



Eletricidade

José Abílio Lima de Freitas

Marcos Daniel Zancan



Santa Maria - RS
2011

Presidência da República Federativa do Brasil

Ministério da Educação

Secretaria de Educação a Distância

© Colégio Técnico Industrial de Santa Maria

Este Material Didático foi elaborado pelo Colégio Técnico Industrial de Santa Maria para o Sistema Escola Técnica Aberta do Brasil – e-Tec Brasil.

Comissão de Acompanhamento e Validação - Colégio Técnico Industrial de Santa Maria/CTISM

Coordenador Institucional

Paulo Roberto Colusso/CTISM

Professor-autor

José Abílio Lima de Freitas/CTISM

Marcos Daniel Zancan/CTISM

Coordenação Técnica

Iza Neuza Teixeira Bohrer/CTISM

Coordenação de Design

Erika Goellner/CTISM

Revisão Pedagógica

Andressa Rosemárie de Menezes Costa/CTISM

Francine Netto Martins Tadielo/CTISM

Marcia Migliore Freo/CTISM

Revisão Textual

Daiane Siveris/CTISM

Lourdes Maria Grotto de Moura/CTISM

Vera da Silva Oliveira/CTISM

Diagramação e Ilustração

Gustavo Schwendler/CTISM

Leandro Felipe Aguiar Freitas/CTISM

Maíra Rodrigues/CTISM

Marcel Santos Jacques/CTISM

Máuren Fernandes Massia/CTISM

Rafael Cavalli Viapiana/CTISM

Ricardo Antunes Machado/CTISM

Ficha catalográfica elaborada por Denise B. dos Santos – CRB 10/1456
Biblioteca Central – UFSM

F866e Freitas, José Abílio de.
Eletricidade / José Abílio Lima de Freitas, Marcos Daniel Zancan.
– 3. ed. – Santa Maria : Universidade Federal de Santa Maria :
Colégio Técnico Industrial de Santa Maria, 2010.
118 p. : il.

1. Eletricidade. 2. Eletrostática. 3. Eletrodinâmica. 4. Capacitores.
5. Magnetismo. 6. Eletromagnetismo. 7. Corrente Alternada. 8.
Sistemas trifásicos. 9. Fator de potência. I. Zancan, Marcos Daniel.
II. Título.

CDU 537

Apresentação e-Tec Brasil

Prezado estudante,

Bem-vindo ao e-Tec Brasil!

Você faz parte de uma rede nacional pública de ensino, a Escola Técnica Aberta do Brasil, instituída pelo Decreto nº 6.301, de 12 de dezembro 2007, com o objetivo de democratizar o acesso ao ensino técnico público, na modalidade a distância. O programa é resultado de uma parceria entre o Ministério da Educação, por meio das Secretarias de Educação a Distância (SEED) e de Educação Profissional e Tecnológica (SETEC), as universidades e escolas técnicas estaduais e federais.

A educação a distância no nosso país, de dimensões continentais e grande diversidade regional e cultural, longe de distanciar, aproxima as pessoas ao garantir acesso à educação de qualidade, e promover o fortalecimento da formação de jovens moradores de regiões distantes dos grandes centros geograficamente ou economicamente.

O e-Tec Brasil leva os cursos técnicos a locais distantes das instituições de ensino e para a periferia das grandes cidades, incentivando os jovens a concluir o ensino médio. Os cursos são ofertados pelas instituições públicas de ensino e o atendimento ao estudante é realizado em escolas-polo integrantes das redes públicas municipais e estaduais.

O Ministério da Educação, as instituições públicas de ensino técnico, seus servidores técnicos e professores acreditam que uma educação profissional qualificada – integradora do ensino médio e educação técnica, – é capaz de promover o cidadão com capacidades para produzir, mas também com autonomia diante das diferentes dimensões da realidade: cultural, social, familiar, esportiva, política e ética.

Nós acreditamos em você!

Desejamos sucesso na sua formação profissional!

Ministério da Educação
Janeiro de 2010

Nosso contato
etecbrasil@mec.gov.br



Indicação de ícones

Os ícones são elementos gráficos utilizados para ampliar as formas de linguagem e facilitar a organização e a leitura hipertextual.



Atenção: indica pontos de maior relevância no texto.



Saiba mais: oferece novas informações que enriquecem o assunto ou “curiosidades” e notícias recentes relacionadas ao tema estudado.



Glossário: indica a definição de um termo, palavra ou expressão utilizada no texto.



Mídias integradas: sempre que se desejar que os estudantes desenvolvam atividades empregando diferentes mídias: vídeos, filmes, jornais, ambiente AVEA e outras.



Atividades de aprendizagem: apresenta atividades em diferentes níveis de aprendizagem para que o estudante possa realizá-las e conferir o seu domínio do tema estudado.



Sumário

Palavra do professor-autor	11
Apresentação da disciplina	13
Projeto instrucional	15
Aula 1 – Eletrostática	17
1.1 Histórico	17
1.2 Teoria eletrônica da matéria	17
1.3 Princípios da eletrostática	19
1.4 Processos de eletrização	19
1.5 Leis de <i>Coulomb</i>	21
1.6 Campo elétrico	22
1.7 Potencial elétrico	23
1.8 Equilíbrio eletrostático	24
1.9 Descargas atmosféricas	24
1.10 Para-raios	25
1.11 Gaiola de <i>Faraday</i>	26
Aula 2 – Eletrodinâmica	29
2.1 Grandezas fundamentais do circuito elétrico	29
2.2 1ª Lei de <i>Ohm</i>	32
2.3 2ª Lei de <i>Ohm</i>	33
2.4 Densidade de corrente elétrica	34
2.5 Elementos de um circuito elétrico	34
2.6 Associação de resistores	35
2.7 Circuitos elétricos	39
2.8 Potência e energia elétrica	40
2.9 Lei de <i>Joule</i>	40
Aula 3 – Capacitores	43
3.1 Capacitância elétrica de um condutor	43
3.2 Capacitores	44
3.3 Associação de capacitores	48

Aula 4 – Magnetismo	51
4.1 Histórico	51
4.2 Ímãs	52
4.3 Materiais magnéticos e não magnéticos	54
4.4 Processos de magnetização	54
4.5 Classificação dos materiais magnéticos	55
4.6 Lei de <i>Coulomb</i>	55
4.7 Fluxo magnético [ϕ (Wb)]	56
4.8 Indução magnética [B (T)]	56
4.9 Intensidade magnética [H (A/m)]	56
4.10 Permeabilidade magnética [μ (T.m/A)]	56
4.11 Relutância [\mathfrak{R} (A/Wb)]	57
4.12 Ponto <i>Curie</i>	57
4.13 Curva de histerese magnética	57
Aula 5 – Eletromagnetismo	59
5.1 Histórico	59
5.2 Campo magnético criado por corrente elétrica	60
5.3 Circuitos magnéticos	64
5.4 Força magnética	65
5.5 Indutância de uma bobina	71
5.6 Força eletromotriz autoinduzida (<i>femai</i>)	71
5.7 Correntes de <i>Foucault</i>	73
5.8 Transformador	73
Aula 6 – Corrente alternada	75
6.1 Energia elétrica	76
6.2 Gerador de corrente alternada	76
6.3 Definições em corrente alternada	78
6.4 Formas de representação de grandezas senoidais	81
6.5 Tipos de cargas em circuitos CA	83
6.6 Impedância	89
6.7 Potências e energias em circuitos CA monofásicos	91

Aula 7 – Correção do fator de potência	95
7.1 Causas do baixo FP	95
7.2 Consequências do baixo FP	96
7.3 Medição do FP	96
7.4 Métodos de correção do FP	97
7.5 Vantagens da correção do FP	98
7.6 Tipos de correção com capacitores	99
7.7 Dimensionamento dos capacitores	102
Aula 8 – Sistema trifásico	105
8.1 Sistema monofásico	105
8.2 Sistema trifásico	107
8.3 Ligações estrela e triângulo	109
8.4 Etapas do sistema elétrico de potência	112
8.5 Potências em circuitos trifásicos	114
Referências	117
Currículo do professor-autor	118



Palavra do professor-autor

O rápido avanço tecnológico evidenciado nas últimas décadas, especialmente a partir da segunda guerra mundial, tem proporcionado uma constante modernização industrial, resultando em um aumento contínuo da produção, bem como na melhoria da qualidade de vida da população. Entretanto, essa evolução tem exigido uma demanda crescente de energia, em especial a modalidade elétrica.

Dessa forma, a eletricidade constitui-se numa das modalidades energéticas mais utilizadas no mundo moderno, tanto nos setores residencial, comercial, industrial e na prestação de serviços, através dos mais diversos equipamentos eletroeletrônicos empregados nestes setores.

O objetivo principal desta disciplina é oportunizar aos alunos de cursos técnicos da área industrial e tecnológica conhecimentos sobre os princípios e fundamentos que regem os circuitos elétricos em corrente contínua e alternada, constituindo-se numa disciplina base para as disciplinas específicas dos referidos cursos. Esta disciplina de Eletricidade está dividida em oito aulas, cujas temáticas se relacionam no projeto instrucional.

Parabenizamos sua escolha por esta área promissora e de inovação constante, salientando nossa confiança em seu potencial, bem como a certeza de que caminharemos juntos na construção e/ou aprimoramento de sua qualificação profissional.

José Abílio Lima de Freitas
e Marcos Daniel Zancan



Apresentação da disciplina

A energia, muito além de insumo produtivo, é grandeza fundamental para a existência e manutenção da vida. Todas as nossas atividades diárias envolvem energia, desde o simples ato de respirar, até a execução de tarefas mais pesadas. Fisicamente, energia é a capacidade de realizar trabalho. Entende-se por trabalho um processo de transformação. Assim, o princípio da conservação de energia define que **“a energia não pode ser criada nem destruída, somente transformada”**. Em função das transformações que sofrer, a energia pode se apresentar sob as mais diferentes formas.

Desde os primórdios, o homem utiliza a energia química dos alimentos para a manutenção de suas funções vitais, bem como na realização de trabalho através de seus músculos. Em busca da sobrevivência, o homem evoluiu e foi descobrindo outras formas de energia disponíveis no planeta, utilizando-as em seu benefício, atendendo assim as suas necessidades. Estas fontes de energia obtidas diretamente da natureza são denominadas fontes primárias, podendo ser fósseis (carvão, petróleo, gás natural) e não fósseis (hidráulica, eólica, solar, biomassa, nuclear). As fontes secundárias (gasolina, diesel, álcool, eletricidade) são aquelas obtidas a partir de fontes primárias, através de um processo de transformação.

As fontes primárias de energia classificam-se em não renováveis e renováveis. Consideram-se fontes não renováveis aquelas passíveis de se esgotarem devido à elevada velocidade de utilização em relação ao tempo necessário para sua formação, tais como os derivados de petróleo, combustíveis radioativos, gás natural, etc. Já as fontes renováveis são aquelas cuja reposição pela natureza é mais rápida que a sua utilização, tais como a energia solar, hidráulica, eólica e a biomassa, desde que com correto manejo.

Tendo em vista o princípio da conservação de energia, no caso da maioria das fontes renováveis, a reposição ocorre através da transferência de energia do sol para a terra, diretamente (solar) ou indiretamente, através dos diversos processos naturais que a energia solar desencadeia, tais como o ciclo hidrológico, o processo de fotossíntese, a formação de ventos, etc. Baseado neste mesmo princípio, conclui-se que as fontes primárias fósseis armazenam energia oriunda

do sol. Dessa forma, direta ou indiretamente, a energia solar está presente em praticamente todas as formas de energia disponíveis no planeta.

Entretanto, em sua utilização final, tanto a energia de fontes primárias como secundárias precisa ser transformada, de forma a atender diretamente às necessidades da sociedade. Assim, através de processos e equipamentos de conversão, é possível fornecer à sociedade calor, luz, movimento, som, imagem, etc.

No atual estágio de desenvolvimento, a modalidade elétrica de energia ocupa lugar de destaque na matriz energética brasileira e mundial, em função do consumo atual e da crescente demanda por parte da sociedade. Isso se deve principalmente à versatilidade da energia elétrica, transformando-se facilmente em outras modalidades energéticas, bem como pelo fácil transporte e menores perdas em seus processos de geração, transmissão e distribuição.

Assim, o estudo desta modalidade energética denominada Eletricidade constitui-se num pré-requisito fundamental para a formação técnica na área industrial.

Projeto instrucional

Disciplina: Eletricidade (carga horária: 60h).

Ementa: Eletrostática, Eletrodinâmica, Capacitores, Magnetismo, Eletromagnetismo, Corrente alternada, Correção do fator de potência e Sistema trifásico.

AULA	OBJETIVOS DE APRENDIZAGEM	MATERIAIS	CARGA HORÁRIA (horas)
1. Eletrostática	Reconhecer, através do histórico da eletricidade, a importância da pesquisa científica para a evolução tecnológica, especialmente relacionada à energia elétrica. Compreender os fenômenos eletrostáticos e suas aplicações. Empregar a nomenclatura técnica no estudo e na interpretação da eletricidade.	Ambiente virtual: plataforma <i>moodle</i> ; Apostila didática; Recursos de apoio: links, exercícios.	07
2. Eletrodinâmica	Conhecer, compreender e aplicar as grandezas fundamentais dos circuitos elétricos. Relacionar as grandezas fundamentais dos circuitos elétricos através da aplicação das Leis de <i>Ohm</i> . Compreender e aplicar os elementos que compõem um circuito elétrico.	Ambiente virtual: plataforma <i>moodle</i> ; Apostila didática; Recursos de apoio: links, exercícios.	08
3. Capacitores	Compreender o funcionamento básico dos capacitores, bem como suas características e propriedades. Estudar a forma de armazenamento de energia, bem como os processos de carga e descarga dos capacitores. Compreender e aplicar a associação de capacitores e os seus efeitos no circuito elétrico.	Ambiente virtual: plataforma <i>moodle</i> ; Apostila didática; Recursos de apoio: links, exercícios.	07
4. Magnetismo	Reconhecer através da história, a importância do magnetismo para a eletricidade. Caracterizar e aplicar propriedades de um ímã. Caracterizar e aplicar as grandezas magnéticas.	Ambiente virtual: plataforma <i>moodle</i> ; Apostila didática; Recursos de apoio: links, exercícios.	07
5. Eletromagnetismo	Estabelecer a relação entre eletricidade e magnetismo, compreendendo, dessa forma, o eletromagnetismo. Compreender e aplicar as Leis de <i>Faraday</i> e de <i>Lenz</i> . Entender a magnitude e o comportamento dos campos magnéticos e suas influências nos circuitos elétricos.	Ambiente virtual: plataforma <i>moodle</i> ; Apostila didática; Recursos de apoio: links, exercícios.	08

AULA	OBJETIVOS DE APRENDIZAGEM	MATERIAIS	CARGA HORÁRIA (horas)
6. Corrente alternada	<p>Reconhecer as vantagens da energia elétrica diante de outras modalidades energéticas, identificando as suas formas de geração.</p> <p>Reconhecer as vantagens dos sistemas elétricos em CA, bem como compreender os fenômenos eletromagnéticos que os envolvem.</p> <p>Analisar e interpretar circuitos elétricos monofásicos em CA, diferenciando as formas de representação das grandezas elétricas.</p> <p>Empregar a nomenclatura técnica no estudo e interpretação da eletricidade em CA.</p>	<p>Ambiente virtual: plataforma <i>moodle</i>;</p> <p>Apostila didática;</p> <p>Recursos de apoio: links, exercícios.</p>	08
7. Correção do fator de potência	<p>Reconhecer as causas e consequências do baixo fator de potência.</p> <p>Reconhecer as vantagens da correção do fator de potência, aplicando técnicas para a sua correção.</p> <p>Dimensionar bancos de capacitores para correção do fator de potência.</p>	<p>Ambiente virtual: plataforma <i>moodle</i>;</p> <p>Apostila didática;</p> <p>Recursos de apoio: links, exercícios.</p>	07
8. Sistema trifásico	<p>Reconhecer as características e vantagens do sistema trifásico.</p> <p>Diferenciar e aplicar as ligações estrela e triângulo em circuitos trifásicos.</p> <p>Conhecer as etapas de um sistema elétrico de potência.</p> <p>Diferenciar e determinar as potências em circuitos trifásicos.</p>	<p>Ambiente virtual: plataforma <i>moodle</i>;</p> <p>Apostila didática;</p> <p>Recursos de apoio: links, exercícios.</p>	08

Aula 1 – Eletrostática

Objetivos

Reconhecer, através do histórico da eletricidade, a importância da pesquisa científica para a evolução tecnológica, especialmente relacionada à energia elétrica.

Compreender os fenômenos eletrostáticos e suas aplicações.

Empregar a nomenclatura técnica no estudo e na interpretação da eletricidade.

O termo eletrostática refere-se à eletricidade estática, isto é, cargas elétricas em repouso. Os fenômenos eletrostáticos constituem a base para o estudo da eletricidade que permite entender a sua natureza e sua presença no nosso dia a dia. Dessa forma, esta aula abordará o histórico da eletricidade, os fenômenos e princípios físicos relacionados às cargas elétricas em repouso e suas manifestações na natureza.



1.1 Histórico

Os fenômenos da eletricidade eram conhecidos desde a antiguidade, porém sem aplicabilidade. No século VII a.C., Tales, na cidade de Mileto – Grécia – observou que uma substância chamada âmbar, quando atritada, adquiria a propriedade de atrair outros corpos. Âmbar, em grego, significa *elektron*, motivo pelo qual os fenômenos daí originados denominam-se fenômenos elétricos, e a ciência que os estuda denomina-se eletricidade.



Histórico da eletricidade:
<http://www.mundociencia.com.br/fisica/eletricidade/historiaeletricidade.htm>

1.2 Teoria eletrônica da matéria

1.2.1 Matéria e substância

Aquilo que constitui todos os corpos e pode ser percebido por qualquer dos nossos sentidos é **matéria**. A madeira de que é feita a mesa e o vidro de que se faz o bulbo de uma lâmpada é matéria. Dessa forma, percebemos que o nome matéria se relaciona com uma variedade grande de coisas. Cada tipo

particular de matéria é uma **substância**, e, portanto, existem milhares de substâncias diferentes.

1.2.2 Moléculas e átomos

Qualquer substância é formada por partículas muito pequenas e invisíveis, mesmo com auxílio de microscópios, chamada **moléculas**. A molécula é a menor parte em que se pode dividir uma substância, e que apresenta todas as suas características. Por exemplo, uma molécula de água é a menor quantidade de água que pode existir. As moléculas são constituídas por átomos. O número de **átomos** que compõem uma molécula varia de acordo com a substância; numa molécula de água (H_2O), por exemplo, encontramos três átomos.

1.2.3 Carga elétrica (Q)

Existem dois tipos de cargas elétricas na natureza, convencionalmente chamadas de cargas positivas e de cargas negativas. Os portadores de cargas elétricas são partículas elementares, em particular, aquelas que constituem os átomos: elétrons e prótons.

Os átomos são compostos de um núcleo e de uma coroa eletrônica, conforme mostra a Figura 1.1. O núcleo contém os prótons e os nêutrons, enquanto a coroa eletrônica contém os elétrons. Os prótons têm carga positiva, os elétrons têm carga negativa e os nêutrons não tem carga.

