaste já transportou os ferros até ao ponto desejado, a corrente é desligada, desaparecendo, em consequência, o campo magnético e soltando-se deste modo os ferros. Outro exemplo da aplicação do eletroímã é a campainha elétrica. Esta é formada pelos seguintes elementos: um eletroímã, uma lâmina vibradora feita de aço, um pedaço de ferro doce fixado na lâmina vibradora e um parafuso regulável com ponta de platina para fazer contacto com um contacto de platina aplicado à lâmina. Em combinação com a lâmina vibradora existe também uma esfera metálica que, conforme o movimento daquela, bate contra uma campânula, produzindo o som.

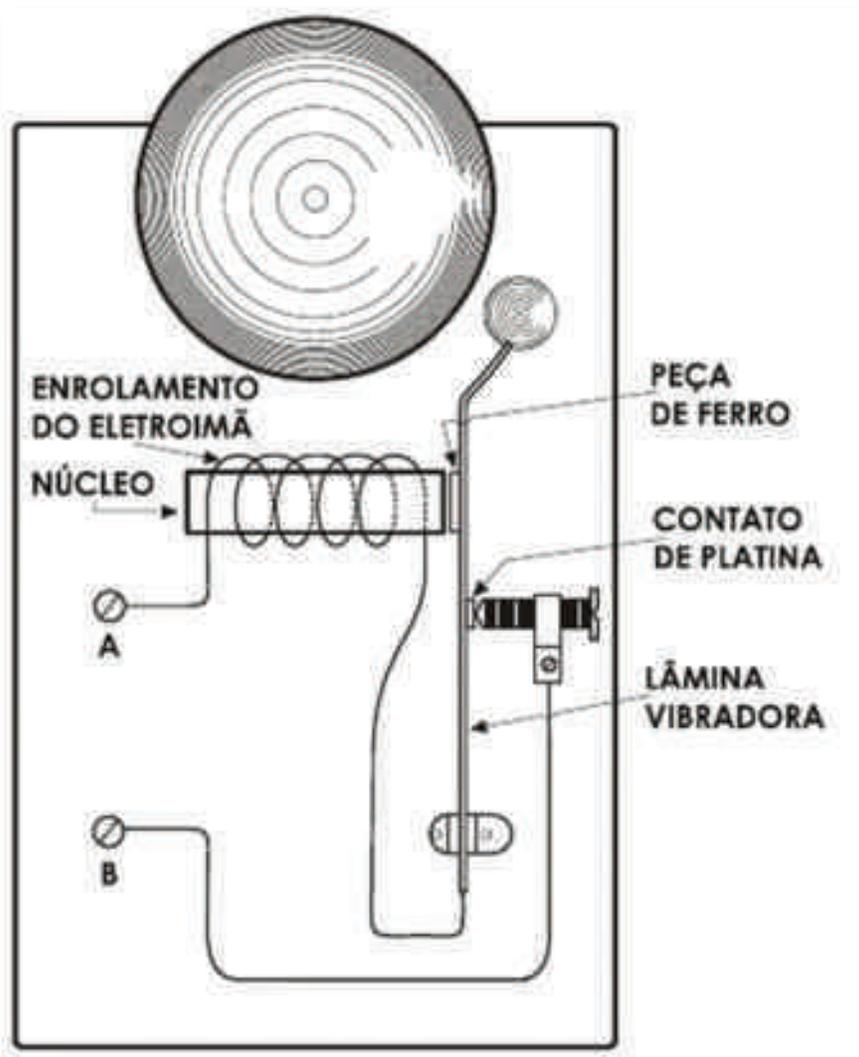


Fig. 8: Exemplo de funcionamento de uma campainha

Ao aplicar corrente nos bornes A e B, esta percorre a bobina do eletroímã, pois o circuito está completado através do contacto existente entre a lâmina e o parafuso. Ao



passar a corrente pela bobina do eletroímã, este cria um campo magnético e atrai para si o pedacinho de ferro doce, preso à lâmina. No momento em que é atraída a lâmina, interrompe-se a corrente e com isto o eletroímã perde o seu poder de atração. Portanto, a lâmina voltará à posição inicial, pela sua natural elasticidade, fechando novamente o contacto. Novamente, repete-se o ciclo: o ímã atrai a lâmina, esta põe-se em movimento, interrompe-se o contacto, a lâmina volta à sua posição primitiva e fecha novamente o contacto, etc. A bola de aço que está na ponta do vibrador bate contra a campainha cada vez que a lâmina é atraída pelo eletroímã e a continuidade destas batidas produzirá o som característico. Outro exemplo do emprego prático do eletroímã é o «fone de ouvido». Um fone é construído da seguinte maneira: em redor dos polos de um ímã permanente, em forma de U estão colocados duas bobinas enroladas com muitas espiras de fio fino.

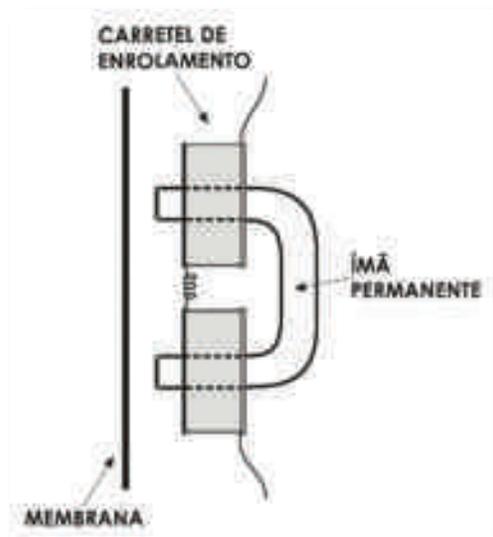


Fig. 9: Bobinas enroladas em ímã forma U

A uma pequena distância dos polos do ímã encontra-se uma membrana. Esta é feita de chapa de ferro bastante fina e, portanto, é atraída pelo ímã permanente. A distância entre a chapa e o ímã é tal que existe uma forte atração, contudo sem que se verifique o encosto aos polos. Uma corrente elétrica que passe pelas espirais dos carretéis reforça o campo magnético do ímã, passando em direção contrária enfraquecerá o mesmo campo. A membrana será atraída mais ou menos fortemente, de acordo com a força do campo magnético. Daí resultará um movimento vibratório da membrana, sendo que a vibração desta corresponderá exatamente às variações da intensidade da corrente que



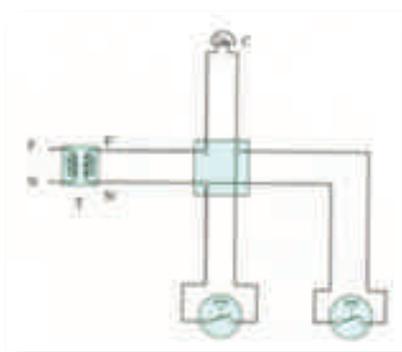
passa pela bobina do íman. As vibrações da membrana produzirão as mesmas vibrações no ar, resultando ondas sonoras que, ao atingirem o ouvido humano, produzirão nele a sensação de som. Conforme foi visto, a passagem da corrente elétrica através de um condutor provoca o aparecimento de um campo magnético, que é definido pelo sentido e intensidade da corrente elétrica que percorre o mesmo condutor.

Por sua vez, um campo magnético é capaz também de introduzir corrente elétrica num condutor. De fato, no condutor que se acha «mergulhado» num campo magnético de intensidade variável ou no condutor que se move num campo magnético e corta as linhas de força do mesmo, será induzida uma força eletromotriz. O valor da força eletromotriz induzida no condutor corresponderá ao número de linhas de força magnética por ele cortadas em cada segundo. Por sua vez, a polaridade da f.e.m. dependerá do sentido do campo magnético. Neste princípio baseia-se o funcionamento dos dínamos geradores de corrente. Nos dínamos, com o auxílio de uma força mecânica, fazem-se girar bobinas dentro de um campo magnético, sendo que as espiras cortarão, naturalmente, as linhas de força magnética que constituem o campo. Nessas bobinas induzirá-se uma força eletromotriz que poderá ser transferida para um circuito exterior através de «escovas», uma espécie de contactos flexíveis feitos de carvão. Com o auxílio dos dínamos, transformamos em energia elétrica a força motriz proveniente de um motor a gasolina de uma máquina a vapor, ou também de água (por meio de turbinas hidráulicas). Os motores elétricos transformam a energia elétrica em força motriz. Baseiam o seu funcionamento no seguinte princípio: quando um condutor se acha num campo magnético e é percorrido por uma corrente, põe-se em movimento. O sentido do movimento dependerá do sentido da corrente elétrica, em relação ao sentido do campo magnético. A força motriz originada depende da intensidade do campo magnético, como também da intensidade da corrente que percorre o referido condutor. Noutros casos, os motores funcionam com uma simples disposição de eletroímãs, feita em forma adequada. Estes se atraem mutuamente e quando se acham próximos, um sistema adequado inverte o sentido da corrente em alguns, para que sejam repelidos pelos outros. Todos os motores, como também os dínamos, possuem duas partes principais: o «rotor», que é a parte móvel e o «estator» que é a parte fixa. Neste último, encontram-se os enrolamentos para constituir aos eletroímãs, necessários ao funcionamento do motor.



Atividade prática

Aconselha-se a montagem de uma campainha para exemplificação do funcionamento dos eletroímãs conforme circuito em anexo.



Esta aplicação pode ser montada numa prancheta de madeira e neste caso com dois botões de pressão.



Bibliografia

ANGULO, J. M., *Enciclopédia de Electrónica Moderna, Vol. 1*. Madrid. Editorial Paraninfo. (s.d.).

MATIAS, José, *Electricidade, Vol. 2*. Didáctica Editora. (s.d.).

MATIAS, José, *Práticas Laboratoriais de Electrotecnia e Electrónica, 10.º Ano. Curso Tecnológico de Electrotecnia e Electrónica*. Didáctica Editora. (s.d.).

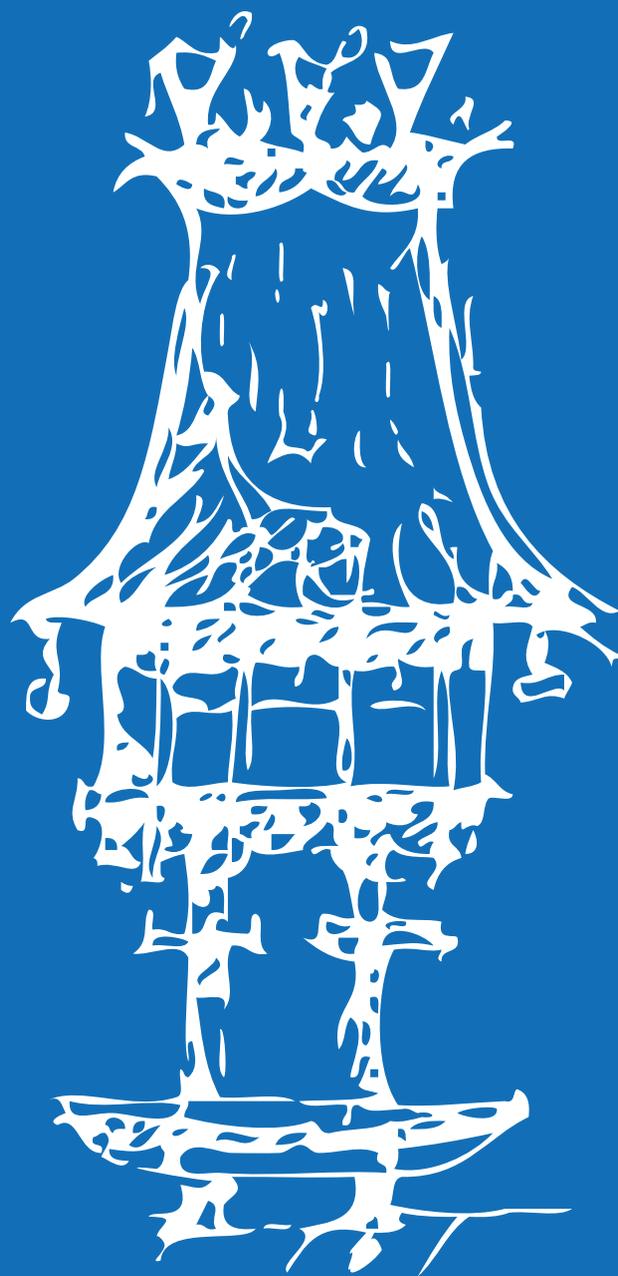
MATIAS, José, *Sistemas Analógicos e Digitais, 10.º Ano, Vol. 1. Curso Tecnológico de Electrotecnia e Electrónica*. Didáctica Editora. (s.d.).

PEREIRA, A. Silva e outros. *Electricidade, 10.º Ano. Curso Tecnológico de Electrotecnia e Electrónica*. Porto Editora. (s.d.).

PEREIRA, A. Silva e outros. *Práticas Laboratoriais de Electrotecnia e Electrónica, 10.º Ano. Curso Tecnológico de Electrotecnia e Electrónica*. Porto Editora. (s.d.).

PEREIRA, A. Silva e outros, *Sistemas Analógicos e Digitais, 10.º Ano. Curso Tecnológico de Electrotecnia e Electrónica*. Porto Editora. (s.d.).







Corrente Alternada Monofásica

Módulo 4

Apresentação

Este módulo tem carácter teórico-prático, por isso deverá decorrer em parte em ambiente laboratorial para que os alunos possa verificar e comprovar os principais efeitos da corrente alternada em cargas resistivas, indutivas e capacitivas.

Esta disciplina tem como intenção tornar o aluno apto a compreender a linguagem e as técnicas utilizadas, possibilitando assim um melhor aproveitamento na sequência dos estudos desta e das outras disciplinas técnicas e também na comunicação adequada com os profissionais da área.

Introdução

A abordagem deste módulo de Corrente Alternada leva-nos a uma melhor compreensão dos vários tipos de aparelhos que incorporam circuitos que utilizam estas características existentes no mercado assim como a melhor escolha deste tipo de equipamentos para que se ajuste às crescentes evoluções disponíveis pelas diversas marcas.

Este módulo requer um conhecimento básico de matemática e física e circuitos eletrónicos básicos.

Objetivos de aprendizagem

- Definir os conceitos de corrente alternada, período, frequência e fase.
- Identificar os diferentes tipos de formas de onda.
- Analisar circuitos com diagramas vetoriais para cargas resistivas capacitivas e indutivas.
- Analisar circuitos RLC série e paralelo, atendendo ao fator de potência, energias ativa e reativa.
- Determinar as potências num circuito.
- Calcular capacidades para compensação do fator de potência.
- Conhecer as principais grandezas do sistema trifásico de tensões.



Âmbito de conteúdos

- Corrente alternada sinusoidal.
- Período, frequência e fase.
- Comportamento do condensador e da bobina em corrente alternada.
- Lei de Ohm para corrente alternada.
- Diagramas vetoriais.
- Circuito RLC série e paralelo; Impedância em circuitos RLC série e paralelo.
- Potência em corrente alternada.
- Compensação do fator de potência.
- Cálculo do somatório das potências em corrente alternada.
- Introdução à corrente alternada trifásica.
- Tensões simples e compostas.



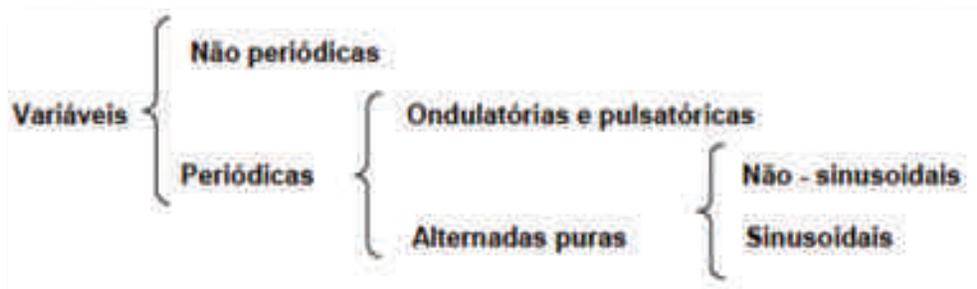
Corrente Alternada

Corrente Alternada versus Corrente Contínua

Desde o início da história da eletricidade que se iniciou a questão da opção entre corrente contínua (CC) e corrente alternada (CA). A partir de 1882, a CA foi adotada para o transporte e distribuição de energia elétrica em larga escala, pelas seguintes razões:

- A elevação e o abaixamento de tensão são mais simples. Para reduzir as perdas energéticas no transporte de energia elétrica é necessário elevar o valor da tensão. Posteriormente, a distribuição dessa energia elétrica aos consumidores, é necessário voltar a baixar essa tensão. Para isso utilizam-se transformadores elevadores e abaixadores de tensão de construção bastante simples e com um bom rendimento. O processo de reduzir e aumentar a tensão em CC é bastante mais complexo, embora comecem a aparecer, hoje em dia, sistemas de eletrónica de potência capazes de executar essa tarefa (embora com limitações de potência).
- Os alternadores (geradores de CA) são mais simples e têm melhor rendimento que os dínamos (geradores de CC).
- Os motores de CA, particularmente os motores de indução são mais simples e têm melhor rendimento que os motores de CC.
- A CA pode transformar-se facilmente em CC por intermédio de sistemas retificadores.

O estudo da energia elétrica que fizemos no módulo anterior assentou nas correntes e tensões contínuas, isto é, nas que mantêm o mesmo sentido (unidirecionais) 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 elétricas podem classificar-se em função do tempo como:



Vamos analisar seguidamente todas as opções:

Grandezas constantes

No gráfico a corrente representada é constante pois não varia ao longo do tempo.

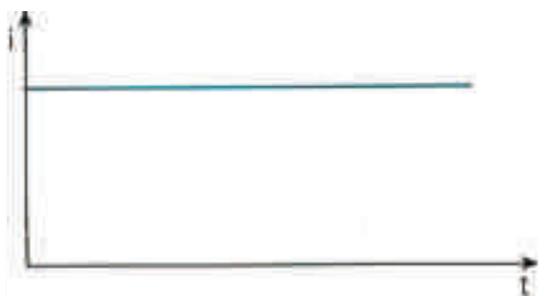


Fig. 1: Corrente constante

Grandezas Variáveis - Não periódicas

A corrente representada possui valores diferentes de instante para instante mas mantém o mesmo sentido.

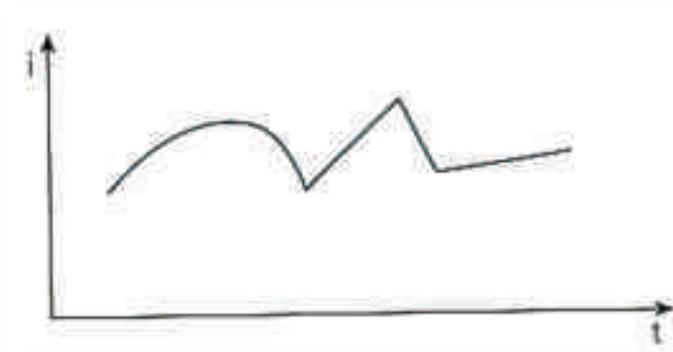


Fig. 2: Corrente variável unidirecional

Grandezas Variáveis - Periódicas

Uma grandeza diz-se periódica quando se verifica uma repetição das suas características ao longo do tempo. No estudo que iremos efetuar, surgir-nos-ão diversas formas de ondas periódicas. Representamos dois tipos de ondas periódicas: ondulatórias ou pulsatórias e as alternadas puras.



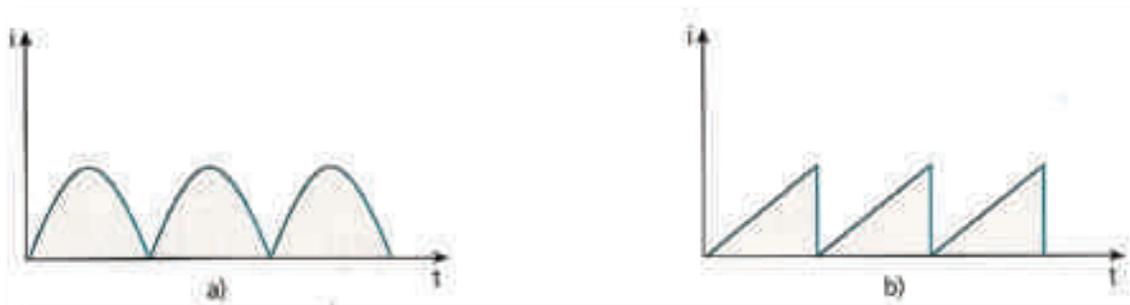


Fig. 3: Corrente ondulatória (a) Corrente unidirecional em dente de serra (b)

As ondas alternadas puras distinguem-se das ondas ondulatórias porque possuem um valor médio algébrico nulo.

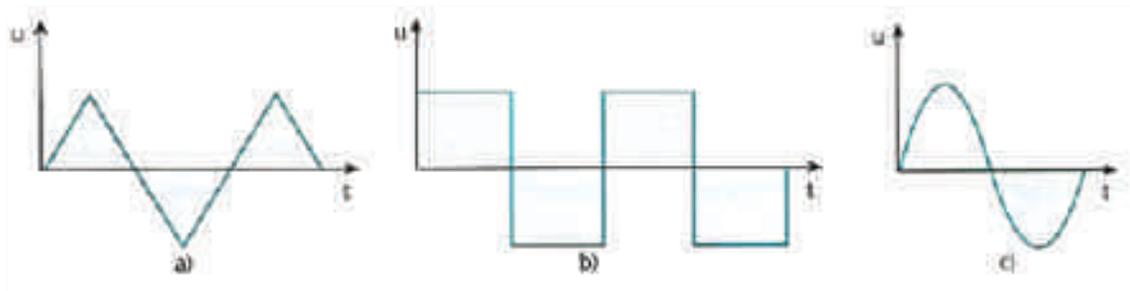


Fig. 4: Tensão alternada triangular (a) Tensão alternada quadrada (b) Corrente sinusoidal (c)

Numa onda alternada pura, o conjunto dos valores assumidos em cada sentido designa-se por alternância ou semionda. 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 ou u .