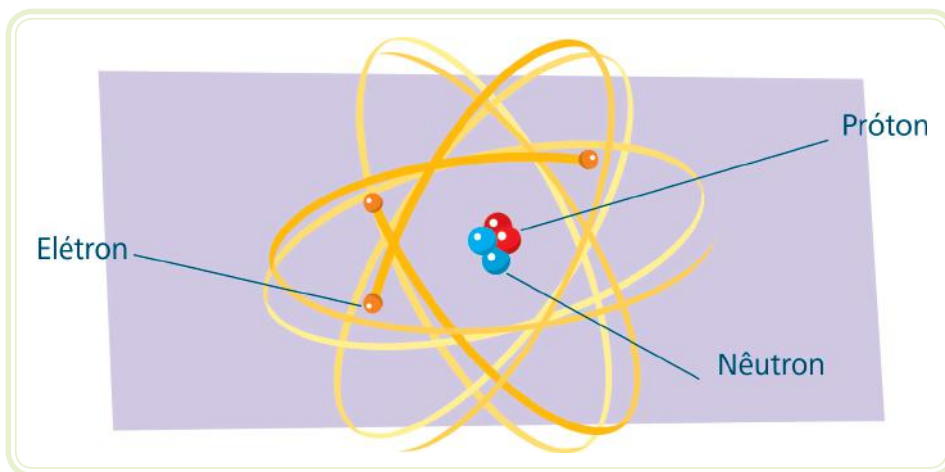


Figura 1.1: Estrutura do átomo

Fonte: CTISM



Assista ao vídeo sobre substâncias, moléculas e átomos:
<http://br.youtube.com/watch?v=W5gE09xX618>



O átomo:
<http://pt.wikipedia.org/wiki/%C3%81tomo>

Os elétrons e os prótons têm a menor carga elétrica conhecida, chamada carga elementar e é representada por e cujo valor é de $1,6 \cdot 10^{-19}$ *Coulombs*. Numericamente, a carga elétrica de um próton é igual à de um elétron, mas com efeitos elétricos opostos. Existem átomos onde o número de elétrons é igual ao número de prótons, sendo conhecidos como átomos eletricamente neutros, ou seja, são átomos em equilíbrio elétrico. Existem outros onde o número de prótons é diferente do número de elétrons, estes denominados íons.

1.2.4 Condutores e isolantes

Em todos os átomos existe uma força de atração entre prótons e elétrons que mantém a órbita dos elétrons em torno do núcleo. Entretanto, existem átomos cujos elétrons estão firmemente ligados às suas órbitas e outros com condições de se deslocarem de uma órbita para outras. Os primeiros elétrons denominamos elétrons presos e os outros elétrons livres.

Os elétrons livres existem em grande número nos materiais chamados **bons condutores** de eletricidade e não existem, ou praticamente não existem, nos chamados **isolantes**. É essa particularidade que permite a distinção entre essas duas categorias de materiais. Como exemplos de materiais bons condutores, podemos citar o ouro, a prata, o cobre, o alumínio, o ferro e o mercúrio. A madeira, o vidro, a porcelana, o papel e a borracha classificam-se como isolantes.



Condutores e isolantes:
http://pt.wikipedia.org/wiki/Isolante_el%C3%A9trico

1.3 Princípios da eletrostática

1.3.1 Princípios da atração e repulsão

Da observação experimental pode-se obter a chamada Lei de *DuFay*:

“Corpos eletrizados com cargas de mesmo sinal **repelem-se**. Corpos eletrizados com cargas de sinais contrários **atraem-se**”.

1.3.2 Princípio da conservação de cargas elétricas

Num sistema eletricamente isolado, a soma algébrica das cargas elétricas permanece constante. Um sistema eletricamente isolado é um conjunto de corpos que não troca cargas elétricas com o meio exterior.

1.4 Processos de eletrização

1.4.1 Eletrização por atrito

Sempre que dois corpos distintos (de substâncias diferentes), inicialmente neutros, são atritados entre si, ambos se eletrizam, com cargas numericamente iguais, mas de sinais opostos, conforme Figura 1.2. A explicação deste fenômeno é que, durante o atrito, a quantidade de elétrons trocados entre os corpos é diferente.



Assista um filme sobre eletrização por atrito:
<http://br.youtube.com/watch?v=rDwGI9LwaLM>

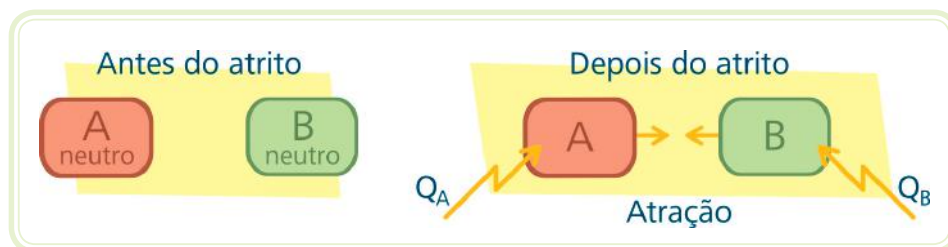


Figura 1.2: Eletrização por atrito

Fonte: CTISM

Após o atrito, os corpos A e B ficam eletrizados com cargas de mesmo valor absoluto, mas de sinais opostos. Observe que $Q_B = -Q_A$ e que $Q_{TOTAL} = 0$.

1.4.2 Eletrização por contato

Consiste em eletrizar um corpo inicialmente neutro com outro corpo previamente eletrizado. Na Figura 1.3, o corpo B está neutro, enquanto que o corpo A está carregado positivamente.

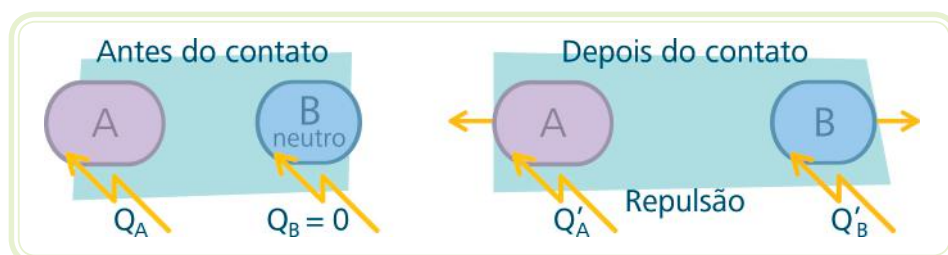


Figura 1.3: Eletrização por contato

Fonte: CTISM

Antes do contato, o corpo A estava com falta de elétrons e o corpo B estava neutro ($Q_B = 0$). Durante o contato, o corpo A atraiu elétrons de B, absorvendo-os. Note que o princípio da conservação de cargas é observado:

$$Q_A + Q_B = Q'_A + Q'_B$$

1.4.3 Eletrização por indução

Denomina-se eletrização por indução o processo onde, havendo uma simples aproximação (sem contato) de um condutor eletrizado A (indutor) com um condutor neutro B (induzido), ocorra no induzido uma separação de cargas, ficando uma região positiva, uma região negativa e uma região neutra, porém sem a alteração da carga total do induzido, conforme mostra a Figura 1.4.



Assista um vídeo sobre os riscos da eletricidade estática num posto de gasolina:
<http://br.youtube.com/watch?v=QOSqTQtZThc>

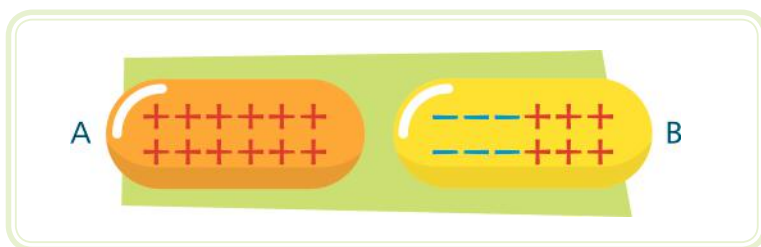


Figura 1.4: Eletrização por indução

Fonte: CTISM

1.5 Leis de *Coulomb*

O estudo correto das forças que se manifestam entre as cargas elétricas foi feito experimentalmente por Charles Augustin Coulomb. Segundo Coulomb, a intensidade da força de atração ou repulsão entre duas cargas elétricas

- É diretamente proporcional à quantidade de carga de cada corpo e, portanto, ao seu produto.
- É inversamente proporcional ao quadrado da distância entre as cargas.
- Depende do meio onde estão colocadas as cargas.



Processos de eletrização:

<http://efisica.if.usp.br/eletricidade/basico/fenomenos/eletrizacao>

Conforme a Figura 1.5, matematicamente temos:

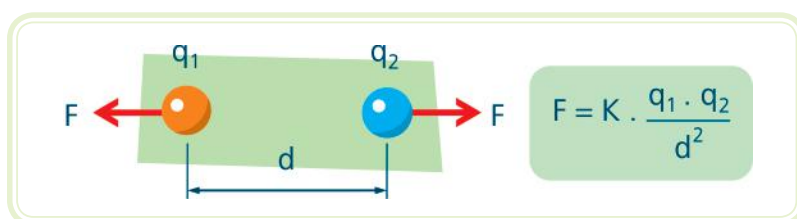


Figura 1.5: Lei de *Coulomb*

Fonte: CTISM

Onde:

F: intensidade da força de atração ou repulsão [unidade *Newton* (N)]

K: constante eletrostática (seu valor depende do meio e do sistema de unidades utilizado)

q₁ e **q₂**: módulos das cargas puntiformes [unidade *Coulomb* (C)]

d: distância entre as cargas [unidade metro (m)]



Campo elétrico:
[http://educar.sc.usp.br/
licenciatura/1999/wtexto1.html](http://educar.sc.usp.br/licenciatura/1999/wtexto1.html)

1.6 Campo elétrico

Campo elétrico é a região do espaço ao redor de uma carga elétrica, em que esta exerce efeitos eletrostáticos. A carga geradora do campo é denominada **carga fonte (Q)**. Uma carga de valor pequeno (que não altere o campo da carga fonte) usada para detectar o campo gerado é denominada **carga de prova (q)**.

A equação fundamental do campo elétrico expressa a força (F) sofrida pela carga de prova (q) no referido campo elétrico da carga fonte (Q) e é dada por:

$$\vec{F} = \vec{E} \cdot q$$

O campo elétrico é uma grandeza vetorial, possuindo módulo, direção e sentido, conforme a Figura 1.6 descritos a seguir:

Módulo:

$$E = K \cdot \frac{Q}{d^2} \quad (\text{unidade N/C})$$

Direção: Reta que une a carga de prova à carga fonte.

Sentido: Depende do sinal da carga fonte.

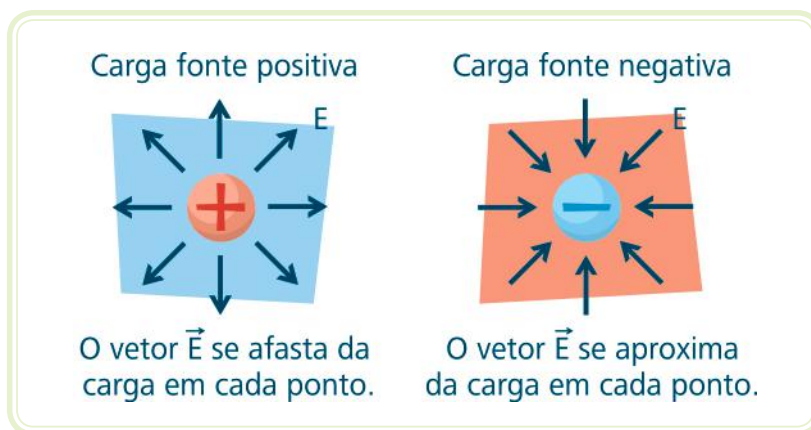


Figura 1.6: Direção e sentido do campo elétrico

Fonte: CTISM

As linhas de força permitem representar um campo elétrico, e são traçadas tangente ao vetor campo elétrico em cada ponto do campo, saindo nas

superfícies dos corpos positivos (fontes) e chegando nas superfícies dos corpos negativos (sorvedouros). A Figura 1.7 mostra espectros do campo elétrico entre duas cargas iguais em módulo, com mesmo sinal e com sinais contrários.

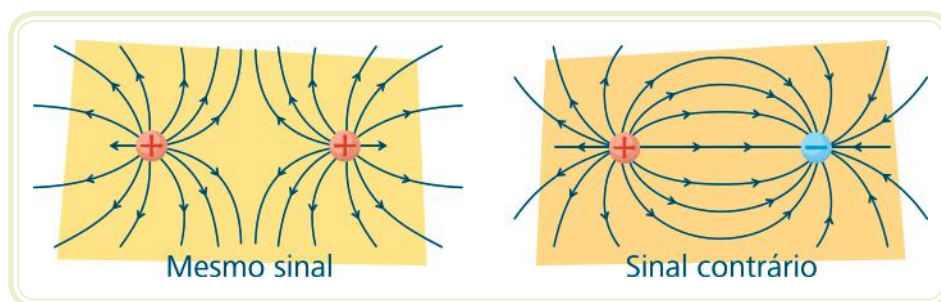


Figura 1.7: Espectros do campo elétrico

Fonte: CTISM

Quando uma carga elétrica puntiforme livre é abandonada no interior de um campo elétrico, sua trajetória coincidirá sempre com a linha de força do campo. As cargas positivas livres se deslocam espontaneamente a favor do campo elétrico e as cargas negativas livres se deslocam contra o campo elétrico, conforme a Figura 1.8.

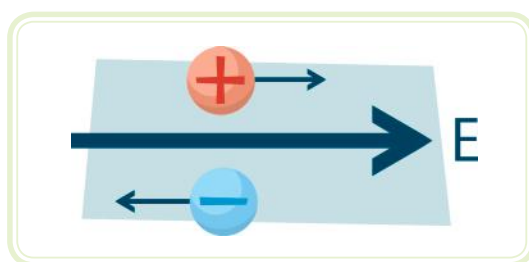


Figura 1.8: Trajetória das cargas no campo elétrico

Fonte: CTISM

1.7 Potencial elétrico

Potencial elétrico é a capacidade que uma carga elétrica tem de realizar trabalho através de seu campo elétrico. Cargas elétricas deslocam-se dos maiores potenciais para os menores potenciais elétricos. A diferença de potencial elétrico entre dois pontos (ddp) é chamada de tensão elétrica cuja unidade é o *Volt (Joule/Coulomb)* e indica a capacidade de os elétrons realizarem trabalho no seu deslocamento entre esses pontos.



Assista a um vídeo de uma descarga elétrica entre potenciais diferentes:
http://br.youtube.com/watch?v=bodsfdn_mtw

1.8 Equilíbrio eletrostático

O equilíbrio eletrostático representa a estabilidade das cargas elétricas de um determinado condutor, isto é, não há deslocamento de cargas elétricas. Observa-se que

- O potencial elétrico em todos os pontos internos ou da superfície externa do condutor em equilíbrio eletrostático é constante.
- O campo elétrico no interior de um condutor em equilíbrio eletrostático é nulo.
- A distribuição das cargas elétricas em excesso (positivas ou negativas) num condutor em equilíbrio eletrostático é sempre pela superfície externa.
- A distribuição de cargas elétricas em excesso num condutor em equilíbrio eletrostático se dá com maior concentração nas regiões do corpo onde existe menor raio de curvatura, conforme mostra a Figura 1.9.

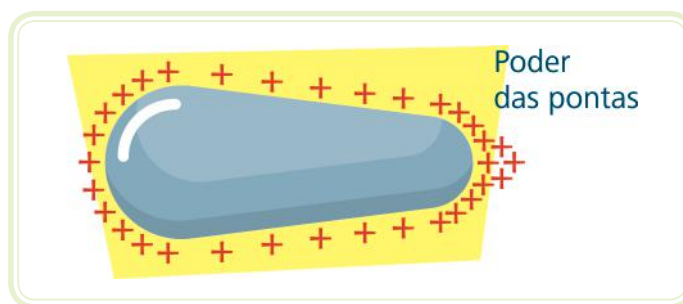


Figura 1.9: Distribuição das cargas elétricas num condutor

Fonte: CTISM

1.9 Descargas atmosféricas

Pesquisas comprovam que as descargas atmosféricas ocorrem devido a um processo de eletrização por atrito entre as partículas de água que compoem as nuvens, provocadas por ventos de forte intensidade. Este atrito dá às nuvens uma característica bipolar, conforme mostra a Figura 1.10.



Assista um vídeo de um raio atingindo uma árvore:
<http://br.youtube.com/watch?v=gkpwkau0dh0&feature=related>

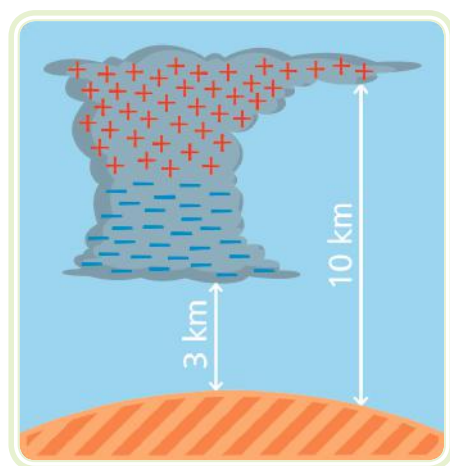


Figura 1.10: Eletrização das nuvens

Fonte: CTISM

Como podemos ver na Figura 1.10, a concentração de cargas elétricas negativas na base da nuvem atrai as cargas positivas para a superfície da Terra, originando uma diferença de potencial. Quando esta diferença de potencial ultrapassa a capacidade de isolamento do ar, cargas elétricas migram na direção da terra, ocasionando a descarga atmosférica.

1.10 Para-raios

As descargas atmosféricas causam sérias perturbações nas redes aéreas de transmissão e distribuição de energia elétrica, além de provocarem danos materiais nas construções atingidas por elas, sem contar os riscos de vida, a que as pessoas e animais são submetidos. Induzem também surtos de tensão que chegam a milhares de *Volts* nas redes aéreas de transmissão e distribuição das concessionárias de energia elétrica, obrigando a utilização de cabos-guarda ao longo das linhas de tensão mais elevadas e para-raios para a proteção de equipamentos instalados nesses sistemas.

Quando as descargas elétricas entram em contato direto com qualquer tipo de construção, tais como edificações, tanques metálicos de armazenamento de líquidos, partes estruturais ou não de subestações, são registrados grandes danos materiais que poderiam ser evitados, caso essas construções estivessem protegidas adequadamente por para-raios, como os do tipo haste **Franklin**, que se baseiam fundamentalmente no poder das pontas, conforme mostra a Figura 1.11.



Raios e para-raio:
<http://www.if.ufrgs.br/~bigrick/index.html>



Figura 1.11: Aplicação de para-raios

Fonte: CTISM



Assista ao vídeo de uma
descarga atmosférica
em um avião:
[http://br.youtube.com/
watch?v=v99lwsxhaa0](http://br.youtube.com/watch?v=v99lwsxhaa0)

1.11 Gaiola de *Faraday*

Uma Gaiola de *Faraday* é uma blindagem elétrica, ou seja, uma superfície condutora que envolve uma dada região do espaço e que pode, em certas situações, impedir a entrada de perturbações produzidas por campos elétricos e ou eletromagnéticos externos. Este nome foi dado em homenagem ao pesquisador Michael Faraday, que descobriu estes efeitos.

Esse fenômeno pode ser percebido quando uma descarga atmosférica atinge um avião em pleno voo. A corrente de descarga percorre a estrutura metálica do avião concentrando-se na superfície externa, produzindo um potencial constante no interior do avião e, conseqüentemente, diferença de potencial igual a zero, sem afetar a tripulação, passageiros, nem instrumentos de bordo.

Resumo

A eletrostática constitui-se em base científica para o estudo da eletricidade, uma vez que aborda os princípios físicos naturais da eletricidade, fundamentais para o entendimento dos fenômenos elétricos. Dessa forma, ao concluirmos esta aula, adquirimos os conhecimentos necessários para avançarmos no estudo da eletrodinâmica, que compõe a próxima aula.



Atividades de aprendizagem

1. Diferencie matéria e substância.
2. Defina condutores e isolantes.

3. Cite e explique os princípios da eletrostática.
4. Conceitue eletrização, diferenciando seus tipos.
5. Atritando-se dois bastões de vidro eletricamente neutros, observa-se que ambos não se eletrizam. Por que isso ocorre?
6. Dispõe-se de três esferas metálicas idênticas e isoladas uma da outra. Duas delas, A e B, estão descarregadas enquanto a esfera C contém uma carga elétrica Q . Faz-se a esfera C tocar primeiro a esfera A e depois a esfera B. No final deste procedimento, qual a carga elétrica das esferas A, B e C?
7. Faça o seguinte experimento envolvendo eletrização: utilizando um pente plástico, execute movimentos repetitivos de pentear-se, e, a seguir, aproxime a parte do pente que esteve em contato com os cabelos a pequenos pedaços de papel. Observe que os pedaços de papel são atraídos pelo pente. Por que isso ocorre? Quais os tipos de eletrização envolvidos neste procedimento?
8. Explique a Lei de *Coulomb*, equacionando-a.
9. Duas cargas elétricas puntiformes separadas por uma distância d exercem entre si uma força de interação eletrostática F . Se a distância for reduzida à metade, o que acontecerá com a força?
10. Diferencie campo elétrico e potencial elétrico.
11. Explique como se formam as descargas atmosféricas, bem como suas consequências e formas de proteção.
12. Uma esfera e uma haste pontiaguda, ambas devidamente conectadas ao solo, são submetidas em condições iguais a uma tempestade. Onde haverá maior probabilidade de descarga atmosférica? Por quê?