Iremos agora tratar do estudo de correntes e tensões alternadas sinusoidais. A sua importância na eletrónica 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.



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.

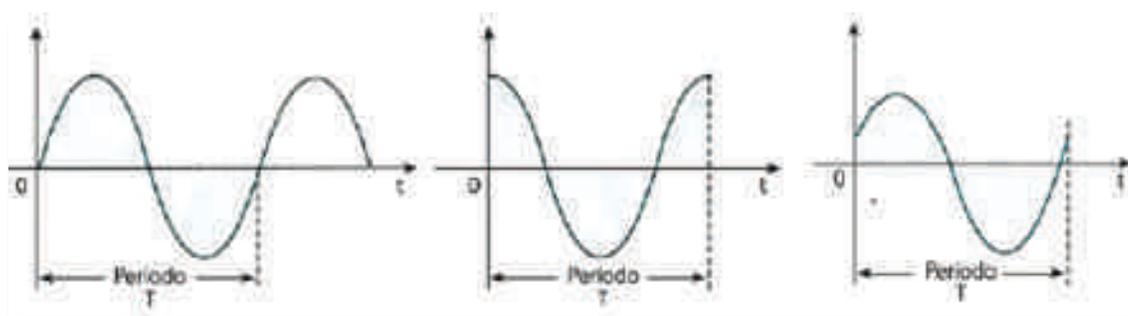


Fig. 5: Período de uma grandeza sinusoidal

Frequência

É o número de ciclos efetuados 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, por exemplo, a energia elétrica é distribuída a 50 Hz, ou seja, apresenta 50 ciclos ou períodos por segundo. A gama das audiod frequências vai de 20 Hz a 20 KHz e comporta o que vulgarmente se designa por eletroacústica. Rádio, televisão, ultra-sons, radar e micro-ondas comportam gamas de frequências que ultrapassam os MHz (Megahertz) e, por vezes, os GHz (Giga Hertz).

Amplitude ou Valor máximo

É o valor instantâneo mais elevado atingido pela grandeza. Há amplitude positiva e amplitude negativa.



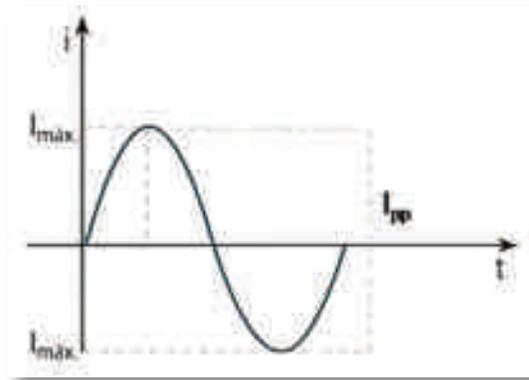


Fig. 6: Representação da amplitude e do valor pico a pico de uma corrente sinusoidal

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:

$$I_{pp} = 2 \times I_{máx}$$

Ou no caso das tensões:

$$U_{pp} = 2 \times U_{máx}$$

Valor médio

Teremos aqui de 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 deve ter para ser transportada a mesma quantidade de eletricidade, num mesmo intervalo de tempo.

A expressão para determinar o valor médio é dado por:

$$I_{med} = \frac{2}{\pi} \times I_{máx}$$

Se resolvermos o quociente $2/\pi$ teremos:

$$I_{med} = 0,637 \times I_{máx}$$



Para o caso das tensões alternadas sinusoidais:

$$U_{med} = \frac{2}{\pi} \times U_{m\acute{a}x} = 0,637 \times U_{m\acute{a}x}$$

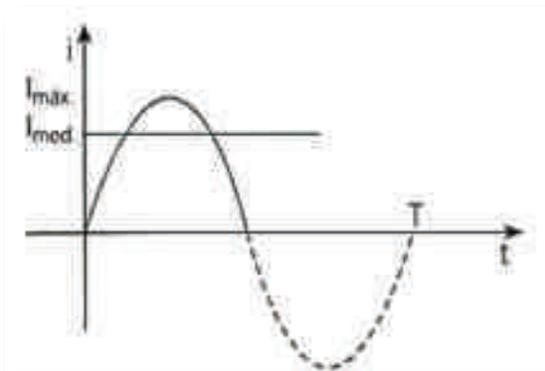


Fig. 7: Valor médio de uma corrente sinusoidal

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:

$$I = \frac{I_{m\acute{a}x}}{\sqrt{2}}$$

Como $1 / \sqrt{2} = 0,707$, virá:

$$I = 0,707 \times I_{m\acute{a}x}$$



$$U = \frac{U_{máx}}{\sqrt{2}} = 0,707 \times U_{máx}$$

Relativamente a tensões alternadas sinusoidais:

Para realçar a importância do valor eficaz, refira-se que são valores eficazes que os voltímetros e amperímetros nos indicam ao medirem grandezas sinusoidais.

Exercício:

1. Considere a tensão sinusoidal representada na figura 8. Determine:

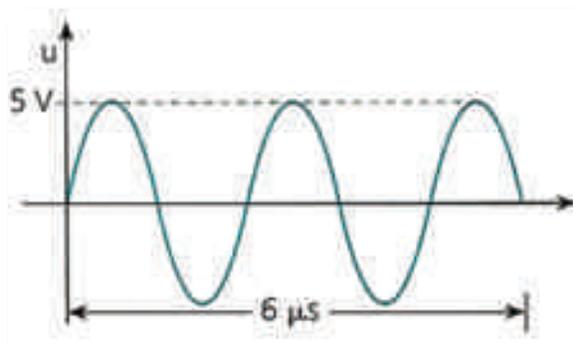


Fig. 8: Tensão sinusoidal em análise

- 1.1. A frequência e o período
- 1.2. O valor médio de uma alternância.
- 1.3. O valor eficaz.
- 1.4. O tempo que a onda demora a atingir o primeiro pico.



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.

$$\omega = 2\pi \times f$$

Exprime-se em rad/s (radianos por segundo).

Podemos agora, definir a equação da onda sinusoidal, assim no caso de uma corrente virá:

$$i = I_{m\acute{a}x} \times \text{sen}(\omega t + \phi)$$

Em que:

i - Valor instantâneo da corrente em Ampere

$I_{m\acute{a}x}$ - 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:

$$u = U_{m\acute{a}x} \times \text{sen}(\omega t + \phi)$$

Em que:

u - Valor instantâneo da tensão em Volts

$U_{m\acute{a}x}$ - Valor máximo da tensão em Volts



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 desfasamento 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:

$$i_1 = I_{1m\acute{a}x} \times \text{sen}.\omega t$$

$$i_2 = I_{2m\acute{a}x} \times \text{sen}.\omega t + \phi$$

Como verificamos, a corrente i_2 está desfasada em relação i_1 a de um ângulo φ ; porque os vetores que representam as correntes sinusoidais rodam no sentido direto, i_2 está avançada em relação a i_1 .

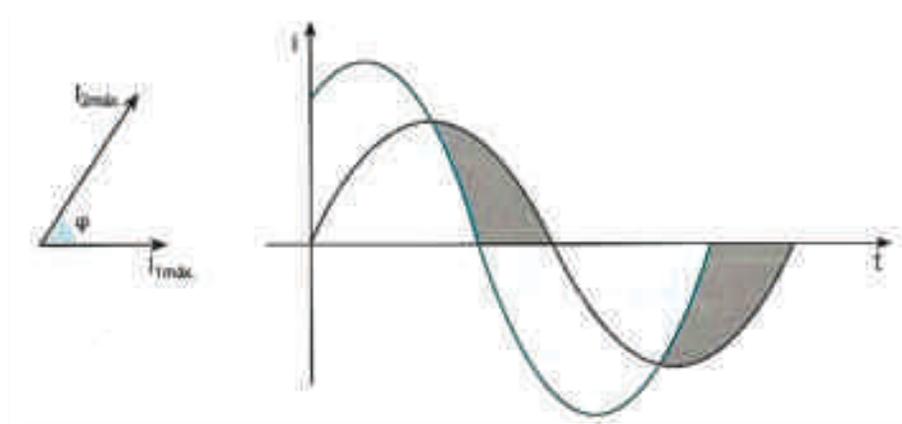


Fig. 9: Representação vetorial e cartesiana de duas correntes sinusoidais

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 desfasamento φ nulo.



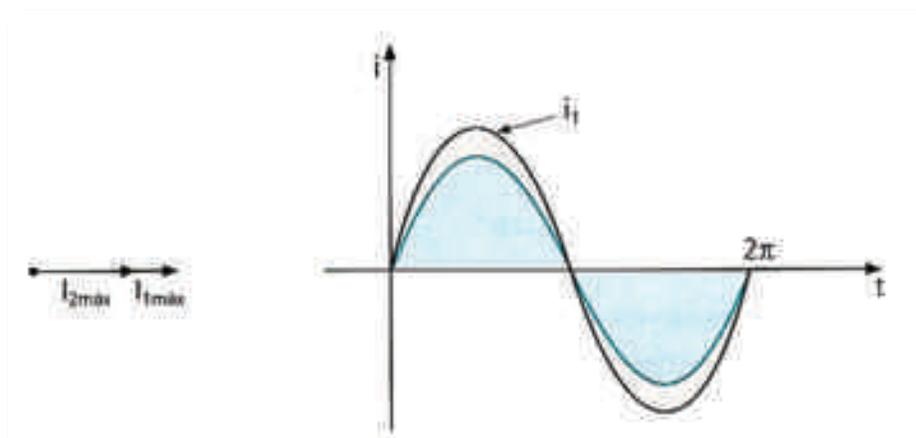


Fig. 10: Representação vetorial e cartesiana de duas correntes em fase

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) representado na figura seguinte, 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 atrasada em relação à 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 $u = 0$.

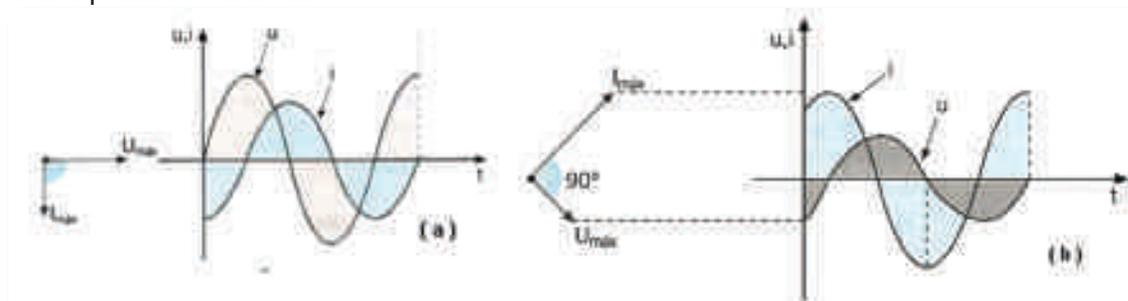


Fig. 11: Representação vetorial e cartesiana de uma tensão e uma corrente sinusoidal em quadratura

3. Grandezas em oposição

Os vetores representativos das grandezas têm a mesma direção mas sentidos opostos. O ângulo de defasamento φ é de 180° .



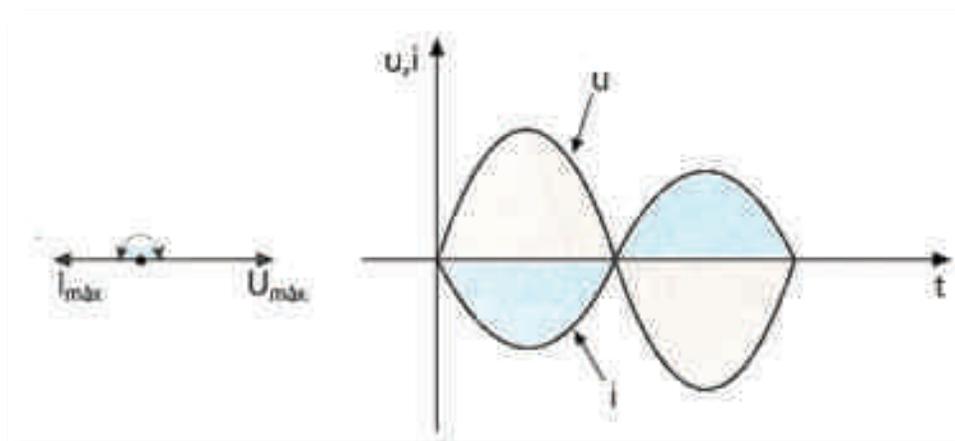


Fig. 12: Representação vetorial e cartesiana de duas correntes em oposição de fase

Exercício:

1. Uma corrente alternada sinusoidal tem a seguinte expressão analítica, calcule:

$$i = 10 \times \text{sen.}(157t + \phi)$$

- 1.1. O valor máximo da corrente.
- 1.2. O valor eficaz da corrente.
- 1.3. O valor da velocidade angular.
- 1.4. A frequência do sinal sinusoidal.



Noção de Impedância

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 chamamos 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.

$$U = Z \times I$$

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:

- $Z \cdot \cos \varphi$ - por resistência R
- $Z \cdot \sin \varphi$ - por reactância X

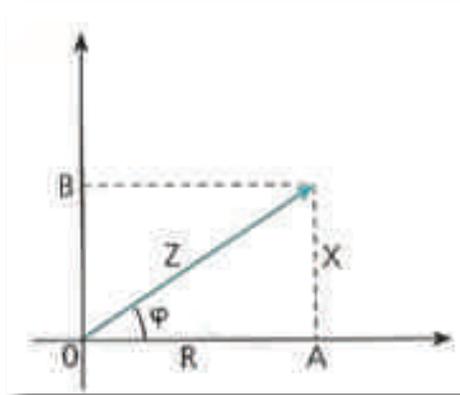


Fig. 13: Representação gráfica da resistência e reactância

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 desprezar-se face aos restantes. É o caso, por exemplo, das lâmpadas de incandescência, que podem, sem grande erro, ser consideradas como resistências puras.

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.

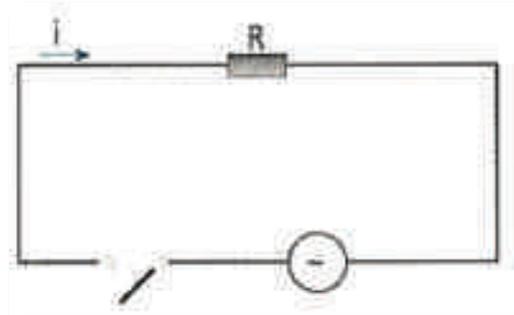


Fig. 14: Resistência pura alimentada em corrente alternada

Logo, as curvas representativas da tensão e corrente estão em fase, ou seja, a um máximo de tensão corresponde um máximo da corrente, o mesmo sucedendo para os zeros.

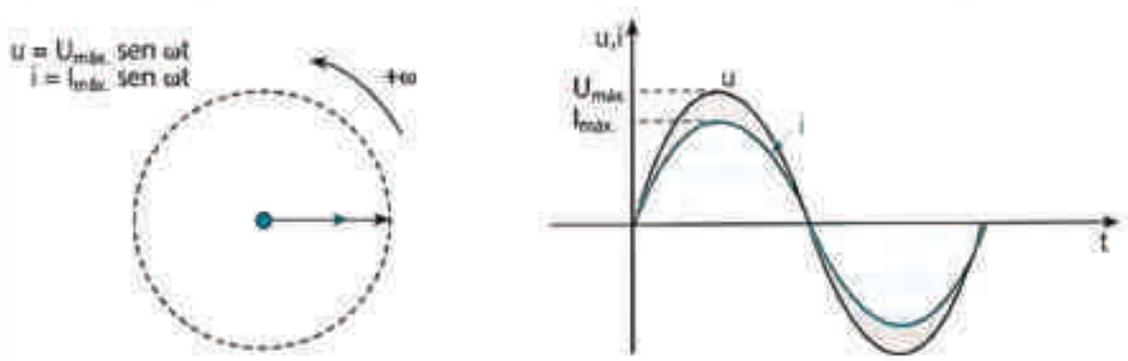


Fig. 15: Representação algébrica, vetorial e cartesiana da tensão e respetiva corrente numa resistência puramente óhmica.



Circuito puramente indutivo

Reactância indutiva.

Neste circuito a oposição à circulação da corrente é feita pela f.e.m. de autoindução 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?

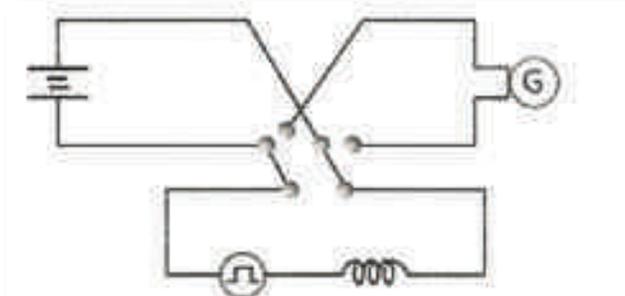


Fig. 15: Bobina alimentada a corrente contínua ou corrente alternada

Quando o interruptor se fecha alimentando 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 16, onde o fecho do interruptor se efetua 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 $t_4 - t_2$.

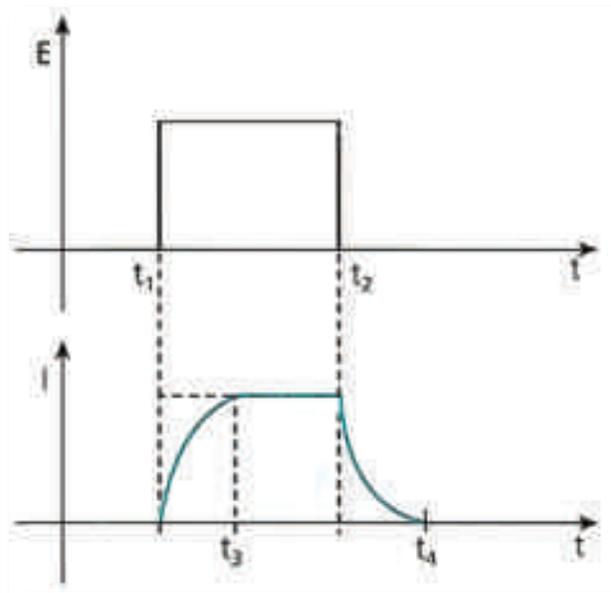


Fig. 16: Forma de onda num circuito puramente alimentado a corrente contínua



Em corrente alternada, os efeitos da autoindução são constantes. Vejamos a que é igual à reactância indutiva.

E dependerá a reactância da frequência?

Como se representa na parte A da figura 17, 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 elétrica.

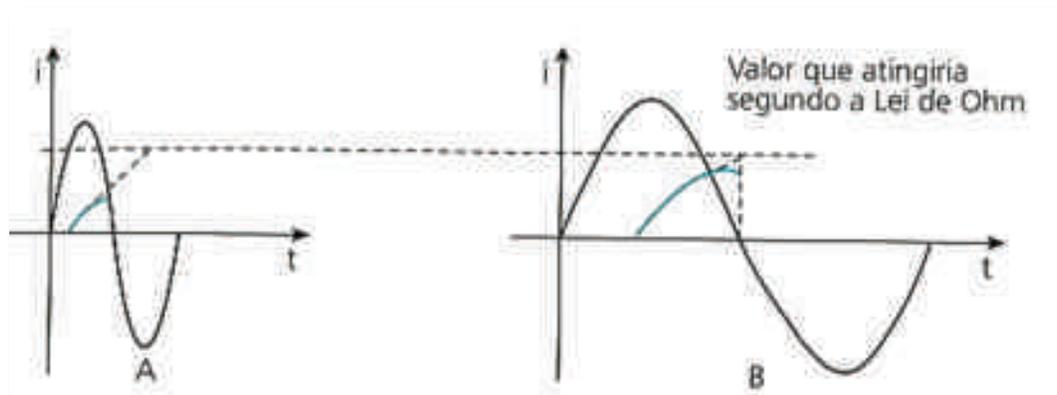


Fig. 17: Gráfico da corrente para tensões aplicadas de diferentes frequências

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 autoindução ou indutância - Henry (H)

ω - Velocidade angular - Radiano por segundo (rad/s)



Ao ser aplicada tensão à bobina, a corrente não surgirá imediatamente pois, como vimos atrás, surgirá no circuito, devido à autoindução, 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 autoindução, 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 desfasamento será de $\pi/2$ radianos ou seja 90° . A corrente está atrasada $T/4$ em relação à tensão.

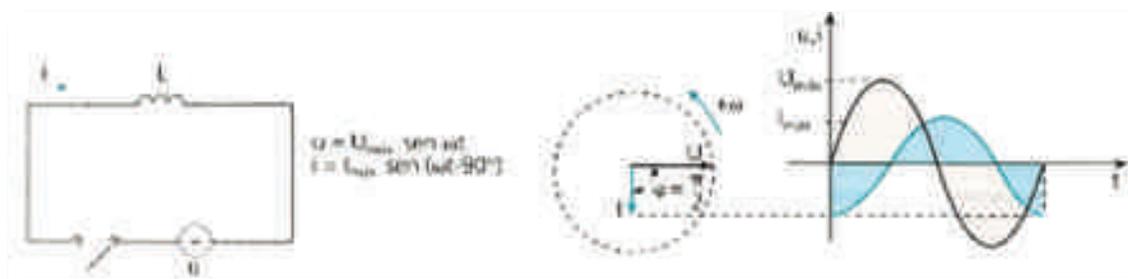


Fig. 18: Circuito puramente indutivo e representação algébrica, vetorial, cartesiana da tensão aplicada e da corrente que o percorre

Exercício:

Uma f.e.m. de 10 V de valor eficaz e 50 Hz de frequência é aplicada a uma bobina de 0.1 H. Determine a reactância indutiva da bobina e a corrente que a percorre.