Aula 2 – Eletrodinâmica

Objetivos

Conhecer, compreender e aplicar as grandezas fundamentais dos circuitos elétricos.

Relacionar as grandezas fundamentais dos circuitos elétricos através da aplicação das Leis de *Ohm*.

Compreender e aplicar os elementos que compõem um circuito elétrico.

A eletrodinâmica estuda os elétrons e seus efeitos em movimento. Para que possamos estudá-la, devemos ter um bom entendimento da teoria eletrostática, mais especificamente sobre a teoria da matéria, condutores e isolantes, campo elétrico e potencial elétrico.



2.1 Grandezas fundamentais do circuito elétrico

2.1.1 Tensão elétrica

Tensão é a força que impulsiona os elétrons através de um condutor, realizando trabalho. Sua unidade é o *Volt*, que é definido como a diferença de potencial (ddp) entre dois pontos necessária para realizar um trabalho de 1 *Joule*, transferindo uma carga de 1 *Coulomb* de um ponto a outro: $1\text{ V} = 1\text{ J/C}$.

Em função do campo elétrico que origina a tensão, podemos defini-las em tensão contínua (CC), cuja origem é um campo elétrico constante, e tensão alternada (CA), cuja origem é um campo elétrico alternado, invertendo seu sentido ao longo do tempo periodicamente, conforme mostra a Figura 2.1. A tensão CA mais utilizada é de característica senoidal.

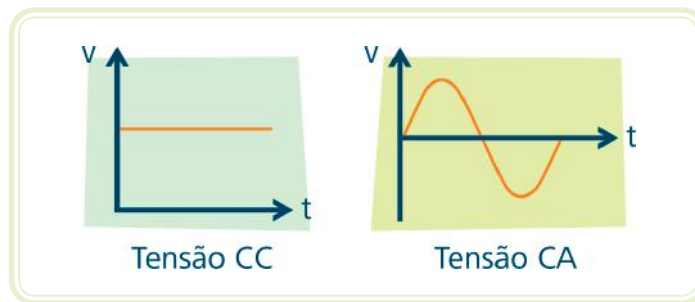


Figura 2.1: Tipos de tensão

Fonte: CTISM



Medição de tensão:
para medição de tensão utilizamos o voltímetro, ligado em paralelo com o elemento que consome energia elétrica a ser medido. O voltímetro possui alta resistência a fim de não interferir nas características elétricas do circuito ao qual está ligado.

A medição de tensão é realizada conforme circuito da Figura 2.2.

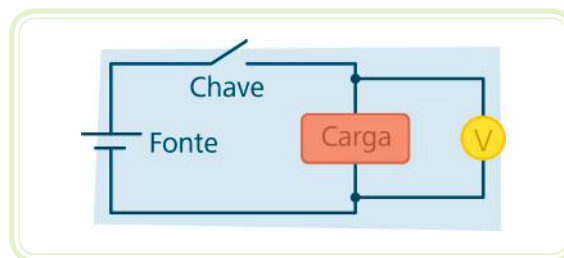


Figura 2.2: Medição de tensão em um circuito elétrico

Fonte: CTISM



Chama-se condutor o material ou a substância que possui portadores de cargas livres, isto é, cargas que são facilmente movimentadas quando sujeitas à ação de forças originadas por um campo elétrico que atue em seu interior.

2.1.2 Corrente elétrica

Corrente elétrica em um condutor é o movimento ordenado de suas cargas livres devido à ação de um campo elétrico estabelecido no seu interior pela aplicação de uma ddp entre dois pontos desse condutor.

O sentido da corrente é convencionado como o deslocamento das cargas livres positivas do condutor. É chamada corrente convencional a corrente de cargas positivas num condutor metálico, enquanto a corrente real é a corrente das cargas livres negativas, isto é, dos elétrons, conforme a Figura 2.3.

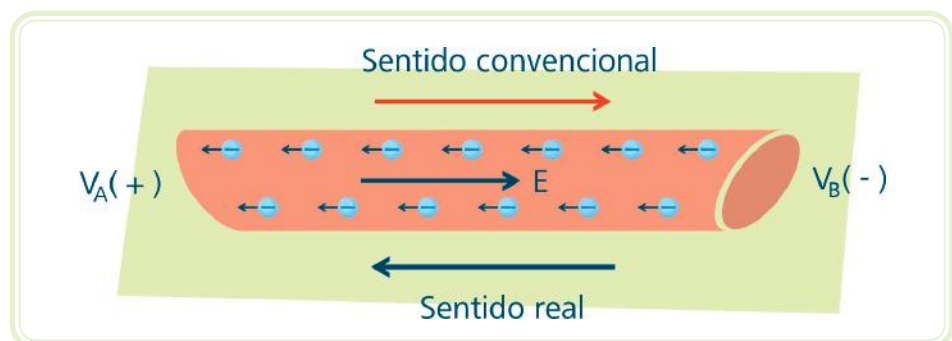


Figura 2.3: Sentido da corrente elétrica

Fonte: CTISM

Já sua intensidade é a quantidade de carga que atravessa a seção transversal de um condutor na unidade de tempo. Sua unidade é o *Ampère* (A) ($1\text{ A} = 1\text{ C/s}$).

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

$$\text{Ampère} = \frac{\text{Coulomb}}{\text{Segundo}}$$

Da mesma forma que a tensão, a corrente elétrica pode ser CC ou CA. A corrente CC é produzida por uma tensão CC, cujos elétrons se deslocam num único sentido, enquanto a corrente CA é produzida por uma tensão CA, cujos elétrons tem deslocamento bidirecional, acompanhando a variação de polaridade da tensão. A medição de corrente é realizada conforme o circuito da Figura 2.4.

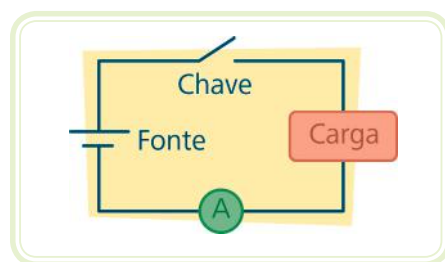


Figura 2.4: Medição de corrente em um circuito elétrico

Fonte: CTISM

2.1.3 Resistência elétrica

É a dificuldade que um material condutor apresenta à passagem da corrente elétrica. A resistência de um condutor é dada pela constante de proporcionalidade igual à razão entre a tensão mantida entre os terminais deste condutor e a intensidade da corrente por ela ocasionada.

$$\frac{\text{Tensão}}{\text{Corrente}} = \text{Constante para um mesmo condutor}$$

Sua unidade é o *Ohm* (Ω), onde $1\Omega = 1\text{ V/A}$.

Quando um elemento apresenta resistência nula dizemos que este representa um curto-circuito. Quando um elemento apresenta resistência infinita dizemos que este representa um circuito aberto.



Efeitos da corrente elétrica:
http://efisica.if.usp.br/eletricidade/basico/corrente/elementos_corrente_eletrica/

Ampère:
http://pt.wikipedia.org/wiki/andr%C3%A9-Marie_Amp%C3%A8re

Medição de corrente:
para medição de corrente utilizamos o amperímetro, ligado em série com o elemento que consome energia elétrica a ser medido. O amperímetro possui baixa resistência a fim de não interferir nas características elétricas do circuito ao qual está ligado.



Medição de resistência elétrica:
Para medição de resistência utilizamos o ohmímetro, ligado em paralelo com o elemento a ser medido.

2.2 1ª Lei de Ohm

Entre dois pontos de um material percorrido por uma corrente elétrica, existe uma proporcionalidade entre a corrente que circula e a diferença de potencial aplicada ao material. Toda vez que se variar a tensão no circuito (terminais 1, 2 e 3), através de uma chave seletora, conforme a Figura 2.5, a corrente também irá variar na ordem direta dos seus valores, isto é, se aumentarmos a tensão, a corrente também irá aumentar; se diminuirmos a tensão a corrente também irá diminuir.

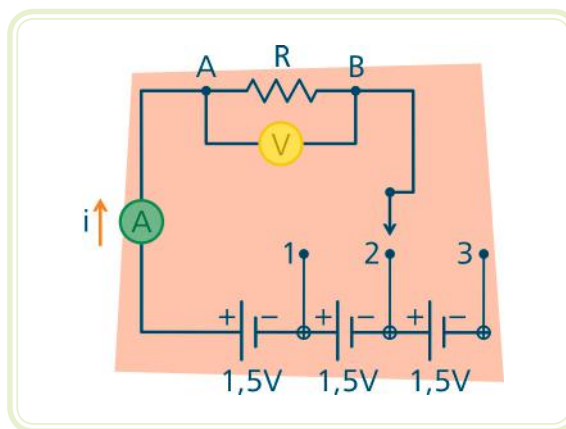


Figura 2.5: 1ª Lei de Ohm

Fonte: CTISM

Observou-se também que se a tensão fosse mantida constante a corrente apenas variaria à medida que fosse variada a resistência elétrica do condutor na ordem inversa de seus valores.

Assim chegou-se ao seguinte enunciado, conhecido como Lei de Ohm:

“A intensidade da corrente que percorre um condutor é diretamente proporcional à ddp que a ocasionou, e inversamente proporcional à resistência elétrica do condutor”.

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

$$V = R \cdot I$$

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

2.3 2ª Lei de Ohm

Ohm realizou estudos a fim de analisar o comportamento da resistência elétrica dos materiais, variando a resistência R de quatro formas diferentes, conforme se descreve na Figura 2.6.

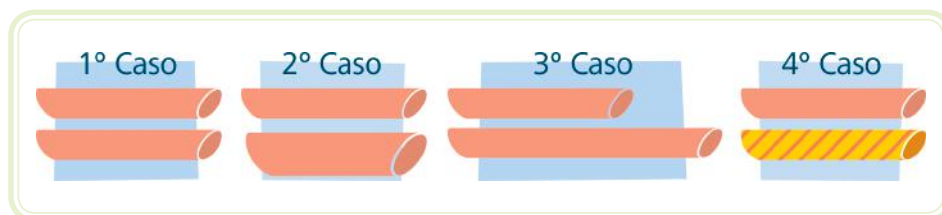


Figura 2.6: 2ª Lei de Ohm

Fonte: CTISM

1º Caso – Aplicou uma mesma ddp em dois condutores de mesma área, comprimento e material, conforme a Figura 2.6, constatando que a corrente elétrica foi a mesma para os dois condutores.

2º Caso – Aplicou uma mesma ddp em dois condutores de mesmo comprimento e material, mas a área do segundo é igual ao dobro da área do primeiro, conforme a Figura 2.6, constatando-se um aumento da corrente elétrica.

3º Caso – Aplicou uma mesma ddp em dois condutores de mesmo material e área, mas o comprimento do segundo é igual ao dobro do primeiro, conforme a Figura 2.6, constatando uma diminuição da corrente elétrica.

4º Caso – Aplicou uma mesma ddp em dois condutores de mesmo comprimento e área, porém de materiais diferentes, constatando que a corrente em cada material é diferente.

Com essa experiência, Ohm observou que a variação de resistência depende do material, do comprimento e da área enunciando a segunda lei:

“A resistência elétrica do condutor é diretamente proporcional ao seu comprimento (L), inversamente proporcional a sua seção (A) e depende ainda do material com que é feito este condutor (ρ)”.

$$R = \rho \cdot \frac{L}{A}$$

Onde: ρ é resistividade ou resistência específica. Seu valor depende exclusivamente da natureza da substância da qual o condutor é feito, da temperatura e das unidades utilizadas.

2.4 Densidade de corrente elétrica

Entende-se por densidade de corrente elétrica (d) a relação entre a corrente elétrica (I) que percorre um condutor e sua área (A). Unidade: A/mm^2 .

$$d = \frac{I}{A}$$

2.5 Elementos de um circuito elétrico

Para que possamos obter a corrente elétrica, precisamos de uma fonte geradora de energia elétrica (gerador), um receptor para utilizar a energia produzida, e condutores para realizarmos a ligação desses elementos em um circuito fechado. A esse conjunto denominamos circuito elétrico, conforme a Figura 2.7.

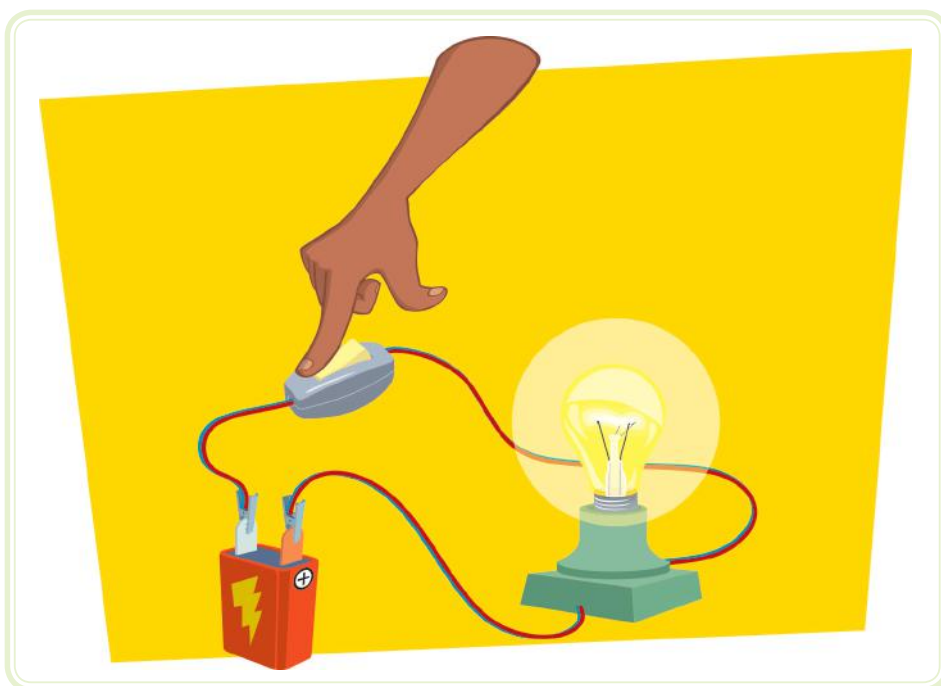


Figura 2.7: Elementos de um circuito elétrico

Fonte: CTISM

2.5.1 Gerador

É um dispositivo elétrico que transforma uma modalidade qualquer de energia em energia elétrica. Nos seus terminais é mantida uma ddp que é derivada dessa transformação.

2.5.2 Receptor

Receptor é um dispositivo elétrico capaz de transformar energia elétrica em outra modalidade qualquer de energia que não seja unicamente calor. Um receptor que transforma energia elétrica unicamente em calor é chamado receptor passivo (resistor).

2.5.3 Dispositivos de manobra

São elementos que servem para acionar ou desligar um circuito elétrico como as chaves e os interruptores representados simbolicamente na Figura 2.8.

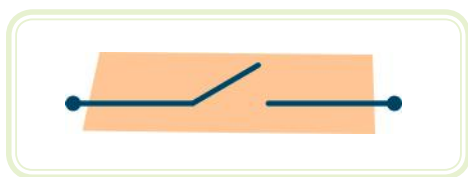


Figura 2.8: Símbolo de interruptor

Fonte: CTISM

2.5.4 Dispositivos de proteção

São dispositivos que, ao serem atravessados por uma corrente de intensidade maior que a prevista, interrompem a passagem da corrente elétrica, preservando os demais elementos do circuito. Os mais comuns são os fusíveis e os disjuntores.

2.6 Associação de resistores

Podemos associar resistores em série, em paralelo ou de forma mista, combinando as duas formas anteriores.

2.6.1 Associação em série

Dois ou mais resistores constituem uma associação em série quando estão ligados, de modo que a mesma corrente percorra cada um deles, conforme a Figura 2.9.



Tipos de geradores e força eletromotriz de um gerador:
<http://sabereletrico.blogspot.com/>

Resistores:
<http://pt.wikipedia.org/wiki/resistor>

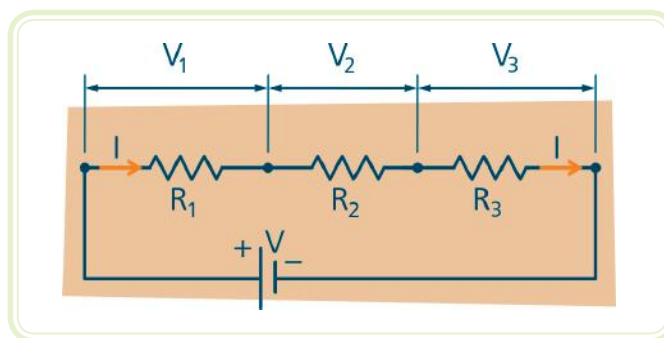


Figura 2.9: Associação em série

Fonte: CTISM

Na associação em série, pode-se dizer que:

- a) A intensidade da corrente que percorre o resistor é igual a intensidade da corrente que percorre cada resistor associado:

$$I_s = I_1 = I_2 = I_3 = \text{constante}$$

- b) A ddp entre os seus terminais é a soma das ddp entre os terminais de cada resistor associado:

$$V_s = V_1 + V_2 + V_3$$

- c) A sua resistência é igual a soma das resistências de cada um dos resistores associados:

$$R_s = R_1 + R_2 + R_3$$

2.6.2 Associação em paralelo

Dois ou mais resistores constituem uma associação em paralelo quando estão ligados de modo que a ddp entre seus terminais é a mesma, conforme a Figura 2.10.

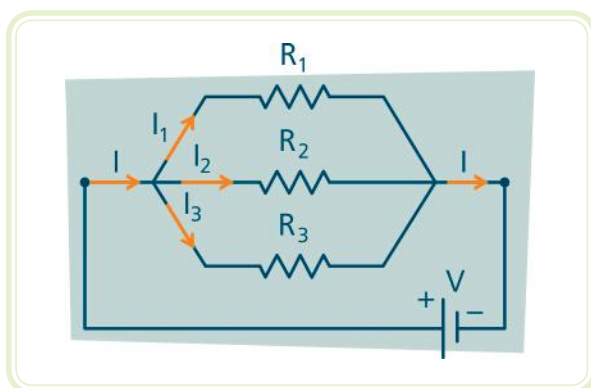


Figura 2.10: Associação em paralelo

Fonte: CTISM

Na associação em paralelo, pode-se dizer que:

- a) A intensidade da corrente que percorre o resistor equivalente é igual a soma das intensidades das correntes que percorrem cada um dos resistores associados:

$$I_p = I_1 + I_2 + I_3$$

- b) A ddp entre os terminais do resistor equivalente é igual a ddp entre os terminais de cada um dos resistores associados:

$$V_p = V_1 = V_2 = V_3 = \text{constante}$$

- c) O inverso da resistência do resistor equivalente é a soma dos inversos das resistências dos resistores associados:

$$\frac{1}{R} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3}$$

Para n resistores iguais associados em paralelo, pode-se utilizar a seguinte expressão:

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



Para a associação de dois resistores em paralelo, pode-se utilizar a seguinte expressão:

$$R_p = \frac{R_1 \cdot R_2}{R_1 + R_2}$$

2.6.3 Teorema de *Kenelly*

Consiste em um método de redução de circuitos resistivos que permite a transformação da conexão de três resistores em triângulo para três resistores em estrela e vice-versa, conforme a Figura 2.11.