Circuito puramente capacitivo

Como será o comportamento do condensador ao ser-lhe aplicada uma tensão alternada sinusoidal?

A lâmpada inserida no circuito da figura 19 brilha constantemente. A justificação reside na carga e descarga do condensador, existindo uma corrente no circuito.



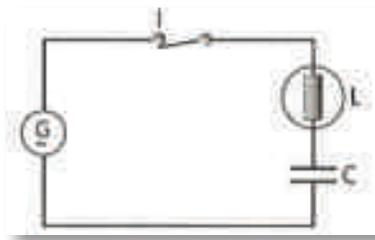


Fig. 19: Condensador alimentado a corrente alternada

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 20, podemos constatar que no circuito com frequência mais elevada, o valor médio da corrente é mais elevado, pois a tensão é invertida antes de a corrente ter 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.

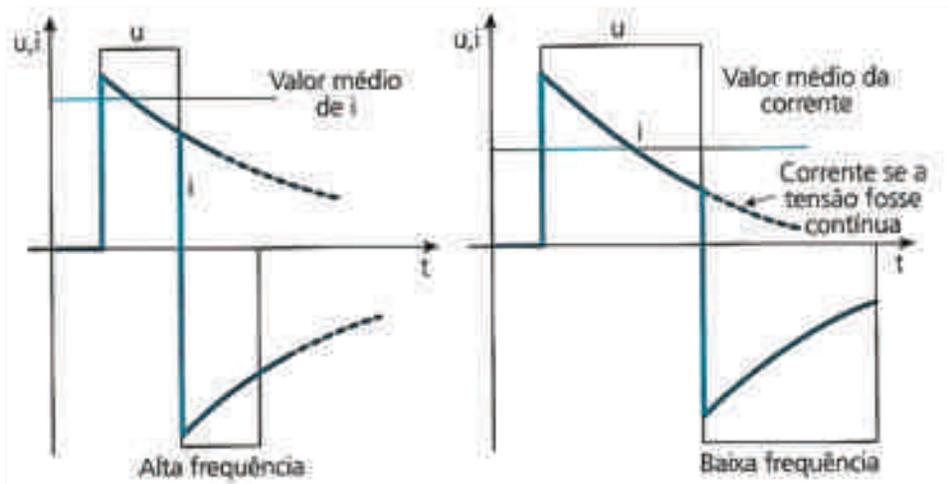


Fig. 20: Resposta de um condensador a uma onda retangular de diferentes frequências

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, 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.

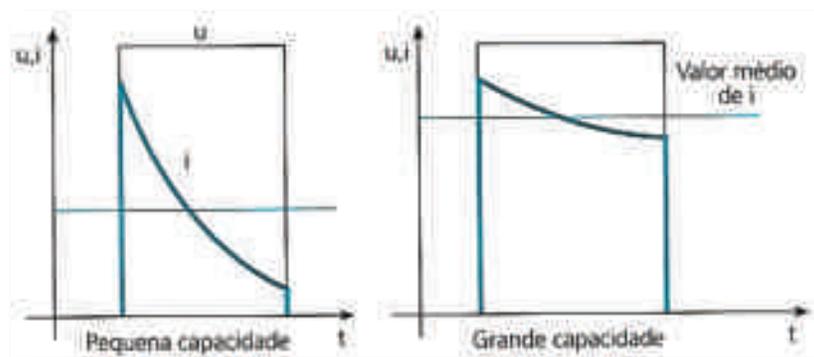


Fig. 21: Valor da corrente num circuito com condensadores de diferentes capacidades

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:

$$X_c = \frac{1}{\omega \cdot C}$$

Em que:

X_c - reactância capacitiva - Ohm (Ω)

f - frequência - Hertz (HZ)

C - Capacidade - Farad (F)

ω - Velocidade angular - Radiano por segundo (rad/s)



Ao iniciar 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 conseqüentemente 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 eletrões, atingindo 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.

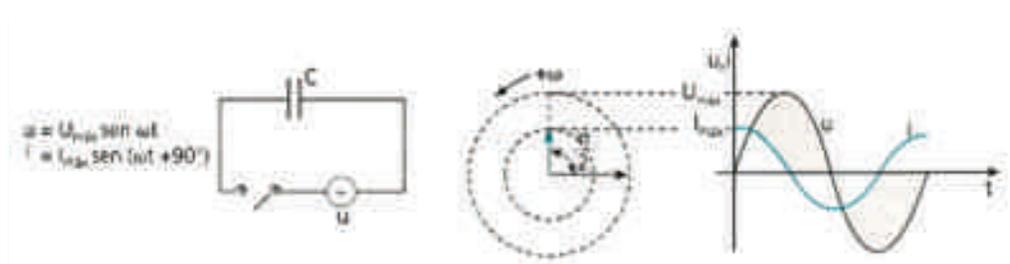


Fig. 22: Circuito puramente capacitivo e representação algébrica, vetorial e cartesiana da tensão aplicada e da corrente que o percorre

Exercício:

1. Calcule a reactância de um condensador de capacidade $1\mu\text{F}$, quando ligado num circuito à frequência de:

- a) 100 Hz
- b) 5000 Hz

2. Que corrente fluiria no circuito em cada um dos casos, se a tensão fosse de 10 V?

Resolução:

1. A reactância capacitiva será,

- a) $X_c = 1 / (\omega \cdot C) = 1 / 2\pi \cdot f \cdot C = 1 / (2\pi \times 100 \times 10^{-6}) \approx 1590 \Omega$
- b) $X_c = 1 / (\omega \cdot C) = 1 / 2\pi \cdot f \cdot C = 1 / (2\pi \times 5000 \times 10^{-6}) \approx 31.8 \Omega$



2.A corrente terá o valor (eficaz) de:

a) $I = E / X_c = 10 / 1590 \approx 6.3 \text{ mA}$

b) $I = E / X_c = 10 / 31.8 \approx 314 \text{ mA}$



Circuitos RL

Será um circuito constituído por uma bobina real que é equivalente a uma bobina pura (ideal) em série com uma resistência.

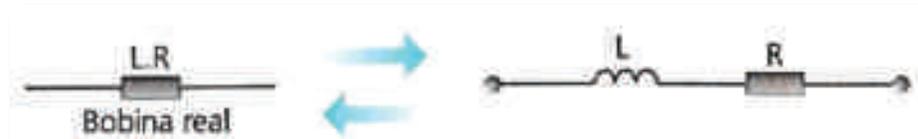


Fig. 23: Bobina real e circuito equivalente

Vejamos como relacionar a tensão com a corrente num circuito série RL.

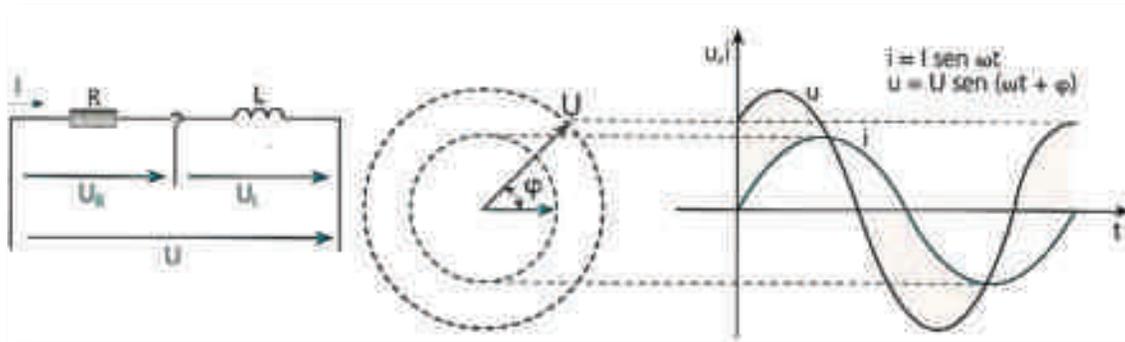


Fig. 24: Representação da tensão e corrente num circuito serie RL

Para determinarmos o ângulo do 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 vetorial 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:

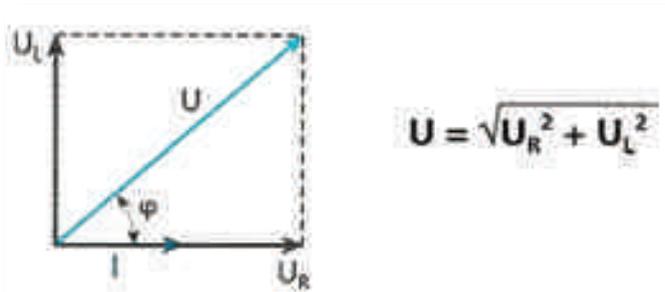


Fig. 25: Diagrama vetorial das tensões e corrente num circuito RL



Do triângulo das tensões podemos obter, dividindo por I ($Z = U / I$) o triângulo das impedâncias:



Fig. 26: Triângulo das tensões e das impedâncias

Poderemos através do triângulo calcular o ângulo de defasamento ϕ :

$$\cos \phi = \text{cateto adjacente} / \text{hipotenusa} \Rightarrow \cos \phi = R / Z \text{ ou de outra forma: } R = Z \cos \phi$$

$$\sin \phi = \text{cateto oposto} / \text{hipotenusa} \Rightarrow \sin \phi = X_L / Z \text{ ou de outra forma: } X_L = Z \sin \phi$$

Exercício:

Uma bobina de indutância 0.1 H e resistência 80Ω é ligada a uma fonte de alimentação de 100 V , 600 Hz . Calcular a impedância do circuito e a corrente fornecida pela fonte. Qual o defasamento entre a tensão e a corrente total?



Circuitos RC

Trata-se de um circuito constituído por um condensador real que é equivalente à série de um condensador ideal e de uma resistência.



Fig. 27: 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.

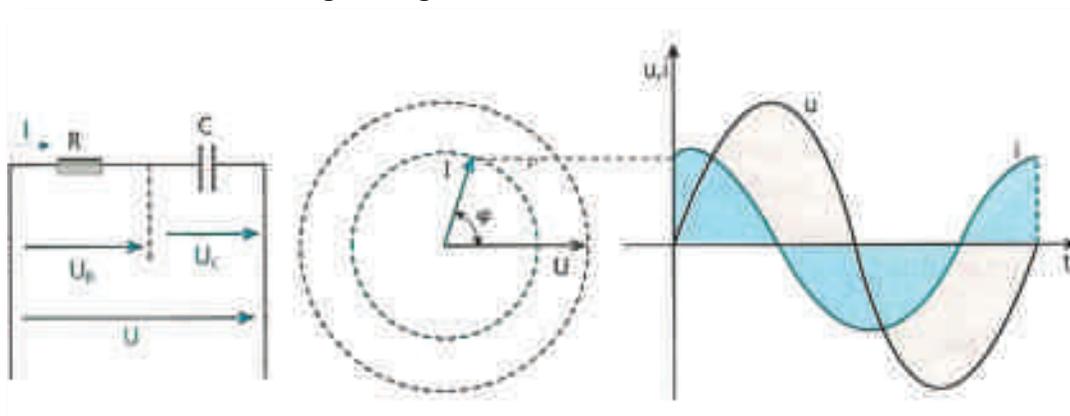


Fig. 28: Representação da tensão e corrente num circuito série RC

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, vetorialmente, estas serem somadas.

Sendo: $U_R = R \cdot I$ e $U_C = X_C \cdot I$

Virá:

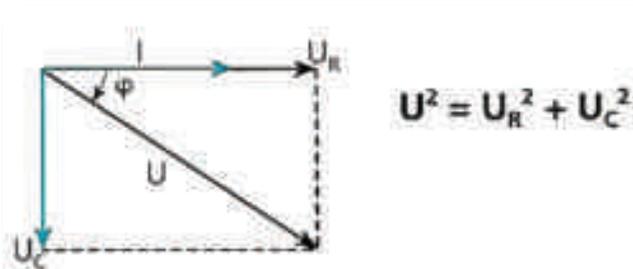


Fig. 29: Diagrama vetorial das tensões e corrente num circuito RC



Se dividirmos o triângulo então obtido pela intensidade teremos o triângulo das impedâncias.

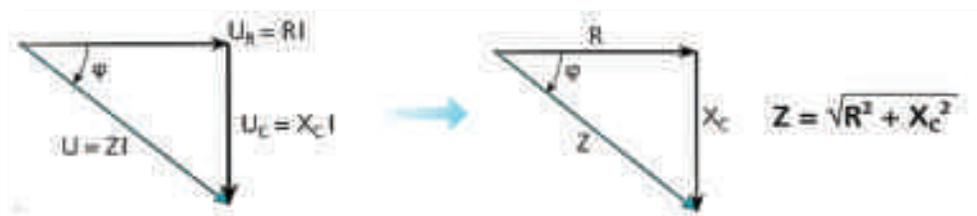


Fig. 30: Triângulo das tensões e das impedâncias

Poderemos ver através do triângulo calcular o ângulo de defasamento ϕ :

$$\cos \phi = \text{cateto adjacente} / \text{hipotenusa} \Rightarrow \cos \phi = R / Z \text{ ou de outra forma: } R = Z \cos \phi$$

$$\sin \phi = \text{cateto oposto} / \text{hipotenusa} \Rightarrow \sin \phi = X_C / Z \text{ ou de outra forma: } X_C = Z \sin \phi$$

Exercício:

1. Liga-se uma resistência de 40Ω em série com um condensador de $50 \mu\text{F}$, ambos alimentados por 110 V . Se a corrente no circuito for de 2 A , qual a frequência da fonte de alimentação?
2. Qual a tensão no condensador e na resistência?



Circuitos RLC

Teremos agora de considerar a série de uma resistência, uma bobina e um condensador, considerados elementos ideais. Como já foi referido, 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 respetiva representação vetorial. Antecipadamente, reconheça-se que $\mathbf{U} \neq \mathbf{U}_R + \mathbf{U}_L + \mathbf{U}_C$. A expressão apenas será validada quando tratarmos de grandezas vetoriais. Virá:

$$\vec{U} = \vec{U}_R + \vec{U}_L + \vec{U}_C$$

Construiremos o diagrama vetorial, partindo do vetor corrente:

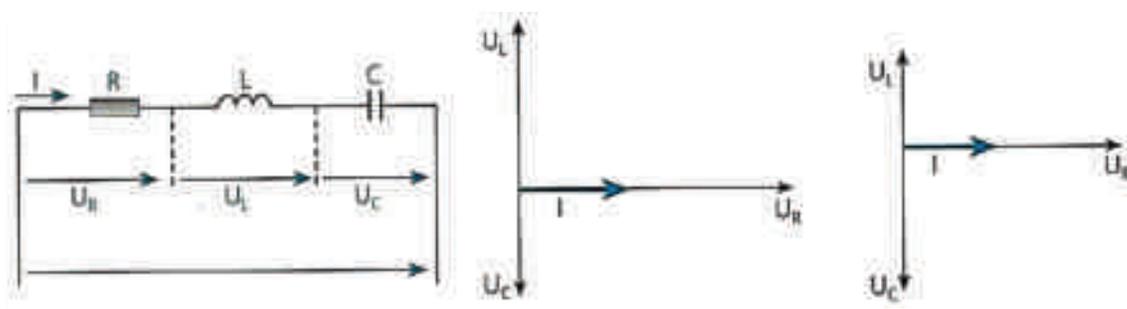


Fig. 31: Representação da tensão e corrente num circuito serie RLC.

As tensões em L e C estão em quadratura com a corrente I, sendo U_L em avanço em relação I (como sabemos dos circuitos puramente indutivos a corrente está em atraso em relação à tensão) e U_C em atraso em relação a I (pois nos circuitos com condensadores ideais a corrente está avançada em relação à tensão).

- Se U_L for dominante face a U_C , teremos um circuito predominantemente indutivo.
- Se U_C for dominante face a U_L , teremos um circuito predominantemente capacitivo.
- Se U_L for igual a U_C então temos um circuito em Ressonância.

Para obtermos o vetor U teremos de proceder como anteriormente, ou seja somar vetorialmente as tensões na resistência, na bobina e no condensador. Por facilidade, efetua-se previamente a soma de $U_L + U_C$ dos vetores equipolentes aplicados à extremidade de U_R . Obteremos:



Circuito puramente indutivo

No circuito puramente indutivo $U_L > U_C$ logo $\varphi > 0$.

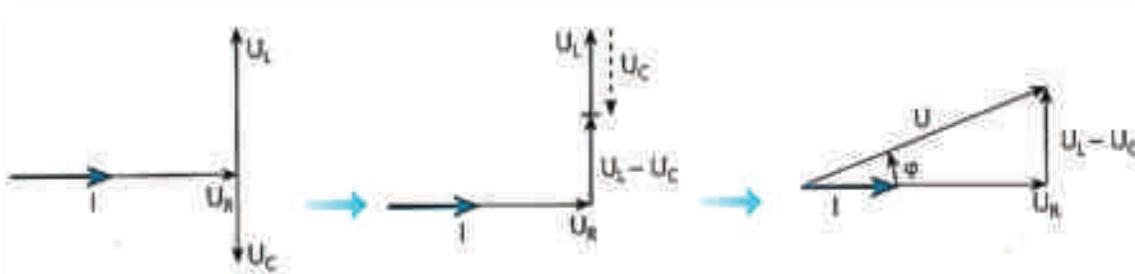


Fig. 32: Obtenção do triângulo das tensões e corrente num circuito puramente indutivo.

Circuito puramente capacitivo

No circuito puramente indutivo $U_L < U_C$ logo $\varphi < 0$.

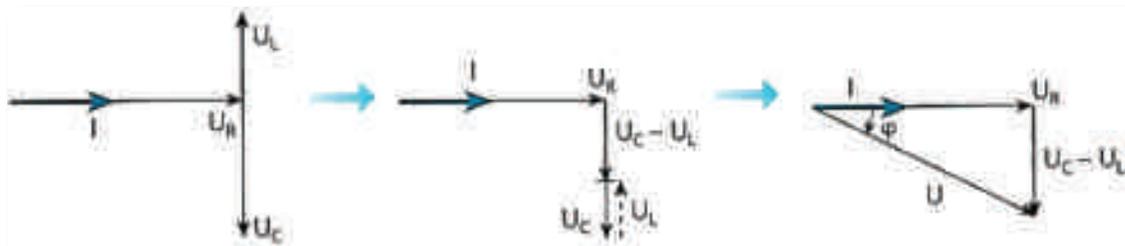


Fig. 33: Obtenção do triângulo das tensões e corrente num circuito puramente capacitivo.

Circuito puramente resistivo

No circuito puramente indutivo $U_L = U_C$ logo $\varphi = 0$, uma vez que se anulam L e C.

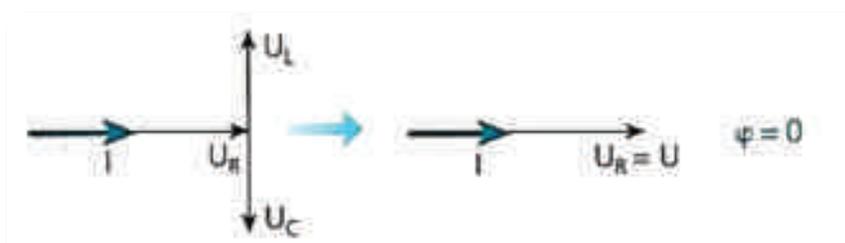


Fig. 34: Diagrama da corrente e tensões num circuito puramente resistivo.

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 $\varphi < 0$.



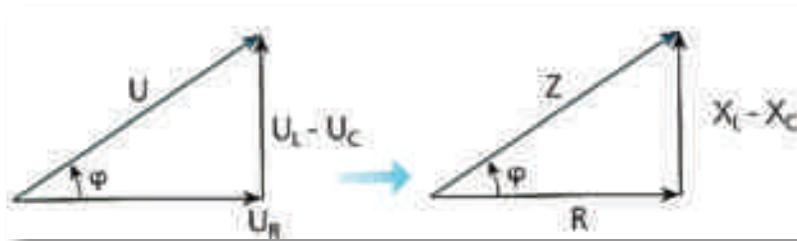


Fig. 35: Obtenção do triângulo das impedâncias num circuito puramente indutivo

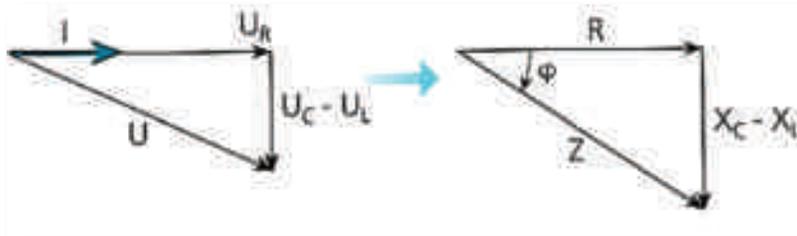


Fig. 35: Obtenção do triângulo das impedâncias num circuito puramente capacitivo

Pela aplicação do teorema de Pitágoras obtemos:

$$Z = \sqrt{R^2 + (X_L + X_C)^2}$$

$\cos \phi = \text{cateto adjacente} / \text{hipotenusa} \Rightarrow \cos \phi = R / Z$ ou de outra forma: $R = Z \cos \phi$

$\sin \phi = \text{cateto oposto} / \text{hipotenusa} \Rightarrow \sin \phi = X / Z$ ou de outra forma: $X = Z \sin \phi$

$\text{tg } \phi = \text{cateto oposto} / \text{cateto adjacente} \Rightarrow \text{tg } \phi = X / R$

Exercício:

1. Considere um circuito RLC série com $R = 100 \Omega$, $L = 0.5 \text{ H}$ e $C = 10 \mu\text{F}$.
 - a) Determine a frequência de ressonância do circuito;
 - b) Calcule U_L e U_C para uma f.e.m. aplicada de 200 V, à frequência de ressonância.