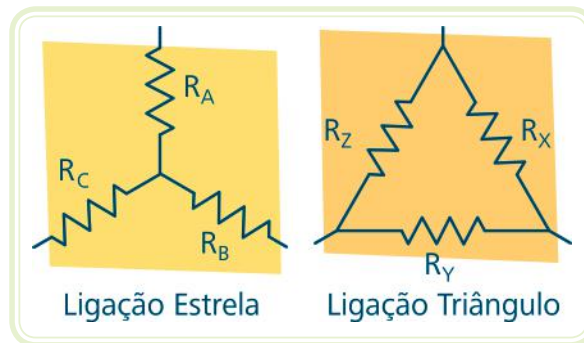


Figura 2.11: Ligações estrela e triângulo

Fonte: CTISM

Para determinar matematicamente as resistências transformadas, utilizam-se as seguintes equações, aplicadas ao exemplo da Figura 2.12.

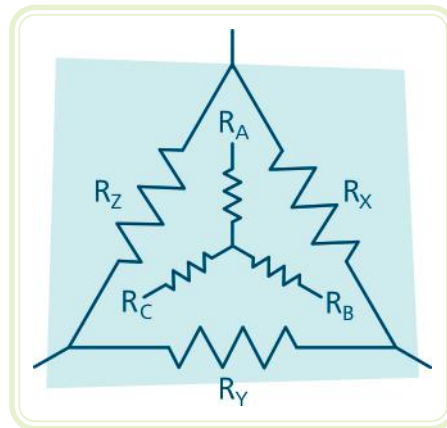


Figura 2.12: Teorema de *Kenelly*

Fonte: CTISM

Triângulo para estrela

$$R_A = \frac{R_X \cdot R_Z}{R_X + R_Y + R_Z}$$

$$R_B = \frac{R_X \cdot R_Y}{R_X + R_Y + R_Z}$$

$$R_C = \frac{R_Y \cdot R_Z}{R_X + R_Y + R_Z}$$

Estrela para triângulo

$$R_X = \frac{R_A \cdot R_B + R_B \cdot R_C + R_C \cdot R_A}{R_C}$$

$$R_Y = \frac{R_A \cdot R_B + R_B \cdot R_C + R_C \cdot R_A}{R_A}$$

$$R_Z = \frac{R_A \cdot R_B + R_B \cdot R_C + R_C \cdot R_A}{R_B}$$

2.7 Circuitos elétricos

2.7.1 Leis de Kirchhoff

1ª Lei: A soma das correntes que chegam a um nó do circuito é igual à soma das correntes que saem do nó, conforme a Figura 2.13. Observe que $I_1 = I_2 + I_3$.

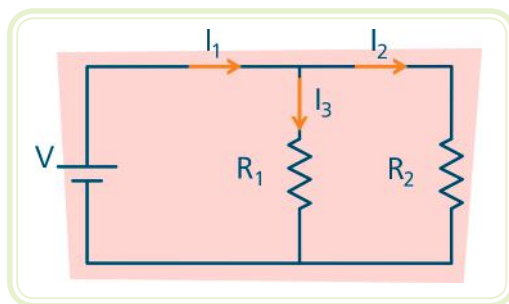


Figura 2.13: 1ª Lei de Kirchhoff

Fonte: CTISM

2ª Lei: A soma dos produtos das correntes pelas resistências (quedas de tensão) em cada malha do circuito é igual à tensão aplicada a esta malha, conforme a Figura 2.14.

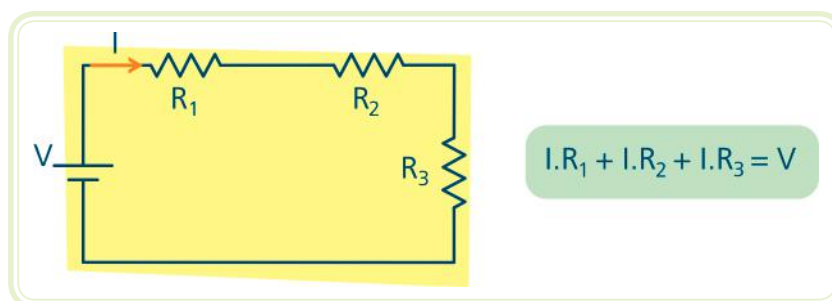


Figura 2.14: 2ª Lei de Kirchhoff

Fonte: CTISM



Medidores de energia:
http://pt.wikipedia.org/wiki/medidor_de_energia_el%C3%A9trica

Conversão de unidades:
<http://jumk.de/calcul/energia-pt.shtml>

2.8 Potência e energia elétrica

Potência é a relação entre o trabalho realizado e o tempo gasto para realizá-lo. A potência de um equipamento mede a taxa de transformação de energia elétrica em trabalho. Sua unidade é o *Watt* (W), e sua medição se dá através do Wattímetro.

Energia é o trabalho total realizado na transformação de energia elétrica em outra forma de energia. Matematicamente a energia pode ser expressa pelo produto da potência pelo tempo. Sua unidade é o *Joule* (J), existindo subunidades como o Wh (Watt-hora) ou kWh (quilowatt-hora), e sua medição se dá através de um medidor de kWh.

2.9 Lei de Joule

A energia potencial elétrica (W) dissipada num resistor por efeito *Joule*, é diretamente proporcional à resistência do resistor, ao tempo de duração da corrente e ao quadrado da intensidade da corrente. A Figura 2.15 mostra uma aplicação do Efeito *Joule*.

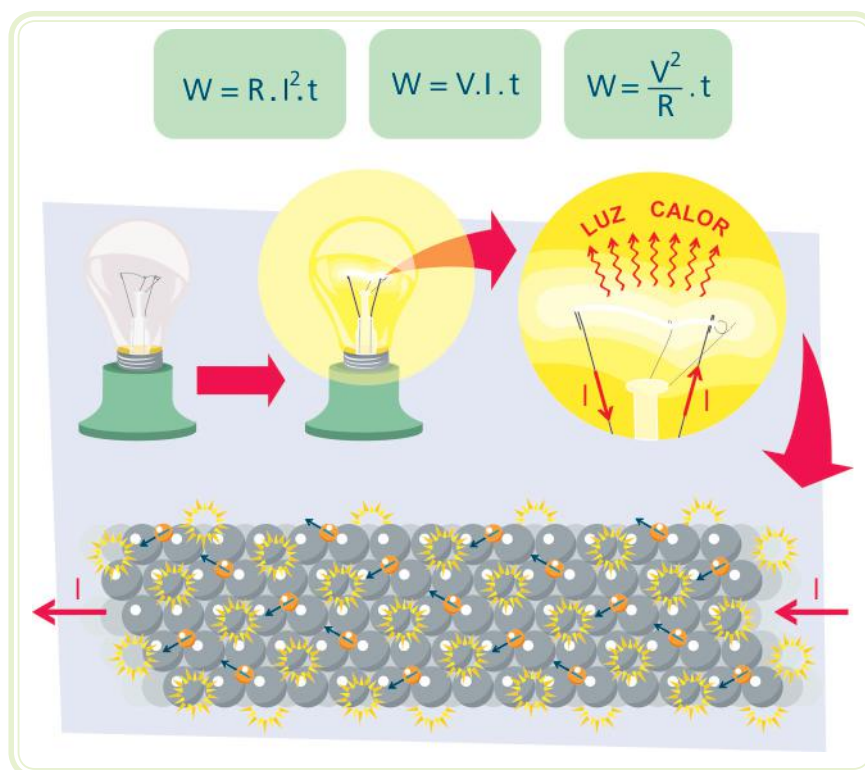


Figura 2.15: Efeito Joule em um condutor
Fonte: CTISM

Deduzindo as equações que seguem em termos de potência elétrica, temos:



$$P = V.I$$

$$P = R.I^2$$

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

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

Resumo

Ao final do estudo da eletrodinâmica estamos aptos a analisar circuitos elétricos em corrente contínua, relacionando suas grandezas fundamentais, bem como a definir e aplicar os conceitos de potência elétrica e energia elétrica. Nesta aula estudamos os circuitos elétricos com cargas resistivas, isto é, capazes de transformar energia elétrica em energia térmica (calor). Na próxima aula estudaremos os capacitores, dispositivos que armazenam energia elétrica, sem transformá-la em outra modalidade de energia.

Atividades de aprendizagem



1. Cite e conceitue as grandezas fundamentais de um circuito elétrico.
2. Explique a 1ª e 2ª Lei de *Ohm*.
3. Como podemos relacionar densidade elétrica com a capacidade de condução de corrente de um condutor?
4. Diferencie associação série de paralelo. Cite exemplos de suas aplicações.
5. Considerando as formas de se associarem resistores, como estão associadas as cargas elétricas em sua residência?
6. Três resistências iguais estão conectadas em série e ligadas a uma bateria, sendo percorridas por uma corrente I . Determine quantas vezes a corrente irá aumentar ou diminuir, se ligarmos essas três resistências em paralelo à mesma bateria.
7. Explique as Leis de *Kirchhoff*.
8. Agora que você já sabe o que é um circuito elétrico e conhece as Leis de *Kirchhoff*, explique o que é queda de tensão em um circuito elétrico.

9. Diferencie potência elétrica de energia elétrica.
10. Explique como ocorre o efeito *Joule*.
11. Que aparelhos do nosso cotidiano utilizam a Lei de *Joule* como princípio de funcionamento?
12. Tendo em mãos a potência de seu chuveiro elétrico, o tempo médio mensal de uso, bem como a nota fiscal de energia elétrica, determine a despesa mensal de energia em sua casa apenas para aquecimento de água no chuveiro.

Aula 3 – Capacitores

Objetivos

Compreender o funcionamento básico dos capacitores, bem como suas características e propriedades.

Estudar a forma de armazenamento de energia, bem como os processos de carga e descargas dos capacitores.

Compreender e aplicar a associação de capacitores e os seus efeitos no circuito elétrico.

O estudo sobre capacitores é fundamental para o conhecimento da eletricidade. Características como o armazenamento de energia, filtragem de ondulações em retificadores e produção de circuitos oscilatórios o tornam um importante componente dentro de um circuito elétrico.



3.1 Capacitância elétrica de um condutor

É um valor característico de um dado corpo e avaliado pela razão entre seu potencial e sua carga. É constante em cada meio onde o corpo for colocado, tendo como unidade o *Farad* (F), sendo 1 *Farad* igual à capacitância elétrica de um condutor que com carga de 1 *Coulomb* atinge um potencial de 1 *Volt*.

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

$$Q = C.V$$

Dessa forma, a capacitância elétrica de um condutor pode ser determinada matematicamente através da relação entre a carga e o potencial do condutor; porém, fisicamente, a capacitância depende da forma geométrica do condutor, de suas dimensões e da natureza do isolante que o envolve.



Tipos de capacitores:
<http://www.dsee.fee.unicamp.br/~sato/ET515/node16.html>

3.2 Capacitores

Os condutores podem armazenar grandes quantidades de carga, mas descarregam-se rapidamente, inviabilizando seu uso como elementos capacitivos. Porém, existem dispositivos de altas capacitâncias elétricas denominados capacitores, com grande vantagem sobre os condutores pelo seu reduzido tamanho.

O capacitor é composto por dois eletrodos de placas condutoras separadas por um meio isolante (dielétrico) que armazenam cargas opostas.

3.2.1 Capacitor plano

As placas iguais e paralelas armazenam cargas elétricas iguais e opostas. Assim, a carga total do capacitor é igual à zero, conforme a Figura 3.1.

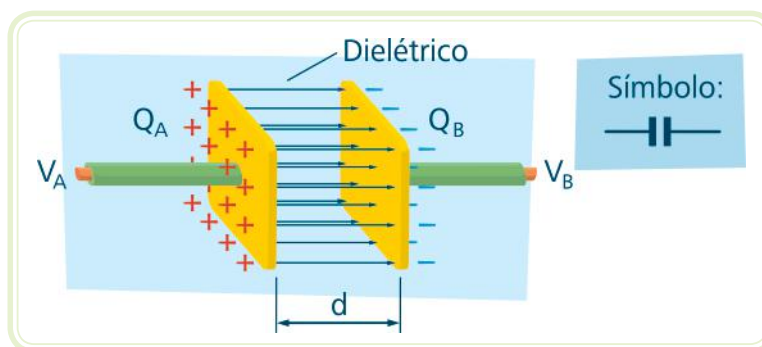


Figura 3.1: Capacitor plano

Fonte: CTISM

A capacitância de um capacitor plano é diretamente proporcional à área das placas e inversamente proporcional à espessura do dielétrico (distância entre as placas).

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

$$C = \frac{1}{4\pi \cdot K} \cdot \frac{A}{d}$$

Onde:

ϵ : permeabilidade elétrica

A: área útil das placas planas

d: distância entre as placas

3.2.2 Processo de carga de um capacitor

Suponhamos um circuito constituído de uma bateria de tensão E , um capacitor de capacitância C , duas chaves ch_1 e ch_2 e uma resistência R , conforme a Figura 3.2.

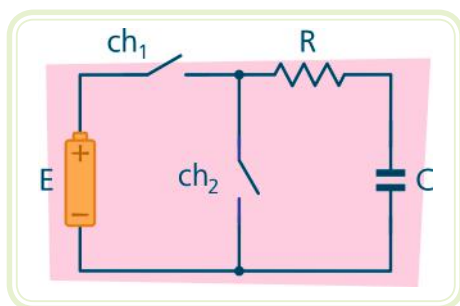


Figura 3.2: Circuito com capacitor

Fonte: CTISM

No instante em que a chave ch_1 é ligada, a tensão nos extremos do capacitor é zero, passando a crescer rapidamente até o valor E . Enquanto a tensão nos extremos do capacitor aumenta, sua carga Q cresce proporcionalmente, o que significa que enquanto a tensão estiver variando no sentido de aumentar, a bateria estará fornecendo corrente. Esta, entretanto, não circula através do dielétrico, pois o fluxo de elétrons se produz no circuito externo ao capacitor, ficando a placa ligada ao polo positivo do gerador com deficiência de elétrons, e a placa ligada ao polo negativo com excesso. O fluxo de elétrons continuará até que as duas placas tenham adquirido uma carga suficiente para que a tensão entre elas seja exatamente igual e oposta à tensão aplicada E .

Quando isso ocorrer, a corrente no circuito se torna igual à zero, sendo, pois, de natureza transiente: é máxima no instante em que se liga a chave ch_1 (capacitor descarregado = curto-circuito), diminui e tende para zero quando o capacitor estiver carregado (capacitor carregado = circuito aberto).

A Figura 3.3 mostra o comportamento da tensão no capacitor, carga no capacitor, tensão no resistor e corrente do circuito durante o processo de carga.

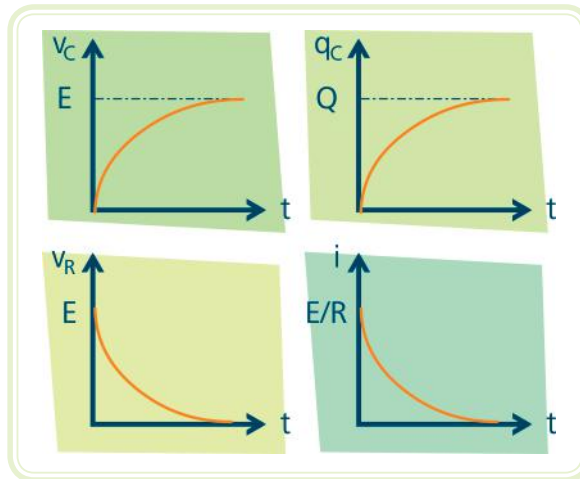


Figura 3.3: Processo de carga do capacitor

Fonte: CTISM

O valor da corrente depende, a cada instante, da tensão aplicada, da resistência do circuito e da capacitância. Assim, o capacitor totalmente carregado comporta-se como um circuito aberto em corrente contínua.

3.2.3 Processo de descarga de um capacitor

Se abrirmos a chave ch_1 depois de carregado o capacitor, a tensão nos extremos das placas do capacitor permanece igual à tensão da bateria, mas com o decorrer do tempo vai diminuindo até anular-se, pois, mesmo com os terminais abertos, o capacitor irá descarregar. Isso se deve ao fato de que os materiais que constituem o dielétrico não são isolantes perfeitos, e uma corrente de fraca intensidade chamada corrente de fuga circula através do dielétrico. Quando o número de elétrons for igual ao número de cargas positivas em cada placa, a tensão será nula, e o capacitor estará descarregado.

Agora, se após abrirmos a chave ch_1 , fecharmos a chave ch_2 , a descarga acontecerá no resistor R , dissipando a energia armazenada no capacitor sob forma de calor no resistor.

A Figura 3.4 mostra o comportamento da tensão no capacitor, carga no capacitor, tensão no resistor e corrente do circuito durante o processo de descarga.

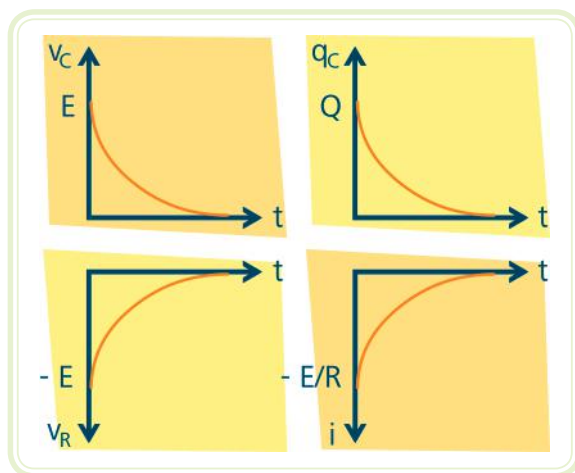


Figura 3.4: Processo de descarga do capacitor

Fonte: CTISM

A curva de descarga dependerá da capacitância C , da tensão E e da resistência R e terá característica exponencial, pois no início da descarga, a tensão E no capacitor é máxima, bem como a circulação de cargas. Com o passar do tempo, o capacitor vai se descarregando, diminuindo a tensão em seus terminais e, conseqüentemente, a circulação de cargas tende a zero (capacitor descarregado). A tensão no resistor e a corrente de descarga tem sentido contrário ao da tensão e ao da corrente de carga, porque a carga do capacitor tem polaridade inversa à da fonte.

3.2.4 Constante dielétrica

É a razão entre a capacitância de um capacitor C_K , cujo dielétrico é constituído pela substância considerada, e a capacitância de um capacitor C_0 , cujo dielétrico é o ar.

$$K = \frac{C_K}{C_0}$$

3.2.5 Rigidez dielétrica

É a máxima tensão que uma placa isolante de 1 mm de espessura pode suportar, sem romper o isolamento.



Rigidez dielétrica:
http://pt.wikipedia.org/wiki/rigidez_diel%C3%A9trica

3.3 Associação de capacitores

3.3.1 Associação em série

Dois ou mais capacitores constituem uma associação em série quando estão ligados de modo que a mesma corrente percorra cada um deles, conforme a Figura 3.5.

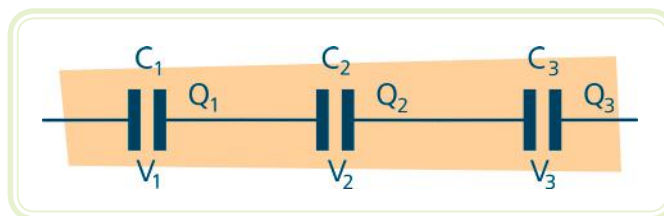


Figura 3.5: Associação em série

Fonte: CTISM

Na associação em série, cada um dos capacitores armazena a mesma quantidade de carga, enquanto a tensão nos terminais (V_s) é igual à soma das tensões dos capacitores associados.

$$Q_1 = Q_2 = Q_3 = \dots = Q_n = \text{constante}$$

$$V_s = V_1 + V_2 + V_3 + \dots + V_n$$

O inverso da capacitância equivalente da associação em série é igual à soma dos inversos das capacitâncias dos capacitores associados:

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



Para n capacitores associados em série, podemos determinar a capacitância equivalente através da seguinte expressão:

$$C_s = \frac{C}{n}$$

Para a associação de dois capacitores em série, podemos determinar a capacitância equivalente através da seguinte expressão:

$$C_s = \frac{C_1 \cdot C_2}{C_1 + C_2}$$

3.3.2 Associação em paralelo

Dois ou mais capacitores constituem uma associação em paralelo, quando estão ligados de modo que a tensão da associação é a mesma de cada um dos capacitores, conforme a Figura 3.6.