Potência em C.A.

Considerando um circuito indutivo real, fazemos a decomposição do vetor corrente segundo os eixos, obtendo-se os vetores I_r e I_a .



Fig. 36: Componentes ativa e reativa da corrente

O vetor I_a , designa-se por corrente ativa em fase com a tensão U, será igual a:

$$I_a = I \cos \phi$$

O vetor I_r é designado por corrente reativa, estando em quadratura com a tensão U:

$$I_r = I \sin \phi$$

Potência ativa, aparente e reativa

Potência Ativa

É a potência média igual ao produto da tensão pela componente ativa da corrente

$$P = U \cdot I_a = U \cdot I \cdot \cos \phi$$

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-ampere (VA).

É a potência dos circuitos indutivos e capacitivos. A potência ativa nestes circuitos é nula.

Potência Reativa

É o produto da tensão pela componente reativa da corrente.

$$Q = U.I_r = U.I.\text{sen}\phi$$

Representa-se por Q .

A unidade em que é expressa é o volt-ampere reativo (VAR)

A energia oscilante em certo intervalo de tempo é medida pelos contadores de energia reativa.

As três potências relacionam-se vetorialmente, originando um triângulo, designado por triângulo das potências, que também pode ser construído por multiplicação dos lados do triângulo das tensões pela corrente I .

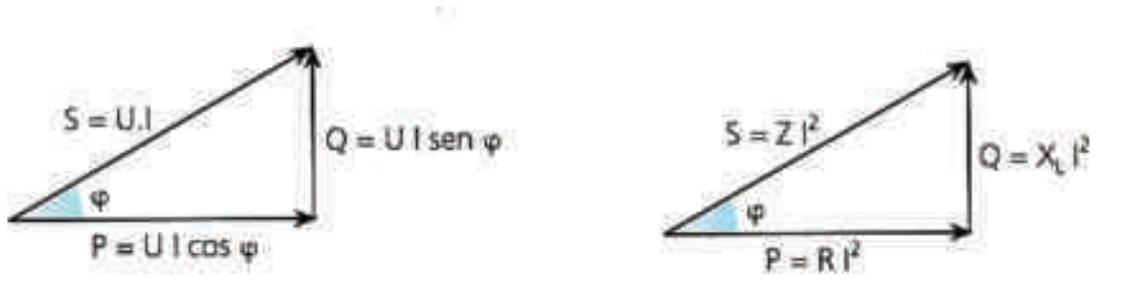


Fig. 37: Triângulo das potências num circuito RL



Fig. 38: Triângulo das potências num circuito RC

Fator de potência

Interessa relacionar a potência ativa 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 fator de potência é o cosseno do ângulo ou seja, $\cos \phi$.

Análise prática do fator de potência.

Problema do fator de potência. Correção do fator de potência.

Nos utilizadores que dispõem de instalações com bobinas, o $\cos \phi$ é reduzido a baixos valores, o que origina um aumento da energia reativa que, apesar de não ser consumida, corresponde a uma corrente de circulação. A corrente nos condutores não é toda aproveitada como seria desejável.

Vejamos um caso concreto:

Imaginemos duas fábricas consumindo a mesma potência de 400 kW a uma tensão de 5 KV, mas com distintos fatores de potência: $\cos \phi$ na fábrica 1 = 1 e $\cos \phi$ 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:

$$P = U.I.\cos \phi$$

Fabrica 1:

$$I_1 = \frac{P_1}{U_1.\cos \phi_1} = \frac{400}{5 \times 1} = 80A$$

Fabrica 2:

$$I_2 = \frac{P_2}{U_2.\cos \phi_2} = \frac{400}{5 \times 0,5} = 160A$$

A segunda instalação, para a mesma potência, precisa 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 reativa que circula, para o que se instalam contadores de energia reativa. Quanto aos utilizadores, também é conveniente disporem de um elevado fator de potência porque, se tal não suceder, terão de sobredimensionar aparelhagem de manobra e proteção, o que equivale a maiores custos.

Como resolver o problema?

A solução consiste em colocar em paralelo com o recetor, um condensador que absorva uma corrente I_c de grandeza igual à componente reativa da corrente I_r de modo a anularem-se. O conjunto fica puramente ohmico, ou seja, $\cos \phi = 1$, sendo nula a potencia reactiva.

Quando existem vários recetores, a compensação poderá ser efetuar-se individualmente, por grupos ou para toda a instalação.

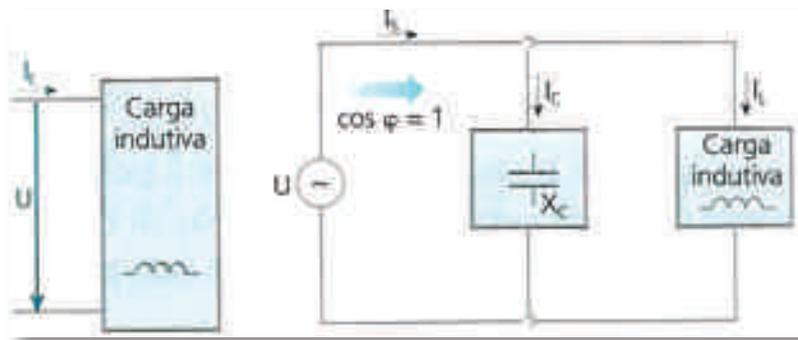


Fig. 39: Compensação do fator de potência

Exercício:

1. Dois motores M1 e M2 estão ligados em paralelo sob uma tensão de 220V, 50Hz. Sabendo as correntes que estes absorvem e os respetivos fatores de potência:

$$I_1 = 20 \text{ A}, \cos \phi_1 = 0.8$$

$$I_2 = 30 \text{ A}, \cos \phi_2 = 0.7$$

Calcule a corrente total e o fator de potência total.



Solução:

Sabemos que:

$$P1 = U.I1.\cos F1 = 220 \times 20 \times 0.8 = 3.52 \text{ KW}$$

$$P2 = U.I2.\cos F2 = 220 \times 30 \times 0.7 = 4.62 \text{ KW}$$

$$Q1 = P1.tg \phi 1 = 3.52 \times 103 \times 0.75 = 2.64 \text{ KVAr}$$

$$Q2 = P2.tg \phi 2 = 4.62 \times 103 \times 1.02 = 4.71 \text{ KVAr}$$

As potências totais do conjunto dos dois motores serão:

$$P = P1 + P2 = 3.52 + 4.62 = 8.14 \text{ KW}$$

$$Q = Q1 + Q2 = 2.64 + 4.71 = 7.35 \text{ KVAr}$$

Podemos determinar a potência aparente S, através de

$$S = \sqrt{(P2 + Q2)} = \sqrt{(8.142 + 7.352)} \approx 10.97 \text{ KVA}$$

O módulo da corrente total será:

$$I = S / U = 10970 / 220 \approx 48.86 \text{ A}$$

O fator de potência do conjunto é:

$$\cos \phi = P / S = 8.14 / 10.97 = 0.74$$

2. Considere duas fábricas que consomem a mesma potência ativa $P = 1 \text{ MW}$ com idêntica tensão $U = 10 \text{ KV}$, mas com fatores de potência diferentes: $\cos \phi_1 = 1$ e $\cos \phi_2 = 0.4$.



Introdução aos sistemas trifásicos

Comparação entre os sistemas trifásicos e os sistemas monofásicos

Apresentam-se a seguir algumas vantagens dos sistemas trifásicos em relação aos monofásicos, relativamente à 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.m. induzidas.
- O somatório da secção dos condutores necessários para transformar 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 tração eléctrica industrial.
- A partir de um sistema trifásico podem obter-se três sistemas monofásicos (tal como em nossas casas).

Produção - Alternador Trifásico

Descrevemos anteriormente a produção de corrente alternada sinusoidal por meio de um alternador. Na realidade, 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.



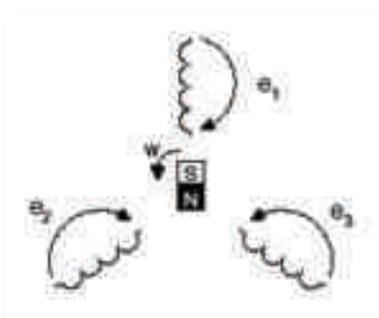


Fig. 40: Produção de três f.e.m. por meio de um alternador trifásico

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.m. (tensões) podem representar-se graficamente tal como na figura seguinte:

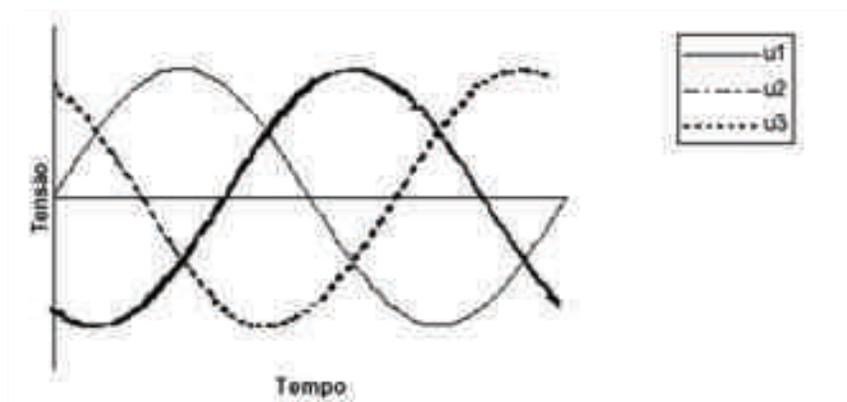


Fig. 41: Tensão num sistema trifásico

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 vetorialmente.



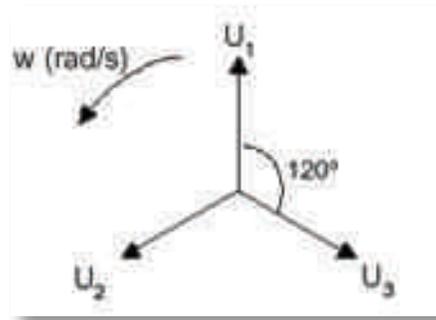


Fig. 42: Vetores tensão num sistema trifásico

Sistema Equilibrado

Consideremos as três bobinas do alternador atrás descrito, a alimentarem três recetores idênticos (resistências, neste caso), um em cada fase.