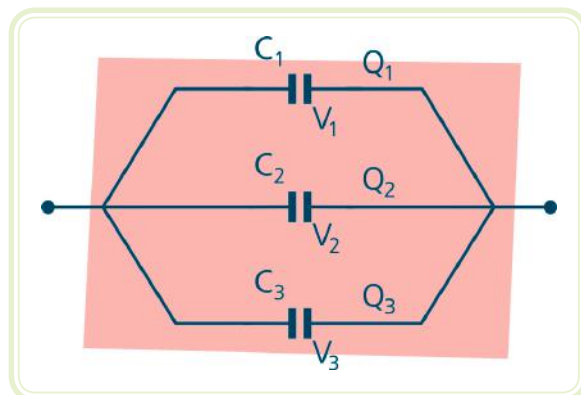


Figura 3.6: Associação em paralelo

Fonte: CTISM

A carga total da associação em paralelo é igual à soma das cargas dos capacitores associados, enquanto a tensão nos terminais (V_p) é igual à tensão dos capacitores.

$$Q_p = Q_1 + Q_2 + Q_3 + \dots + Q_n$$

$$V_p = V_1 = V_2 = V_3 = \dots = V_n$$

A capacitância equivalente da associação em paralelo é igual à soma das capacitâncias associadas:

$$C_p = C_1 + C_2 + C_3 + \dots + C_n$$

A constante de tempo de um capacitor representa o tempo necessário para que a tensão no capacitor atinja 63,21% da tensão da fonte aplicada sobre ele. Isso se deve ao fato do capacitor se carregar exponencialmente, seguindo a equação:

$$V_c = V_f \cdot (1 - e^{-\frac{t}{RC}})$$

Onde:

V_C : tensão do capacitor

V_f : tensão da fonte

R : resistência em série com o capacitor e a fonte

C : capacitância do capacitor e t o tempo

Resumo

Nessa aula estudamos o comportamento de um capacitor no circuito elétrico em corrente contínua, envolvendo os processos de carga, descarga e associação de capacitores. Esse conhecimento é fundamental para o estudo da correção de fator de potência (Aula 7), bem como das disciplinas voltadas à eletrônica e automação de processos. Na próxima aula estudaremos os fundamentos do magnetismo, permitindo, posteriormente, relacioná-lo com a eletricidade.



Atividades de aprendizagem

1. Conceitue capacitância. De que depende a capacitância de um capacitor?
2. Explique processo de carga e descarga de um capacitor.
3. Pesquise e explique as diferenças entre regime transitório e regime permanente de um circuito.
4. Conceitue constante dielétrica.
5. Explique o significado do termo rigidez dielétrica.
6. Diferencie associação em série e em paralelo de capacitores em relação à carga e tensão da associação.
7. Conceitue constante de tempo de um capacitor.
8. Cite aplicações de capacitores.
9. Entre as placas de um capacitor plano afastadas de uma distância d , existe uma diferença de potencial V . Reduzindo-se à metade o afastamento entre as placas, o que ocorre com a capacitância deste capacitor?

Aula 4 – Magnetismo

Objetivos

Reconhecer através da história, a importância do magnetismo para a eletricidade.

Caracterizar e aplicar propriedades de um ímã.

Caracterizar e aplicar as grandezas magnéticas.

A descoberta dos fenômenos magnéticos desencadeou o modelo de desenvolvimento tecnológico vivenciado nos dias atuais. Apesar de o magnetismo não ter tido aplicação prática por muito tempo, seus fundamentos propiciaram relacioná-lo com a eletricidade, originando uma série de inovações tecnológicas.



4.1 Histórico

Não se tem registro do início do estudo sobre o magnetismo, nem de sua origem. Os gregos já sabiam desde a antiguidade que certas pedras da região da Magnésia, na Ásia Menor, atraíam pedaços de ferros. Esta rocha era a magnetita (Fe_3O_4). As rochas que contêm o minério que apresenta este poder de atração são chamadas de ímãs naturais.

Em 1600, William Gilbert descobriu a razão de a agulha de uma bússola orientar-se em direções definidas: a Terra é um ímã permanente. E o fato de polo norte da agulha ser atraído pelo polo norte geográfico da Terra, quer dizer que este polo é, na realidade, polo sul magnético. Isso se verifica ao saber que polos de mesmo nome de dois ímãs repelem-se e de nomes opostos se atraem.



História do magnetismo:
http://servlab.fis.unb.br/matdid/1_2004/airton-josafa/magnetismo/principal.htm

Magnetismo da Terra:
<http://www.youtube.com/watch?v=BRDJmXhWaaM>

4.2 Ímãs

Os ímãs têm seus domínios magnéticos orientados em um único sentido e possuem ao seu redor um campo magnético onde exercem ações magnéticas como a magnetita, que é um ímã natural.

Todo ímã possui duas regiões denominadas polos, situados nos extremos do ímã, onde este exerce de forma mais intensa suas interações magnéticas. Os polos são denominados Norte e Sul.

4.2.1 Campo magnético de um ímã

O campo magnético é a região do espaço em torno de um material magnético onde se observam seus efeitos magnéticos, isto é, sua atração e sua repulsão com outros corpos. Por ser invisível, convencionou-se que o sentido das linhas de indução é tal, que elas saem do polo norte e entram no polo sul fora do ímã, e saem do polo sul e entram no polo norte dentro do ímã, conforme a Figura 4.1.

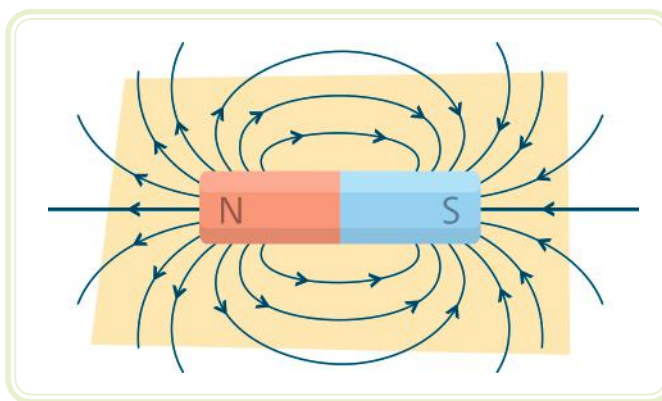


Figura 4.1: Linhas de indução

Fonte: CTISM

4.2.2 Inseparabilidade dos polos

Quebrando-se um ímã em forma de barra, em duas partes, não obteremos dois ímãs, um com somente o polo sul e o outro somente com o polo norte, mas dois ímãs menores com ambos os polos, conforme a Figura 4.2. Se continuarmos dividindo o mesmo ímã, obteremos sempre o mesmo resultado. Isto se deve ao fato de que as propriedades magnéticas são intrínsecas às moléculas que constituem o material.

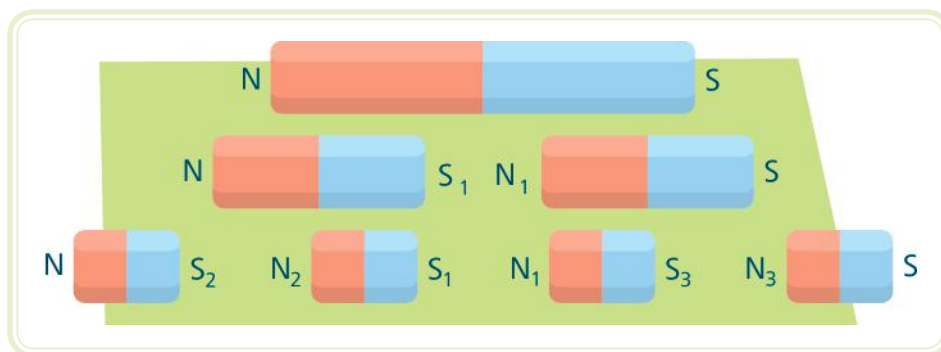


Figura 4.2: Inseparabilidade dos polos

Fonte: CTISM

4.2.3 Interação magnética entre dois ímãs

Observe nas Figuras 4.3 e 4.4 o comportamento das linhas de campo quando interagimos polos de mesmo nome (repulsão) e polos de nomes contrários (atração).

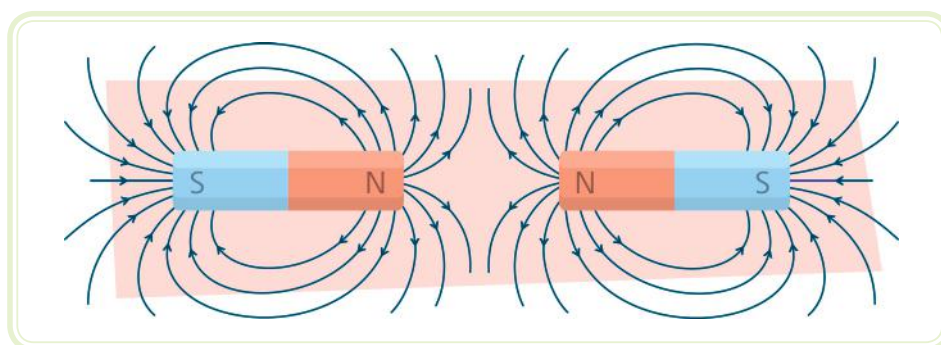


Figura 4.3: Repulsão magnética entre polos de mesmo nome

Fonte: CTISM

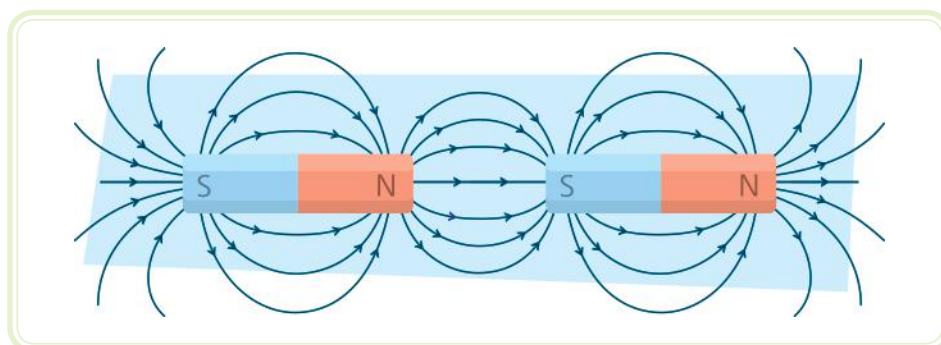


Figura 4.4: Atração magnética entre polos de nomes contrários

Fonte: CTISM

4.2.4 Tipos de ímãs

O único ímã natural é a magnetita. Sua utilidade é, no entanto, apenas histórica, pois é rara, fraca e de difícil industrialização. A magnetita não passa de dióxido de ferro (Fe_3O_4).

Também temos o ímã artificial, que é qualquer objeto que tenha adquirido propriedades magnéticas através de processos de imantação. Porém, interessa-nos, em nosso estudo, os que são imantados pelo uso de corrente elétrica, que podem ser classificados em artificiais permanentes e artificiais temporários. Os artificiais permanentes tem a característica de conservarem o seu próprio campo magnético, mesmo depois de cessado o campo indutor ou a corrente elétrica, tal como o aço. Os artificiais temporários têm a característica de não conservarem o campo magnético após cessado o campo indutor ou a corrente elétrica, tal como o ferro.

4.3 Materiais magnéticos e não magnéticos

Materiais magnéticos são aqueles que permitem a orientação de seus ímãs elementares, tais como ferro, aço e níquel.

Os materiais não magnéticos são aqueles onde os efeitos magnéticos de seus ímãs elementares anulam-se completamente, não reagindo a um campo magnético externo, tais como plásticos, madeiras e borrachas.

4.4 Processos de magnetização

Como um material pode magnetizar-se alinhando suas moléculas? A melhor maneira de fazê-lo é aplicando-lhe uma força magnética. Tal força deverá agir contra o campo magnético de cada molécula, orientando-as. Isso pode ser feito por atrito, por indução e, principalmente, por corrente elétrica, que ocorre quando uma bobina é ligada a uma bateria, a corrente elétrica produz um campo magnético que magnetiza o ferro. A magnetização do ferro se produz pela ação do campo magnético que se origina da corrente elétrica, ao circular pelas espiras. As linhas de força orientam os domínios magnéticos do ferro numa só direção, imantando o núcleo.



Processos de imantação:
http://efisica.if.usp.br/eletricidade/basico/imas/naturais_artificiais/

4.5 Classificação dos materiais magnéticos

Os materiais podem ser ferromagnéticos, quando são atraídos fortemente pelos polos de um ímã; paramagnéticos, quando, na presença de um campo magnético, são atraídos fracamente pelos dois polos dos ímãs; e diamagnéticos, quando, na presença de um campo magnético, são repelidos pelos dois polos dos ímãs.

4.6 Lei de Coulomb

Coulomb realizou uma experiência onde dois ímãs compridos e finos foram dispostos a certa distância, conforme Figura 4.5, a fim de atribuir um valor quantitativo de magnetismo, chegando a seguinte afirmação:

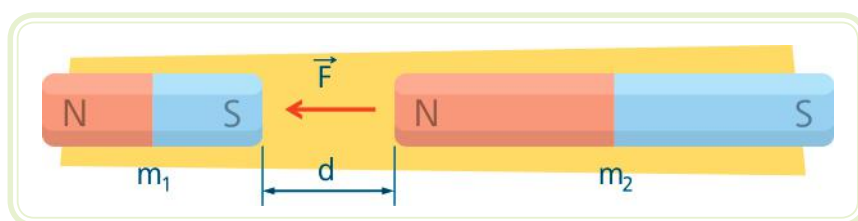


Figura 4.5: Polos de nomes contrários se atraem

Fonte: CTISM

“A força de atração entre dois ímãs é diretamente proporcional ao produto das massas magnéticas dos corpos e inversamente proporcional ao quadrado das distâncias entre eles e depende ainda do meio em que se encontra o fenômeno”.

$$F = h \cdot \frac{m_1 \cdot m_2}{r^2}$$

Onde:

F: força magnética [*Newton* (N)]

h: constante magnética do meio

m: massa magnética [*Weber* (Wb)]

r: distância entre os corpos [metros (m)]



Charles Augustin de Coulomb:
http://pt.wikipedia.org/wiki/Charles_de_Coulomb

4.7 Fluxo magnético [ϕ (Wb)]

É definido como o número total de linhas de campo magnético que atravessam determinada seção. Sua unidade no Sistema Internacional (SI) é o *Weber* (Wb). Um *Weber* é igual a 1.10^8 linhas de campo magnético.

4.8 Indução magnética [β (T)]

Também chamada de densidade de fluxo magnético, representa o fluxo magnético por unidade de área de uma seção perpendicular ao sentido do fluxo. A unidade de indução magnética é o Wb/m² que é chamado de *Tesla* (T).

$$\beta = \frac{\phi}{A}$$

4.9 Intensidade magnética [H (A/m)]

É uma grandeza vetorial definida em cada ponto do campo. Para representar, no interior do ímã, a intensidade de magnetização e, ao mesmo tempo, a direção e o sentido da orientação dos ímãs elementares que o constituem, dá-se à intensidade de magnetização o caráter de um vetor, tendo a direção do eixo magnético dos ímãs elementares orientados e dirigidos no sentido sul-norte.

Se cada unidade de volume de um ímã é constituída por um igual número de ímãs elementares igualmente orientados, a intensidade magnética do ímã é, então constante em valor, direção e sentido. Em todos os outros casos, a intensidade de magnetização varia em valor e direção de um ponto para o outro do ímã, sendo a intensidade magnética resultante da média das intensidades desses pontos. A unidade da intensidade magnética é o A/m.

4.10 Permeabilidade magnética [μ (T.m/A)]

A permeabilidade magnética exprime a facilidade que um determinado meio, com dimensões (comprimento e área de seção transversal) unitárias, oferece ao estabelecimento de um campo magnético. Essa grandeza é expressa pela relação:

$$\mu = \frac{\beta}{H}$$

No vácuo, $\mu_0 = 4.\pi.10^{-7}$ T.m/A.

O valor de μ é uma grandeza característica de cada material, pois indica a aptidão que um determinado material possui em reforçar um campo magnético inicial sendo $\beta = \mu \cdot H$.

A permeabilidade relativa, μ_r , de um determinado material é representada pelo quociente entre a permeabilidade do material e a permeabilidade do vácuo, representando, assim, um fator de proporção relativa à permeabilidade do vácuo.

4.11 Relutância [\mathfrak{R} (A/Wb)]

A relutância magnética de um circuito magnético pode ser definida como a dificuldade oferecida pelo circuito à passagem do fluxo magnético através do mesmo. Sua unidade é o *Ampère/Weber*. A relutância é o inverso da permeância (facilidade oferecida pelo circuito à passagem do fluxo magnético).

A relutância é diretamente proporcional ao comprimento do caminho magnético e inversamente proporcional a permeabilidade e a seção transversal do material.

$$\mathfrak{R} = \frac{l}{\mu \cdot A}$$

4.12 Ponto Curie

Quando a temperatura de um material ferromagnético é elevada acima de certo valor crítico, o material perde suas propriedades magnéticas tornando-se simplesmente paramagnético.

4.13 Curva de histerese magnética

É a curva que relaciona a intensidade magnética e a indução magnética ($\beta \times H$) em um determinado material.



Histerese, ponto curie:
http://pt.wikipedia.org/wiki/Temperatura_de_Curie

Histerese, ponto de saturação, magnetismo residual e força coercitiva:
<http://pt.wikipedia.org/wiki/Histerese>

Resumo

Nesta aula estudamos os princípios básicos do magnetismo, envolvendo as propriedades magnéticas dos materiais e as grandezas magnéticas. Estes conhecimentos são fundamentais para prosseguirmos com o estudo do eletromagnetismo, o qual visa relacionar a eletricidade e o magnetismo.



Atividades de aprendizagem

1. O que é um ímã?
2. Diferencie materiais magnéticos dos não magnéticos.
3. Cite e explique os processos de magnetização e de desmagnetização.
4. Conceitue fluxo magnético e indução magnética.
5. De que depende a relutância de um circuito magnético?
6. Explique o significado da histerese magnética de um material.
7. Conceitue magnetismo residual e força coercitiva.
8. Qual a importância da curva de histerese no projeto de máquinas elétricas?
9. O que determina o ponto *Curie* de uma dada substância?

Aula 5 – Eletromagnetismo

Objetivos

Estabelecer a relação entre eletricidade e magnetismo, compreendendo, desta forma, o eletromagnetismo.

Compreender e aplicar as Leis de *Faraday* e de *Lenz*.

Entender a magnitude e o comportamento dos campos magnéticos e suas influências nos circuitos elétricos.

O eletromagnetismo estuda as propriedades elétricas e magnéticas da matéria a fim de compreender a relação existente entre elas. É esta relação que possibilitará a utilização das propriedades e dos recursos do magnetismo na eletricidade.



5.1 Histórico

Procurando identificar a origem do magnetismo nos corpos, William Gilbert, no século XIV, pesava metais antes e depois de serem magnetizados e concluindo que a magnetização não modifica o peso do corpo. Naquela ocasião, a eletricidade e o magnetismo ainda não se apresentavam como ciência, o que só foi alcançado no século XVIII. Mas no século XIX, uma nova descoberta lançou os físicos numa tarefa que levou à formulação da ciência do eletromagnetismo.

Hans Christian Oersted (1777-1851), físico dinamarquês, descobriu a relação entre circuitos magnéticos e elétricos através de uma experiência, relatada no decorrer desta aula. Além de sugerir que os fenômenos elétricos e magnéticos estão relacionados, a descoberta de Oersted levou à conclusão de que a corrente elétrica cria um campo magnético no espaço que a circunda.

Dessa forma, campos magnéticos idênticos aos originados por ímãs naturais podem ser produzidos através de corrente elétrica, permitindo o desenvolvimento de diversos equipamentos diretamente relacionados à produção e à utilização da energia elétrica, tais como geradores, motores e transformadores.

5.2 Campo magnético criado por corrente elétrica



Campos magnéticos:
http://pt.wikipedia.org/wiki/Campo_magn%C3%A9tico



Assista ao vídeo sobre
eletrização por atrito:
<http://br.youtube.com/watch?v=rDwGI9LwaLM>

Sempre que houver cargas elétricas em movimento, em torno dessa carga surgirá um campo magnético. A Figura 5.1 mostra a experiência de *Oersted*; onde o campo magnético criado por corrente elétrica interage com a agulha de uma bússola, desviando-a.

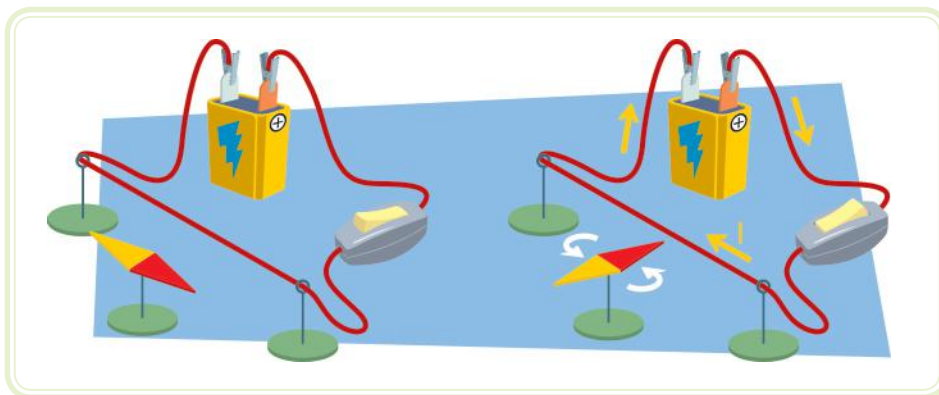


Figura 5.1: Experiência de *Oersted*

Fonte: CTISM

O aspecto do campo magnético gerado por corrente elétrica depende do tipo e formato do condutor, conforme veremos a seguir.

5.2.1 Campo magnético criado por condutor retilíneo

O campo magnético gerado por um fio retilíneo extenso é tal, que as linhas de indução são circunferências concêntricas, tendo como centro o próprio fio. O sentido desse campo magnético pode ser obtido pela regra da mão direita, aplicada conforme a Figura 5.2. O polegar é colocado no sentido convencional da corrente e os outros dedos que envolvem o condutor, indicam o sentido de \vec{B} .

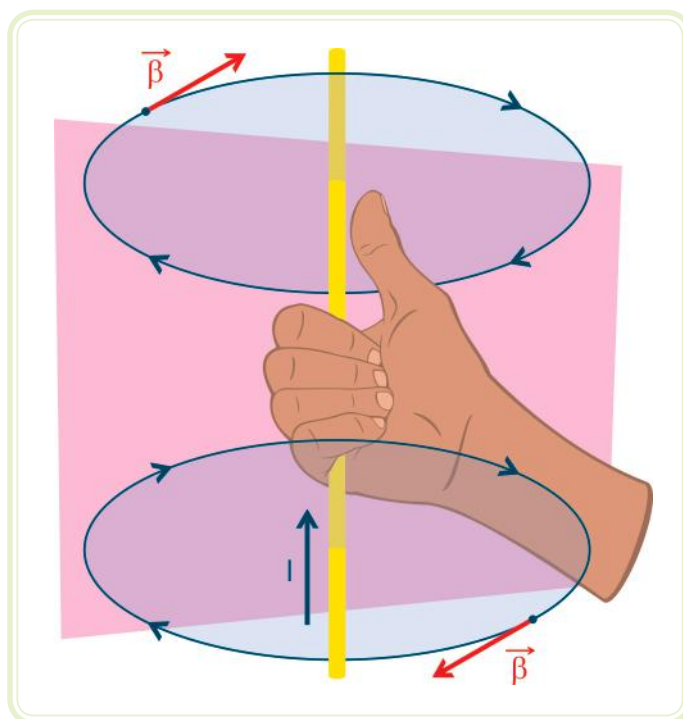


Figura 5.2: Regra da mão direita

Fonte: CTISM

Num determinado ponto P do campo magnético, o vetor β pode ser representado num plano que seja perpendicular ao condutor e que contenha o ponto P. Observe que β é tangente à circunferência que contém o ponto P. Nessas condições, a intensidade de β pode ser determinada pela relação:

$$\beta = \frac{\mu_0 \cdot I}{2 \cdot d}$$

Onde:

μ_0 : permeabilidade magnética do meio, no caso, o vácuo

I : corrente

d : distância do ponto P ao fio

5.2.2 Campo magnético criado por espira circular

Espira circular é um fio condutor em forma de circunferência. A Figura 5.3 mostra o aspecto do campo magnético gerado por esse tipo de condutor.

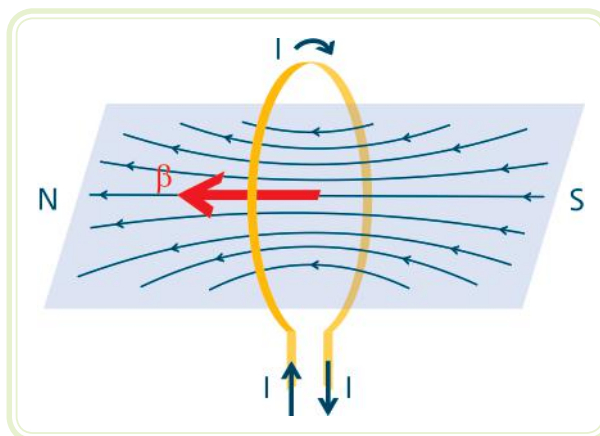


Figura 5.3: Campo magnético criado por espira circular

Fonte: CTISM

Os polos norte e sul da espira circular são determinados, respectivamente, pelas saída e entrada das linhas de indução. Para relacionar o sentido do vetor \vec{B} com o sentido da corrente I , utiliza-se a regra da mão direita, conforme a Figura 5.4.

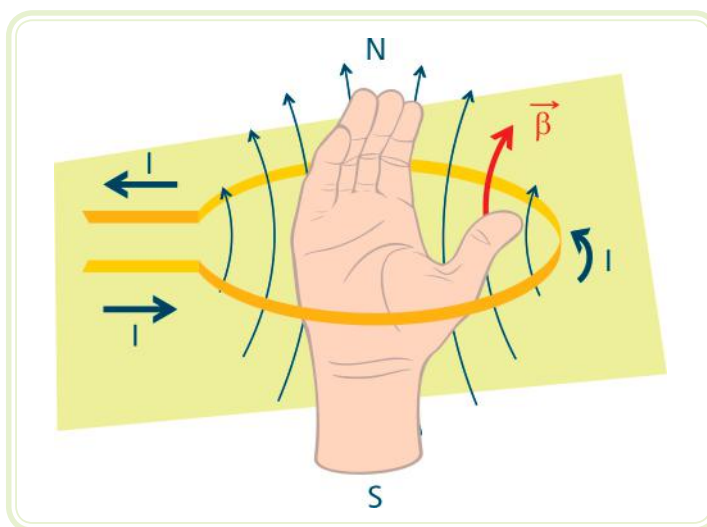


Figura 5.4: Polaridade magnética em uma espira

Fonte: CTISM

A intensidade de β é dada pela relação:

$$\beta = \frac{\mu_0 \cdot I}{2 \cdot r}$$

Onde: r é o raio da espira.

5.2.3 Campo magnético criado por bobina

Uma bobina (solenóide) é constituída por um fio enrolado várias vezes, tomando uma forma cilíndrica, conforme a Figura 5.5. Cada uma das voltas do fio da bobina é denominada uma espira.

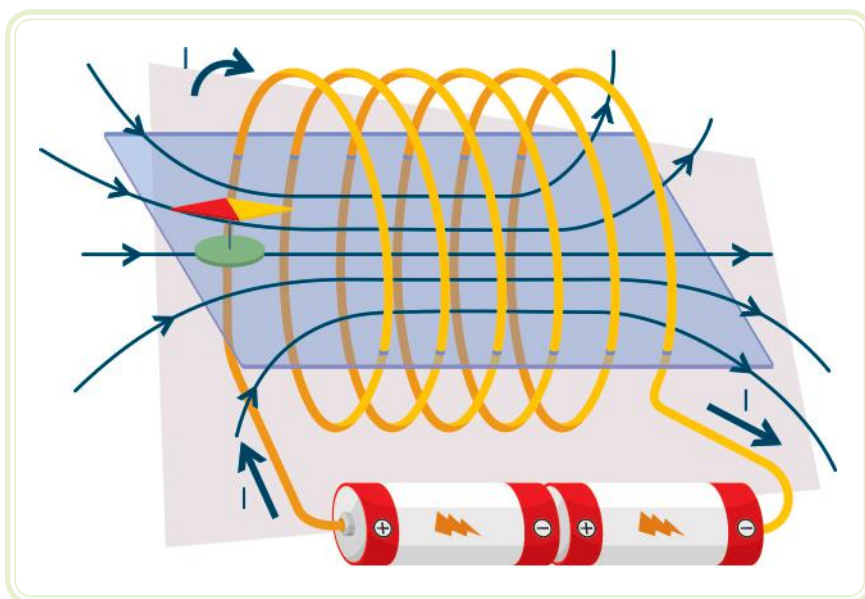


Figura 5.5: Campo magnético criado por uma bobina

Fonte: CTISM

Desta forma, considerando as espiras muito próximas e desprezando o comprimento da bobina, temos:

$$\beta = N \cdot \frac{\mu_0 \cdot I}{2 \cdot r}$$

Se inserirmos um núcleo ferromagnético em uma bobina, teremos um eletroímã cuja polaridade pode ser determinada, aplicando-se a regra da mão direita, conforme a Figura 5.6.

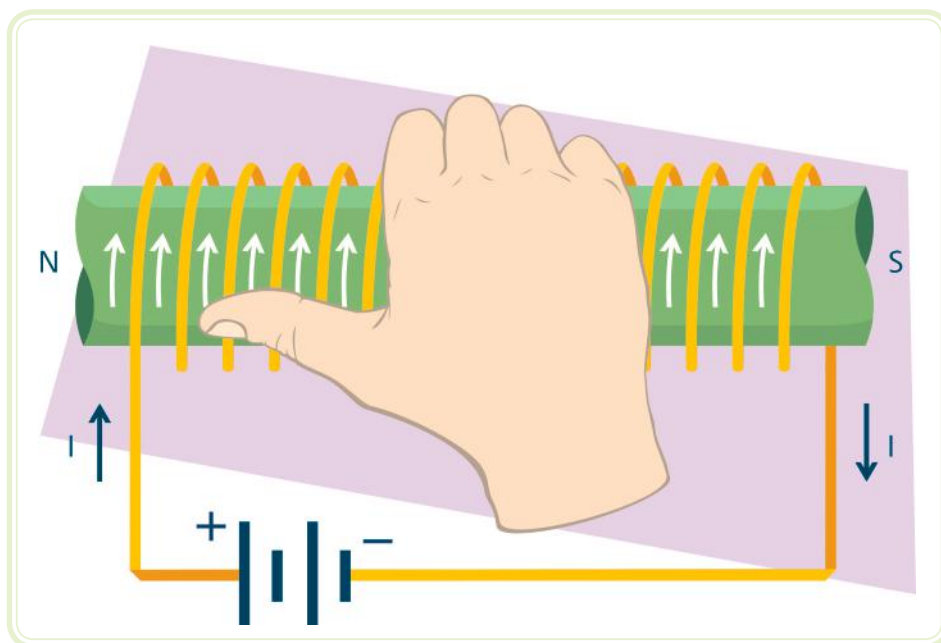


Figura 5.6: Princípio do eletroímã

Fonte: CTISM

5.3 Circuitos magnéticos

5.3.1 Força magnetomotriz

A força magnetomotriz (fmm) de uma bobina é a força produtora de campo magnético. A fmm depende da corrente elétrica (I) e do número de espiras (N) da bobina. Sua unidade é o *Ampère-espira* (Ae).

$$fmm = N \cdot I$$

5.3.2 Intensidade de campo magnético (H)

A intensidade de campo magnético é inversamente proporcional ao comprimento da bobina e diretamente proporcional ao número de espiras desta bobina e à corrente que a percorre. A unidade da intensidade magnética em circuitos magnéticos é Ae/m.

$$H = \frac{N \cdot I}{l}$$

Onde: l é o comprimento da bobina.

Se o núcleo ferromagnético do eletroímã for maior que o comprimento da bobina, l será então o comprimento do núcleo, uma vez que este é parte integrante do eletroímã.

5.3.3 Lei de *Ohm* para circuitos magnéticos

Considere o circuito magnético da Figura 5.7 composto de um núcleo ferro-magnético e de uma bobina. A Lei de *Ohm* para circuitos magnéticos pode ser expressa por:

$$\phi = \frac{fmm}{\mathfrak{R}}$$

Onde:

ϕ : fluxo magnético (Wb)

fmm: força magnetomotriz (Ae)

\mathfrak{R} : relutância (Ae/Wb)

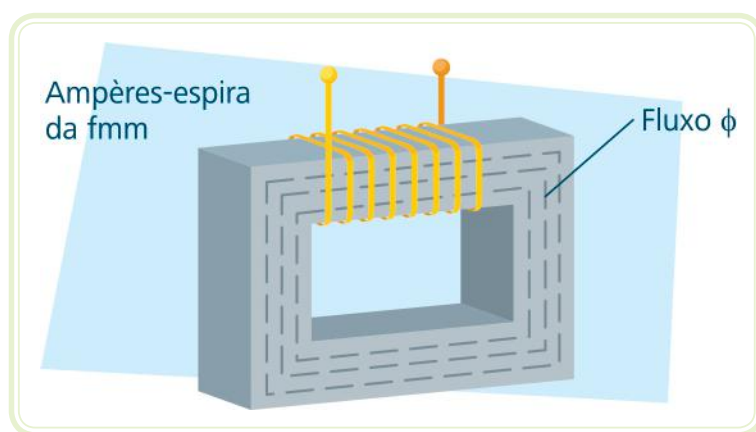


Figura 5.7: Circuito magnético

Fonte: CTISM

5.4 Força magnética

5.4.1 Força magnética numa carga em movimento

Cargas elétricas em movimento originam campo magnético. Estando a carga elétrica em movimento, em um campo magnético, há uma interação entre esse campo e o originado pela carga. Essa interação manifesta-se por forças que agem na carga elétrica que são denominadas forças magnéticas.

O valor da força magnética, assim como seu sentido, depende do tipo de carga (positiva ou negativa), de seu valor, do campo magnético externo ao da carga e da forma com que esta carga é lançada no campo magnético externo.

Para a determinação do sentido da força magnética em uma carga elétrica em movimento num campo magnético externo, utiliza-se a regra da mão direita (Figura 5.8), onde se coloca os dedos no sentido do campo magnético \vec{B} e o polegar no sentido do movimento da carga (vetor velocidade \vec{v}). Se a carga for positiva, a força \vec{F} sai da palma da mão; se negativa, a força \vec{F} sai do dorso da mão.

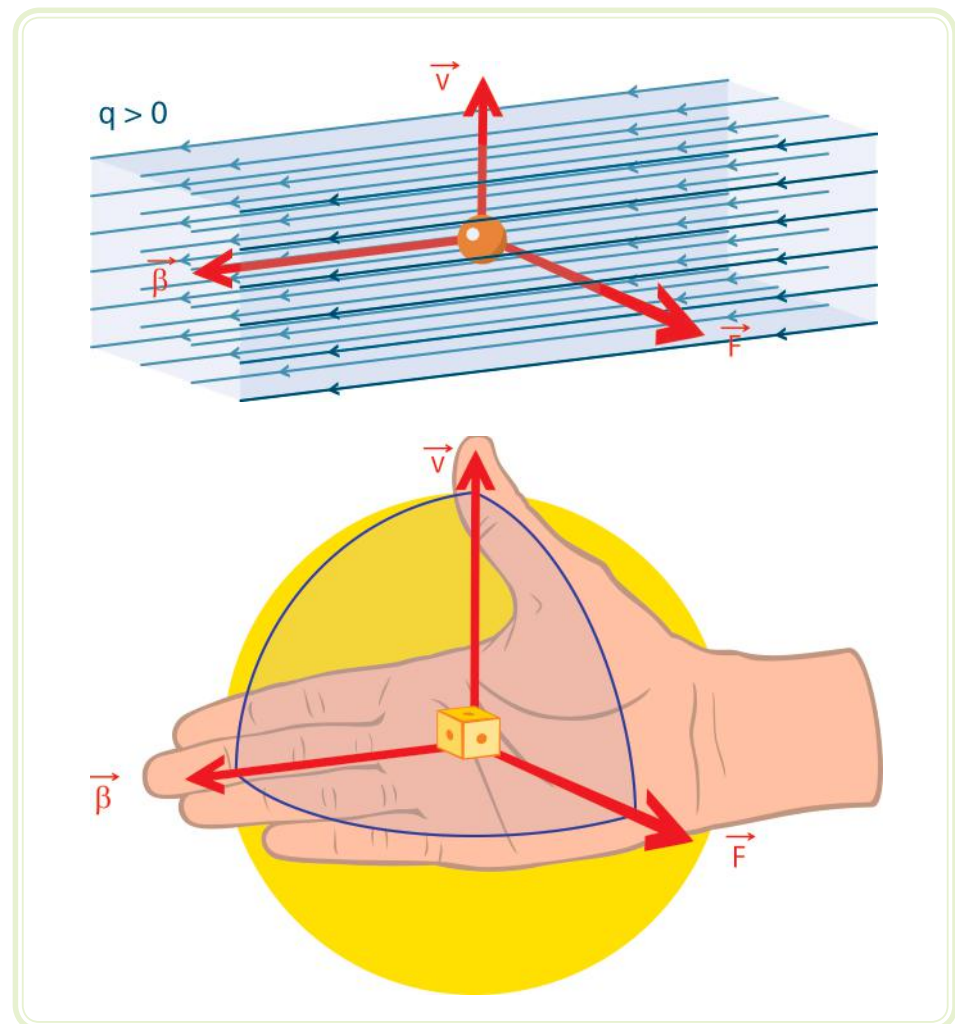


Figura 5.8: Sentido da força magnética

Fonte: CTISM

Matematicamente, a força magnética é dada por

$$F = B \cdot q \cdot v \cdot \sin(\theta)$$

Onde:

β : vetor indução magnética (*Tesla*)

q : carga elétrica (*Coulomb*)

v : velocidade (m/s)

θ : ângulo entre o campo e o vetor velocidade

Observa-se que, se a carga se deslocar na direção paralela a β , não ficará sujeita à ação de nenhuma força, pois o ângulo entre β e v é 0° . Entretanto, se a carga se deslocar em uma direção perpendicular ao vetor β , ficará sujeita à ação de uma força magnética F máxima, pois o ângulo entre β e v é 90° .

5.4.2 Força magnética num condutor percorrido por corrente

“Em todo condutor percorrido por corrente e imerso num campo magnético de tal forma a cortar suas linhas de fluxo magnético, surge uma força magnética”.

O sentido dessa força é dado pela regra da mão direita conforme Figura 5.9, e o valor da força é dado por:

$$F = \beta \cdot I \cdot l \cdot \text{sen}(\theta)$$

Onde:

β : vetor indução magnética

I : corrente elétrica (*Ampère*)

l : comprimento do condutor imerso no campo

θ : ângulo entre β e a corrente I

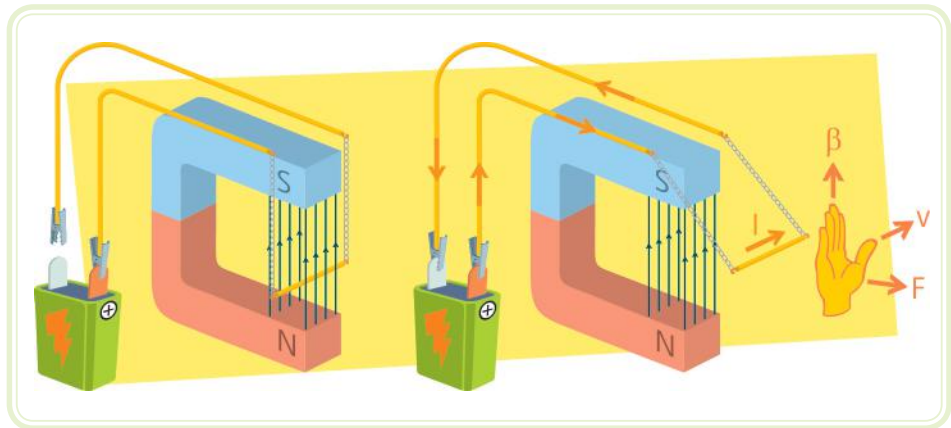


Figura 5.9: Força magnética num condutor percorrido por corrente
 Fonte: CTISM

Essa força magnética é usada para fazer funcionar um grande número de aparelhos elétricos como os medidores (amperímetros e voltímetros), bem como motores elétricos, conforme a Figura 5.10.