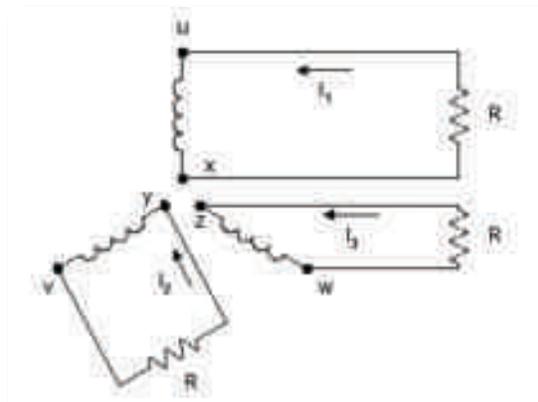


Fig. 43: Alimentação independente de três recetores idênticos

Para alimentar independentemente três recetores, é portanto necessário utilizar seis fios. Se os três recetores 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° .

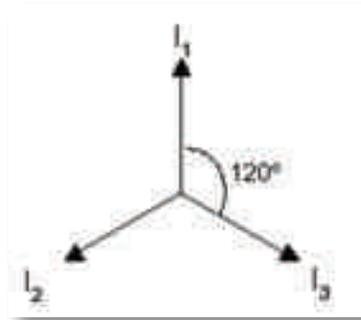


Fig. 44: Vetores de corrente num sistema trifásico equilibrado



Diz-se então que o sistema está equilibrado, pois a soma das três correntes é sempre nula (a soma de três vetores iguais e desfasados de 120° é um vetor nulo).

Condutor Neutro

Se reunirmos os três terminais x, y, z, num único ponto N, chamado de ponto neutro e substituímos os três condutores de retorno (vindos dos recetores) por um único condutor - condutor neutro (ou fio neutro), a corrente nesse condutor será nula.

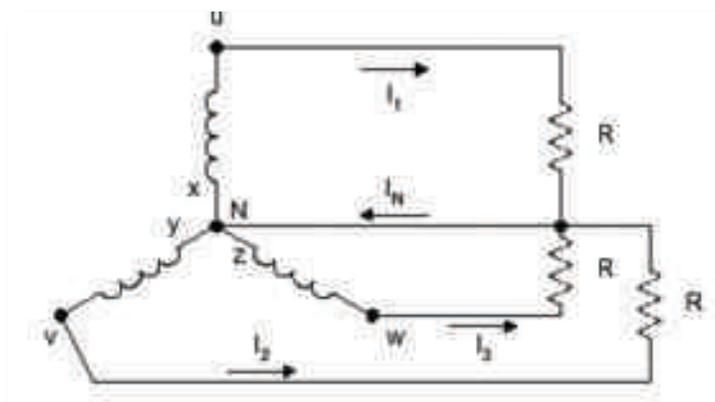


Fig. 45: Sistema equilibrado de cargas com neutro (corrente no neutro é nula)

Pode desta forma distribuir-se a energia elétrica por meio de quatro condutores, sendo três designados por condutores de fase (ativos) ou simplesmente fases, em linguagem corrente. As três fases representam-se, habitualmente, pelas letras R, S e T. O condutor de neutro está normalmente ligado à terra, pelo que se encontra no potencial zero.

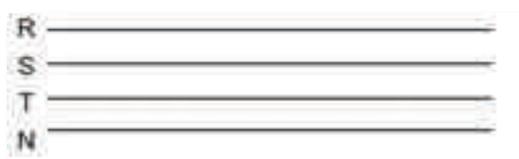


Fig. 46: Transporte de energia elétrica trifásica por meio de quatro condutores

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:

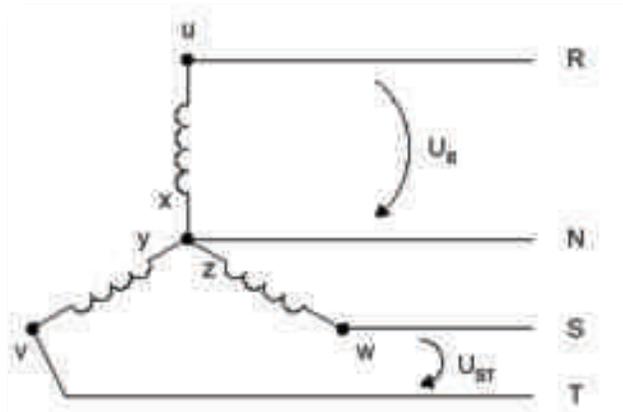


Fig. 47: Tensões simples e compostas

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 vetoriais:

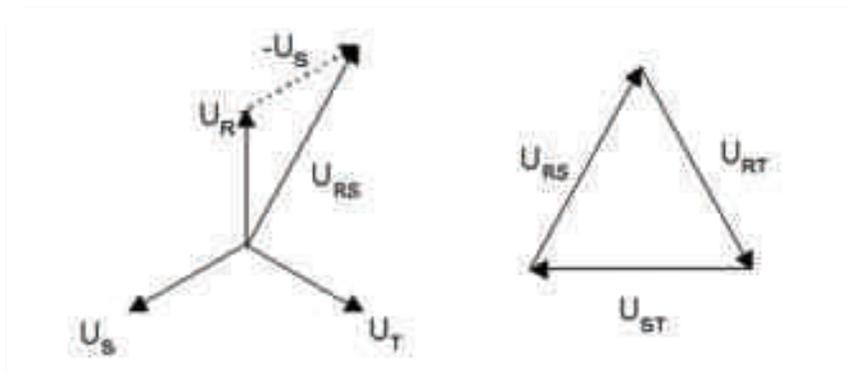


Fig. 48: Representação vetorial das tensões simples e compostas

Demonstra-se que o comprimento dos vetores das tensões compostas é $\sqrt{3}$ vezes superior ao das tensões simples, ou seja:

De facto, para as redes de distribuição de baixa tensão, temos que:

$$U_C = \sqrt{3} U_S$$

$$U_S \approx 230V \quad e \quad U_C = \sqrt{3} \cdot 230 \approx 400V$$

Nas redes de distribuição, normalmente, indicam-se as tensões do modo: 230/400 V.

Nas redes de transporte de alta e média tensão, apenas se indica o valor das tensões compostas. Assim, quando é indicado que uma linha tem tensões de 220kV ou 30kV, são os valores eficazes de tensões compostas.

Ligação de Recetores Trifásicos - Triângulo e Estrela

Os recetores trifásicos são formados por três elementos elétricos (bobinas, resistências, etc.) que podem ser ligados de duas maneiras:

- Em estrela - Y
- Em triângulo - Δ

Na ligação de recetores em estrela poderão ocorrer dois casos:

- Os recetores têm a mesma impedância - sistema equilibrado.
- Os recetores 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 alterações do funcionamento dos recetores, já que a sua corrente é sempre nula. De facto, cada uma das linhas de fase faz de retorno em relação às outras duas.

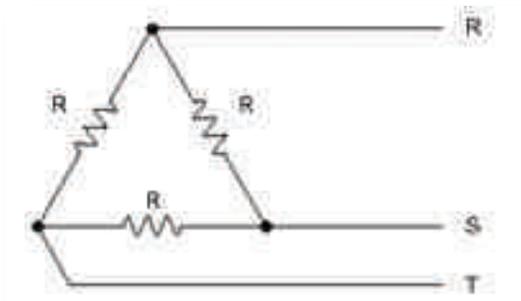
Há motores trifásicos cujas bobinas estão ligadas em estrela. Assim, poder-se-ia (idealmente) alimentar o motor apenas com as três fases, dispensando-se o neutro.

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, uma vez que, se faltar uma fase (por corte de um dispositivo de proteção, por exemplo) estabelece-se um desequilíbrio de tensões. Um exemplo de um recetor trifásico desequilibrado e ligado em estrela é o fogão elétrico. Estes têm diversas resistências para o forno e para os discos. Estas resistências estão distribuídas pelas três fases, mas não têm todo 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 utilização de um condutor de menor secção, para as mesmas perdas energéticas. É por isso que o condutor de neutro é normalmente mais fino do que os condutores de fase (caso das linhas de transporte de energia elétrica com neutro).

Na ligação de recetores em triângulo, os recetores estão ligados entre as fases, tal como mostra a figura seguinte, para o caso de resistências:

Fig. 49: Ligação de recetores em triângulo
Tal como na ligação de recetores em estrela, na ligação em triângulo poderão ocorrer dois casos:



- Os recetores têm a mesma impedância - sistema equilibrado.
- Os recetores têm a impedâncias diferentes - sistema desequilibrado.

A corrente num recetor (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 determinados em termos vetoriais, 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 recetores (monofásicos) funcionam independentemente uns dos outros.

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 ativas aritmeticamente de forma a obter a potência total:

$$P = P_R + P_S + P_T$$

As potências reativas 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:

$$P = \sqrt{3} \cdot U_c \cdot I_L \cdot \cos \phi \text{ que corresponde à potência ativa.}$$

$$Q = \sqrt{3} \cdot U_c \cdot I_L \cdot \sin \phi \text{ que corresponde à potência reativa.}$$

$$S = \sqrt{3} \cdot U_c \cdot I_L \text{ que corresponde à potência aparente.}$$



em que:

U_c - Tensão composta (entre duas fases)

I_L - Corrente nas linhas

Exercícios:

1. Os elementos aquecedores de um forno, ligados em triângulo, absorvem uma corrente nas linhas de 20 A. Determine:

- A potência do forno sabendo que a tensão na rede é 230/400 V
- A intensidade que percorre cada elemento

2. Um motor trifásico tem as seguintes características nominais indicadas na chapa:

Potência útil - 15 Cv

Tensão - 400 V

Fator de potência - 0.75

Intensidade na linha - 24 A

Determine o rendimento do motor.

3. Três resistências de 23 W estão ligadas numa rede trifásica de 230/400 V. Calcule a potência absorvida quando estão ligadas em estrela e em triângulo.



Bibliografia

ANGULO, J. M., *Enciclopédia de Electrónica Moderna, Vol. 1*. Madrid. Editorial Paraninfo. (s.d.).

MATIAS, José, *Electricidade, Vol. 2*. Didáctica Editora. (s.d.).

MATIAS, José, *Práticas Laboratoriais de Electrotecnia e Electrónica, 10.º Ano. Curso Tecnológico de Electrotecnia e Electrónica*. Didáctica Editora. (s.d.).

MATIAS, José, *Sistemas Analógicos e Digitais, 10.º Ano, Vol. 1. Curso Tecnológico de Electrotecnia e Electrónica*. Didáctica Editora. (s.d.).

PEREIRA, A. Silva e outros. *Electricidade, 10.º Ano. Curso Tecnológico de Electrotecnia e Electrónica*. Porto Editora. (s.d.).

PEREIRA, A. Silva e outros. *Práticas Laboratoriais de Electrotecnia e Electrónica, 10.º Ano. Curso Tecnológico de Electrotecnia e Electrónica*. Porto Editora. (s.d.).

PEREIRA, A. Silva e outros, *Sistemas Analógicos e Digitais, 10.º Ano. Curso Tecnológico de Electrotecnia e Electrónica*. Porto Editora. (s.d.).