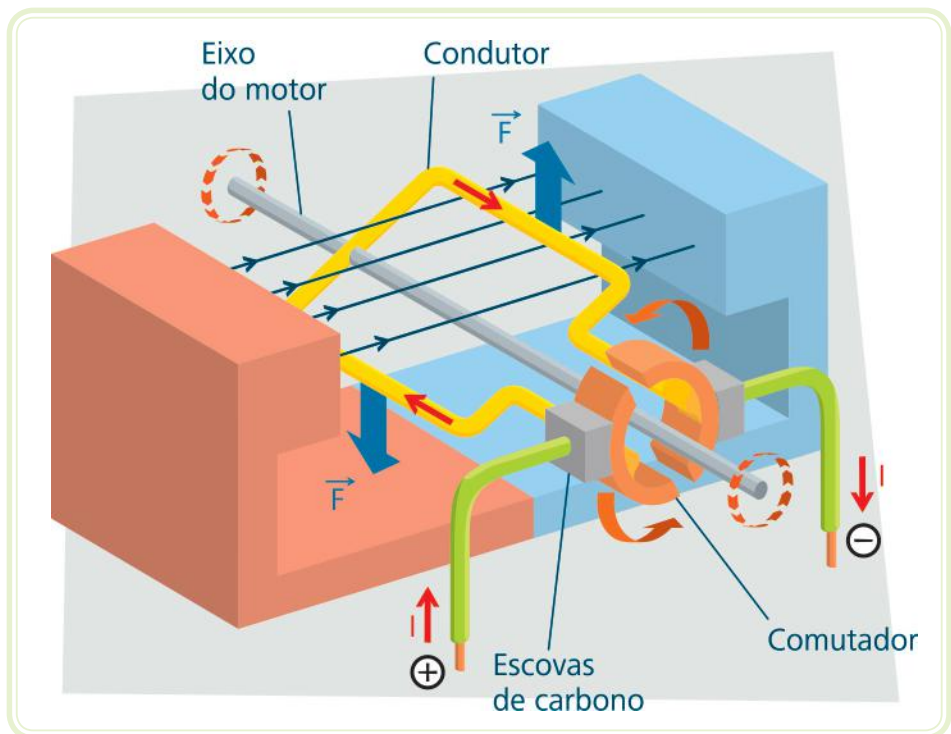


Figura 5.10: Motor elétrico CC elementar
 Fonte: CTISM

5.4.3 Força magnética entre dois condutores retilíneos percorridos por corrente

A Figura 5.11 mostra dois condutores retilíneos de comprimento l paralelos um ao outro, há uma distância d e percorridos por correntes elétricas de intensidades I_1 e I_2 , de mesmo sentido e sentidos opostos.

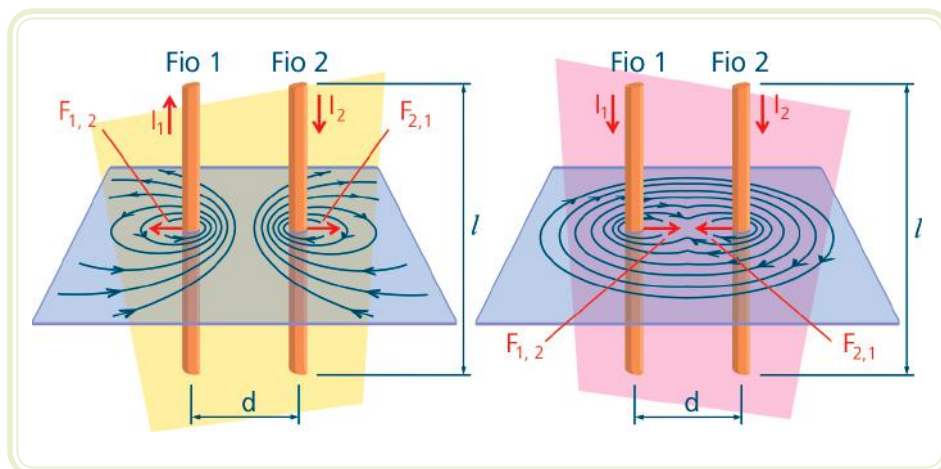


Figura 5.11: Força magnética entre dois condutores

Fonte: CTISM

Observe que um condutor está imerso no campo magnético criado pelo outro e que, em cada condutor aparece uma força magnética F , respectivamente perpendicular a eles. Essa força magnética é de atração, quando as correntes elétricas paralelas têm o mesmo sentido; de repulsão, quando as correntes elétricas paralelas têm os sentidos opostos.

De acordo com a lei da ação e reação $F_{1,2} = F_{2,1}$:

$$F_{1,2} = \frac{\mu_0 \cdot I_1 \cdot I_2}{2 \cdot \pi \cdot d} = F_{2,1}$$

5.4.4 Força eletromotriz induzida (femi) – Lei de Faraday

Faraday descobriu que pode-se produzir corrente elétrica a partir de um campo magnético, através da realização de uma experiência bem simples. Construiu uma bobina de fio de cobre isolado e a partir dela montou um circuito com chave, colocando uma bússola próxima ao circuito, conforme a Figura 5.12.

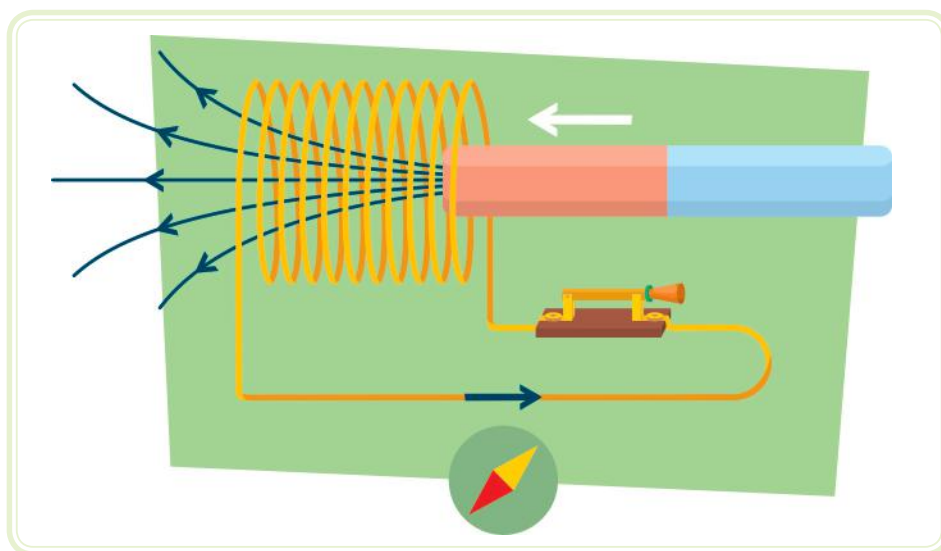


Figura 5.12: Força eletromotriz induzida

Fonte: CTISM

Mantendo a chave fechada, Faraday variou o campo magnético através da movimentação do ímã para o interior e para fora da bobina, observando uma deflexão na agulha da bússola. Entretanto, parando o movimento do ímã, aproximando-se ou afastando-se, a agulha da bússola voltava ao normal.

Sabendo que a variação do campo magnético do indutor sobre a bobina variava o seu fluxo magnético, Faraday deduziu que esta variação do fluxo magnético induzia uma ddp nos terminais da bobina, produzindo uma corrente elétrica.

Ao fenômeno da produção de corrente elétrica por um campo magnético variável, dá-se o nome de **indução eletromagnética**. À corrente elétrica, assim gerada, nominamos de corrente induzida.

Dessa forma, podemos enunciar a Lei de *Faraday*:

“Em todo condutor imerso num fluxo magnético variado, surge uma força eletromotriz induzida (femi)”.

A corrente induzida pode ser gerada através da variação da posição da bobina em relação a um ímã estático. Essa constatação permitiu a geração de energia elétrica, conforme os princípios atuais.

5.4.5 Sentido da força eletromotriz induzida (Femi) – Lei de Lenz

“O sentido da corrente induzida é tal que, por seus efeitos, opõe-se a causa que lhe deu origem”.



Lei de Lenz:
<http://www.youtube.com/watch?v=bkssgtqoxvi>

5.5 Indutância de uma bobina

A indutância é a grandeza que relaciona a variação do fluxo em seu interior à variação da corrente aplicada. Ela depende do meio, do número de espiras, da área da bobina e de seu comprimento.

$$L = \frac{\mu \cdot N^2 \cdot A}{l}$$

$$L = N \cdot \frac{\Delta\phi}{\Delta i}$$

Símbolo:



A unidade de indutância é o *Henry* (H).

5.6 Força eletromotriz autoinduzida (femai)

No circuito da Figura 5.13, circula a corrente i , que origina o campo B . Este campo determina o fluxo magnético ϕ_a através da espira, denominado fluxo autoinduzido. Verificou-se, experimentalmente, que ϕ_a é diretamente proporcional à indutância da bobina e à intensidade de corrente i .

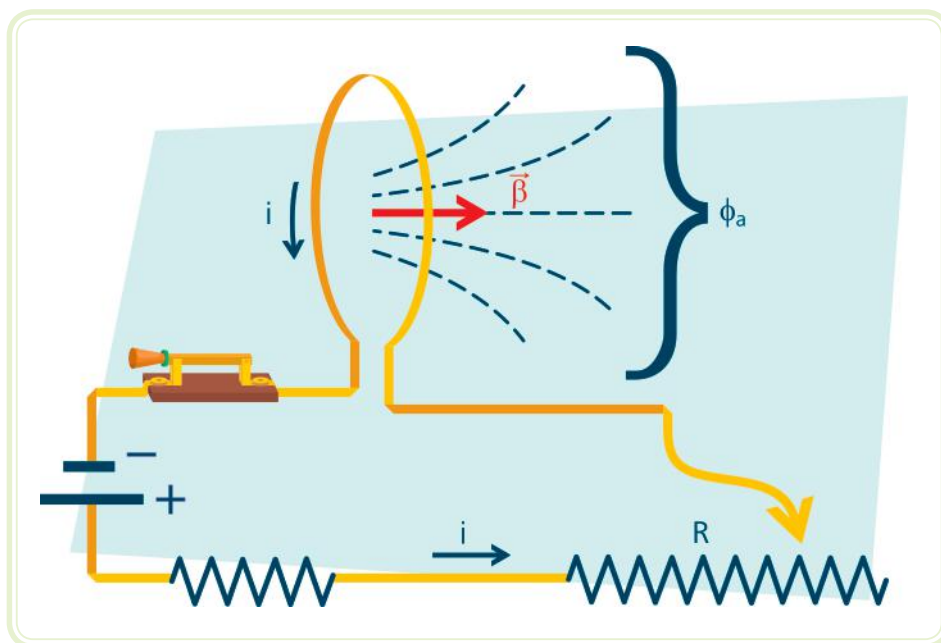


Figura 5.13: Força eletromotriz autoinduzida (femai)

Fonte: CTISM

Conforme a Figura 5.13, mudando-se a posição do cursor no reostato, variamos i e, conseqüentemente, ϕ_a . Dessa forma, aparece uma femai no próprio circuito que, por sua vez, é ao mesmo tempo circuito indutor e circuito induzido. A este fenômeno denominamos autoindução.

$$\text{femai} = -N \cdot \frac{\Delta\phi}{\Delta t} = -L \cdot \frac{\Delta i}{\Delta t}$$



Arco voltaico:
http://efisica.if.usp.br/moderna/conducao-gas/cap1_06/

O fenômeno da auto-indução pode ser observado quando do fechamento e abertura de um circuito indutivo em corrente contínua, através de uma chave. No momento do fechamento do circuito, a femai opõe-se ao crescimento da corrente, fazendo com que a mesma demore para atingir seu valor máximo (regime transitório). Quando a corrente atinge um valor constante, não há variação de fluxo magnético e, portanto, não há femai (regime permanente). Já no momento da abertura do circuito, a femai opõe-se ao crescimento da corrente, fazendo com que esta demore para atingir o valor zero, produzindo um faiscamento nos contatos da chave, devido à circulação de corrente por um pequeno intervalo de tempo, mesmo após sua abertura. Este faiscamento recebe o nome de arco voltaico. Dessa forma, mesmo sem a fonte de alimentação, a corrente demora para ser eliminada. Isto se deve à descarga da energia armazenada no indutor, sob forma de campo magnético.

5.7 Correntes de *Foucault*

O cubo de cobre da Figura 5.14 está submetido a um campo magnético variável. Dentro desse cubo, pode-se encontrar grande número de percursos fechados, como aquele que se destaca na figura. Em cada percurso fechado, o fluxo magnético varia com o tempo e, portanto, fem induzidas fazem circular, no interior do cubo, correntes induzidas, chamadas correntes de *Foucault* ou correntes parasitas.

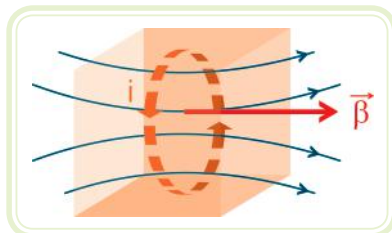


Figura 5.14: Correntes de *Foucault*

Fonte: CTISM

Esse fenômeno deve ser minimizado na construção de transformadores e motores. Para tanto, os núcleos metálicos são compostos de diversas lâminas, que lhes aumentam a resistência elétrica dos mesmos e diminuem as correntes parasitas ou correntes de *Foucault*.

A principal aplicação desse fenômeno é na construção dos fornos de indução onde uma peça metálica se funde devido ao efeito *Joule* originado pelas correntes de *Foucault*.

5.8 Transformador

O transformador é um dispositivo que permite modificar a amplitude de uma tensão alternada, aumentando-a ou diminuindo-a. Consiste essencialmente em duas bobinas isoladas eletricamente, montadas em um mesmo núcleo de ferro, conforme a Figura 5.15.

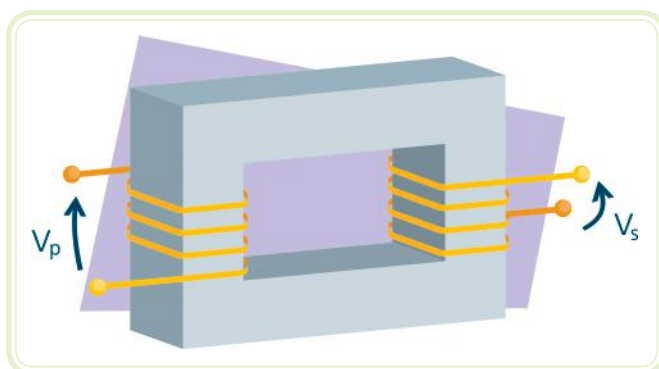


Figura 5.15: Transformador

Fonte: CTISM



Transformadores:

http://pt.wikipedia.org/wiki/transformador#transformador_ideal



Transformadores:

http://pt.wikipedia.org/wiki/transformador#transformador_ideal

A bobina que recebe a tensão a ser transformada (V_p) denomina-se primária, a que fornece a tensão transformada (V_s) denomina-se secundária.

Para um transformador ideal, temos:

$$\frac{V_p}{V_s} = \frac{N_p}{N_s} = \frac{I_s}{I_p}$$

Resumo

Nesta aula estudamos a relação entre o magnetismo e a eletricidade e as leis que regem os fenômenos eletromagnéticos. O eletromagnetismo está diretamente relacionado à geração, transmissão, distribuição e utilização da energia elétrica e corrente alternada.



Atividades de aprendizagem

1. Qual a relação existente entre circuitos elétricos e magnéticos?
2. Descreva os aspectos dos campos magnéticos criados por um fio retilíneo e por uma espira circular.
3. Defina eletroímã explicando seu princípio de funcionamento e polaridade.
4. Enuncie as Leis de *Faraday* e *Lenz*.
5. O que é arco voltaico? Quais suas consequências? Como podemos reduzir seus efeitos?
6. Explique o que são e como surgem as correntes de *Foucault*. Quais suas desvantagens em máquinas elétricas? Como podemos reduzi-las?
7. Explique o princípio básico de funcionamento de um transformador.
8. Por que um transformador não funciona em corrente contínua?
9. Explique o princípio de funcionamento de um motor de corrente contínua elementar.

Aula 6 – Corrente alternada

Objetivos

Reconhecer as vantagens da energia elétrica diante de outras modalidades energéticas, identificando as suas formas de geração.

Reconhecer as vantagens dos sistemas elétricos em CA, bem como compreender os fenômenos eletromagnéticos que os envolvem.

Analisar e interpretar circuitos elétricos monofásicos em CA, diferenciando as formas de representação das grandezas elétricas.

Empregar a nomenclatura técnica no estudo e interpretação da eletricidade em CA.

A história da eletricidade teve início há muito tempo. Entretanto, os sistemas de potência para geração, transmissão e distribuição de energia elétrica iniciaram a pouco mais de um século, a partir de 1882, com o sistema em corrente contínua (CC) desenvolvido por Thomas Alva Edison e a partir de 1886, com o sistema em corrente alternada (CA), desenvolvido por George Westinghouse e Nikola Tesla.

Os sistemas em CC apresentaram dificuldades com o aumento da demanda e no atendimento de clientes a longas distâncias. Já o sistema em CA possibilita o uso de transformadores elevando ou rebaixando os níveis de tensão, permitindo o transporte de energia a longas distâncias com reduzidas perdas e menores investimentos na construção de redes elétricas. Dessa forma, sistemas em CA se multiplicaram rapidamente, sendo utilizados mundialmente nas etapas de geração, transmissão, distribuição e utilização de energia elétrica.



Histórico da corrente alternada:
http://pt.wikipedia.org/wiki/Corrente_alternada



Assista um vídeo introdutório sobre corrente alternada:
http://br.youtube.com/watch?v=pT_DEQ0Th4I

6.1 Energia elétrica

A energia elétrica é uma modalidade de energia obtida a partir da transformação da energia de fontes primárias disponíveis no planeta. No atual estágio de desenvolvimento, a energia elétrica se destaca diante das demais modalidades energéticas devido, principalmente, aos seguintes fatores:

- É facilmente transportável, podendo ser produzida no local mais conveniente e transmitida para consumidores distantes por uma simples rede de condutores (fios).
- É facilmente transformável em outras formas de energia: calor, luz, movimento, etc.
- É o elemento fundamental para a ocorrência de muitos fenômenos físicos e químicos que formam a base de operação de máquinas e equipamentos modernos.



Como qualquer outra forma de energia, a modalidade elétrica deve obedecer ao princípio da conservação de energia. Assim, quando dizemos geração de energia elétrica, devemos entender como uma transformação de outra forma de energia em energia elétrica.

6.2 Gerador de corrente alternada

Os geradores CA, também denominados alternadores, são máquinas destinadas a converter energia mecânica em energia elétrica. A transformação de energia nos geradores fundamenta-se nas Leis de *Faraday* e *Lenz*.



Geração de energia elétrica:
http://br.wikipedia.org/wiki/energia_el%C3%A9trica

Os alternadores pertencem à categoria das máquinas síncronas, isto é, máquinas cuja rotação é diretamente relacionada ao número de polos magnéticos e a frequência da força eletromotriz.

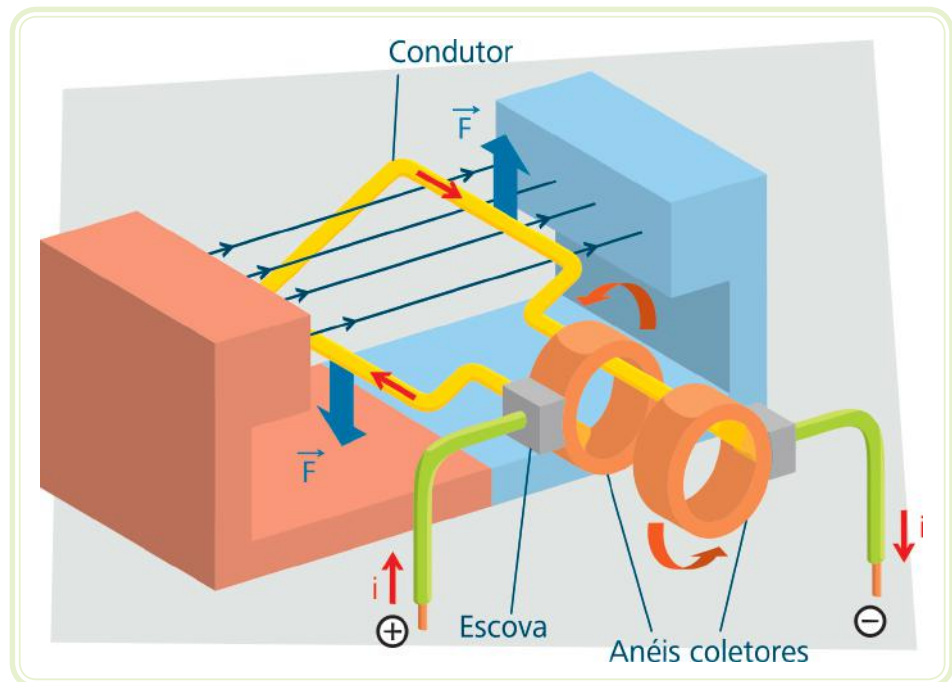


Figura 6.1: Gerador monofásico CA elementar

Fonte: CTISM

O gerador elementar monofásico de CA, concebido por Michael Faraday em 1831, na Inglaterra, e aproximadamente na mesma época por Joseph Henry, nos Estados Unidos, é constituído por uma espira que girava entre os polos de um ímã, semelhante à Figura 6.1.

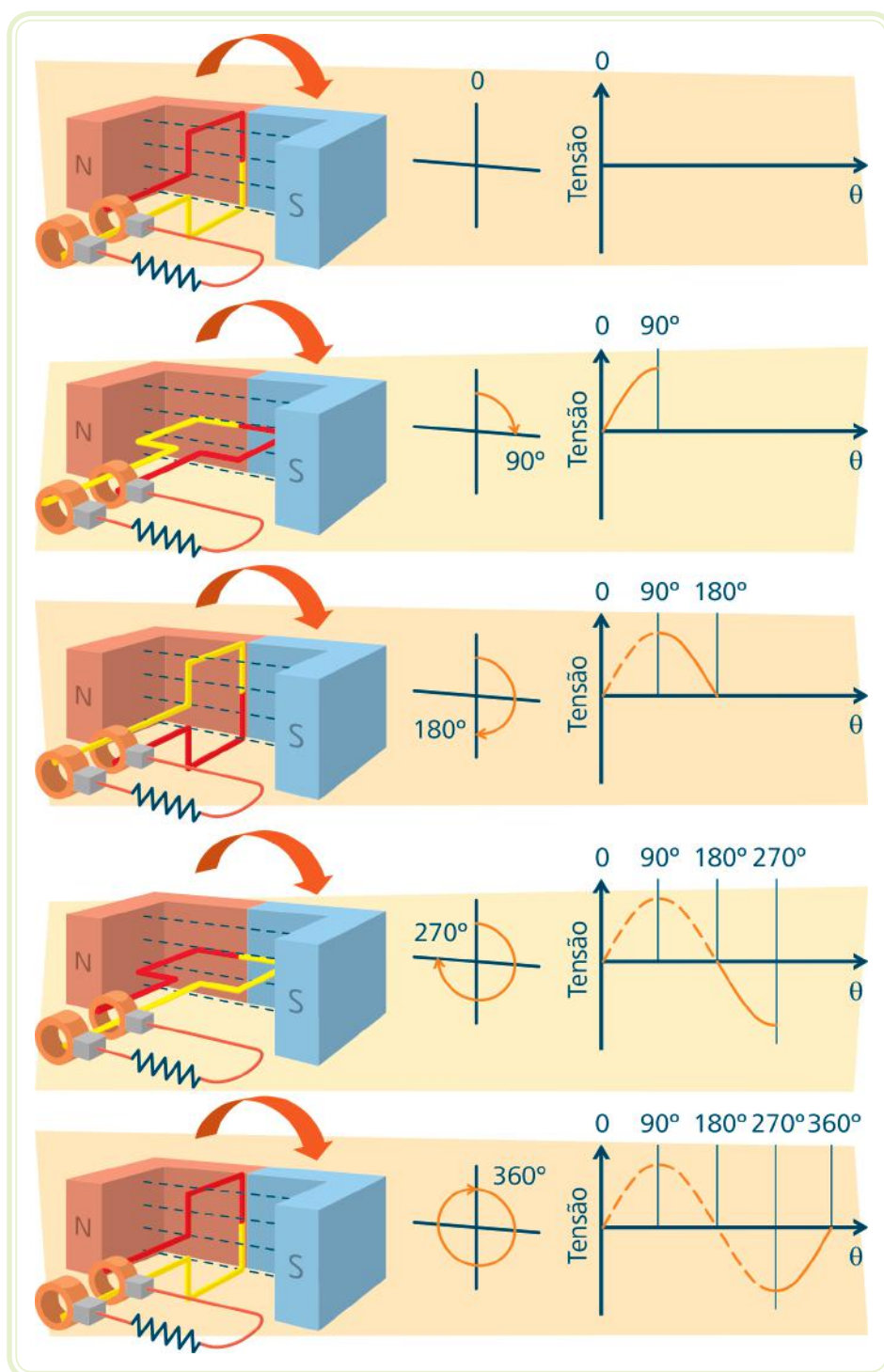


Figura 6.2: Tensão de saída de um gerador CA elementar

Fonte: CTISM



Assista a animação do funcionamento de um gerador elementar:
<http://www.if.ufrgs.br/tex/fis01043/20011/Vasco/index.html>

No gerador monofásico elementar, uma espira de fio girando em um campo magnético produz uma femi. Os terminais da bobina são ligados ao circuito externo por meio dos anéis coletores e escovas. A força eletromotriz e a corrente de um gerador elementar mudam de direção cada vez que a espira gira 180°. A tensão de saída deste gerador é alternada do tipo senoidal, conforme mostra a Figura 6.2, para uma volta completa da espira.

Faraday estabeleceu, ainda, que os valores instantâneos da força eletromotriz (ou tensão) podiam ser calculados pela relação:

$$e = \beta \cdot l \cdot v \cdot \sin(\theta)$$

Onde:

e: força eletromotriz induzida

β : indução do campo magnético

l : comprimento do condutor

v : velocidade linear de deslocamento do condutor

θ : ângulo formado entre β e v

O campo magnético das Figuras 6.1 e 6.2 é constituído por ímãs naturais. Para que seja possível controlar tensão e corrente em um alternador, o campo magnético é produzido por ímãs artificiais (eletroímãs), formados por bobinas alimentadas com corrente contínua.

6.3 Definições em corrente alternada

6.3.1 Período

A forma de onda da tensão gerada por um gerador CA é cíclica, isto é, seus valores se repetem periodicamente. O tempo necessário para que a onda senoidal complete um ciclo é chamado de período (T), dado em segundos (s).

6.3.2 Frequência

A frequência (f) de um sinal senoidal corresponde ao número de ciclos no intervalo de tempo de 1 s. Dessa forma $f = 1/T$ e $T = 1/f$. Unidade: $1/s = \text{Hz}$.

6.3.3 Velocidade angular

A velocidade angular (ω) de um sinal senoidal mede a taxa de variação de seus valores cíclicos. A velocidade angular depende da frequência da onda senoidal conforme a equação $\omega = 2 \cdot \pi \cdot f$ ou $\omega = 2 \cdot \pi / T$. Unidade: rad/s.

6.3.4 Valor de pico

O valor de pico (V_p) é o máximo valor que uma grandeza pode assumir. Também é conhecido como valor máximo ou valor de crista. Os valores compreendidos entre o pico de máximo positivo e o de máximo negativo são chamados de valor pico a pico ($V_{pp} = 2 \cdot V_p$).

6.3.5 Valor médio

O valor médio (V_m) de uma grandeza senoidal, quando considerado de um período inteiro, é nulo, pois a soma dos valores instantâneos relativa à semionda positiva é igual à negativa, sendo sua resultante constantemente nula. Por essa razão, o valor médio de uma grandeza alternada senoidal deve ser considerado como a média aritmética dos valores instantâneos no intervalo de meio período. Matematicamente $V_m = 0,637 \cdot V_p$.

6.3.6 Valor eficaz

O valor eficaz (V_{ef}) de uma grandeza senoidal, também chamado de valor rms está relacionado ao seu desempenho na produção de trabalho, se comparado a uma grandeza contínua. Assim, se conectarmos duas resistências iguais a duas fontes diferentes, uma CC e outra CA, percebemos que, para ambas as resistências apresentarem os mesmos efeitos térmicos, a tensão de pico da grandeza CA senoidal deverá ser aproximadamente 41,42% maior que a tensão contínua CC. Isso significa que a potência média de uma fonte CC de 220 V corresponde à de uma fonte CA senoidal com V_p de aproximadamente 311,12 V. Dessa forma, dizemos que essa fonte CA possui uma tensão eficaz de 220 V, pois seus efeitos térmicos equivalem aos da fonte CC. Matematicamente, $V_{ef} = V_p / \sqrt{2} \approx 0,707 \cdot V_p$. A Figura 6.3 diferencia os valores de pico, pico a pico, médio e eficaz de um sinal senoidal.



Assista um filme de um experimento prático conceituando valor eficaz:
<http://br.youtube.com/watch?v=nxpsgrkorlu>



Definição matemática de valor eficaz ou rms:
http://pt.wikipedia.org/wiki/valor_eficaz

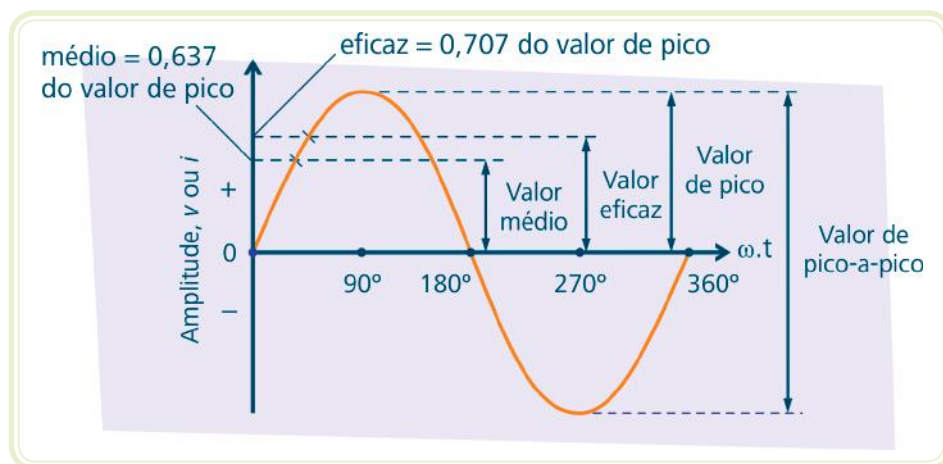


Figura 6.3: Valores de um sinal senoidal

Fonte: CTISM

6.3.7 Ângulo de fase

O ângulo de fase ϕ entre duas formas de onda de mesma frequência é a diferença angular num dado instante. Por exemplo, o ângulo de fase entre as ondas A e B da Figura 6.4 é de 90° carregado positivamente.

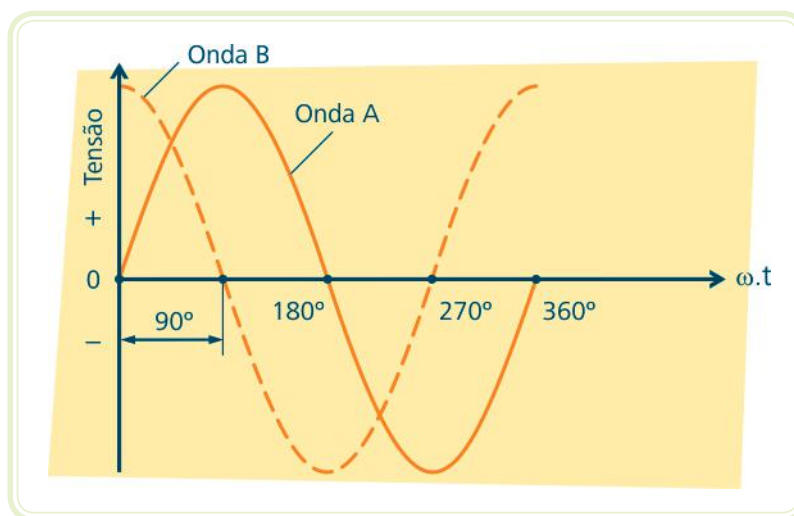


Figura 6.4: Ângulo de fase entre duas ondas senoidais

Fonte: CTISM



Observe a Figura 6.4 no instante 90°. O eixo horizontal corresponde à unidade de tempo representada em graus elétricos (360° = T segundos). A onda B começa com seu valor máximo e cai para zero em 90°, enquanto a onda A começa em zero e cresce até seu valor máximo em 90°. A onda B atinge seu valor máximo 90° na frente da onda A, logo a onda B está adiantada relativamente à onda A de 90°. Este ângulo de fase de 90° entre as ondas A e B é

mantido durante o ciclo completo e todos os ciclos sucessivos. Em qualquer instante, a onda B passa pelo valor que a onda A passará 90° depois.

6.4 Formas de representação de grandezas senoidais

6.4.1 Forma de onda

Representa graficamente a variação do sinal senoidal em função do tempo. A Figura 6.5 mostra a representação por forma de onda de duas tensões senoidais, A e B.

A representação por forma de onda permite identificar todos os valores característicos de um sinal senoidal, tais como período, frequência, velocidade angular, valor de pico, valor médio e valor eficaz e, no caso da Figura 6.5, o ângulo de fase entre as tensões A e B.

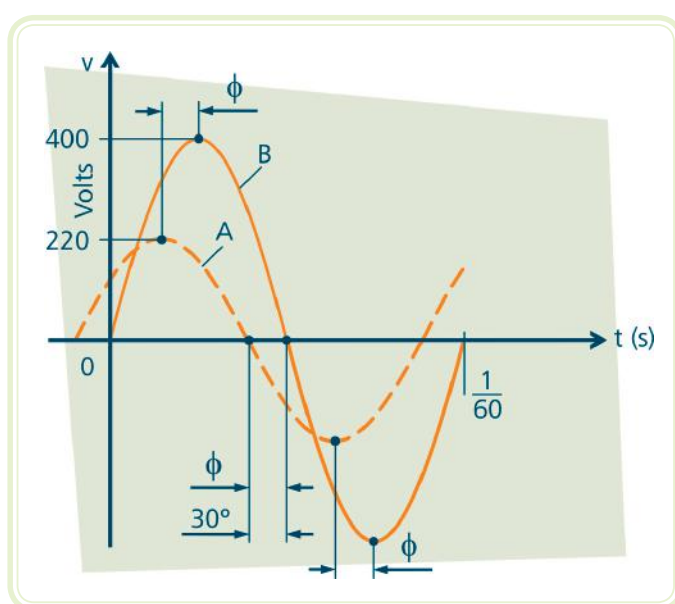


Figura 6.5: Representação por forma de onda

Fonte: CTISM

6.4.2 Diagrama fasorial

Essa forma utiliza fasores que representam as grandezas senoidais. O termo fasor equivale a um vetor, com módulo, direção e sentido, porém os vetores possuem valores fixos, enquanto nos fasores os valores se alteram ciclicamente. Essa variação pode ser observada através da Figura 6.6.



Assista um vídeo sobre a geração de corrente alternada e suas representações:
<http://br.youtube.com/watch?v=2bqlbziof98>

Fasores e números complexos:
http://www.dee.ufc.br/~rleao/circuitos/circii_2.pdf

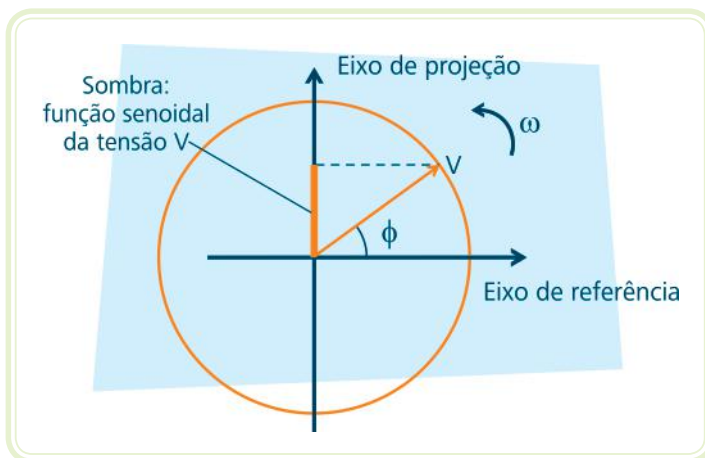


Figura 6.6: Definição de fasor

Fonte: CTISM

O módulo do fasor corresponde ao valor de pico. Os valores instantâneos da grandeza senoidal representada correspondem à sombra do fasor no eixo de projeção. A velocidade angular ω mede a taxa de variação da projeção do fasor.



Identifique na Figura 6.6 o vetor V . Imagine agora o vetor V com seu ponto inicial fixo, enquanto seu ponto final gira em movimento circular uniforme. Um vetor dotado desse movimento é chamado de fasor e cada volta completa representa um ciclo senoidal. A Figura 6.7 mostra as tensões senoidais da Figura 6.5 representadas através de fasores. Essa representação também permite identificar todos os valores das referidas tensões.

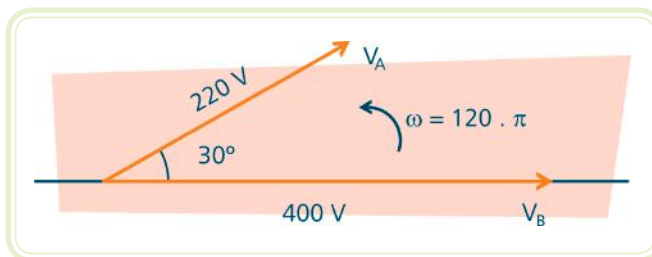


Figura 6.7: Representação por diagrama fasorial

Fonte: CTISM

6.4.3 Expressão trigonométrica

Representa sob forma de função trigonométrica os sinais senoidais. Para o exemplo das Figuras 6.5 e 6.7 temos:

$$v_A = 220 \cdot \text{sen} (120 \cdot \pi \cdot t + 30^\circ) \text{ [V]}$$

$$v_B = 400 \cdot \text{sen} (120 \cdot \pi \cdot t) \text{ [V]}$$

A expressão trigonométrica também permite identificar todos os valores das referidas tensões. O v minúsculo na função representa que seu resultado trata-se de um valor instantâneo, que varia em função do tempo.



Na representação por números complexos não é possível identificar a frequência que deve ser informada separadamente. O valor indicado corresponde ao módulo do fasor, e, portanto, o valor de pico. Entretanto, devido ao valor eficaz ser o mais utilizado, a representação por números complexos também pode indicar o valor eficaz, dependendo da informação dada. No caso em estudo, a unidade V_p informa ser um valor de pico. De modo geral, quando não for informado o tipo de valor, trata-se de um valor eficaz.

6.4.4 Representação por números complexos

Representa os sinais senoidais através de números complexos na forma polar. Para o exemplo das Figuras 6.5 e 6.7 temos:

$$V_A = 220 \angle 30^\circ [V_p]$$

$$V_B = 400 \angle 0^\circ [V_p]$$

$$f = 60 \text{ Hz}$$

6.5 Tipos de cargas em circuitos CA

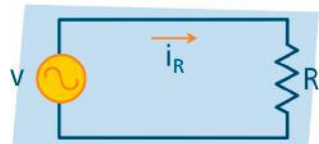
6.5.1 Cargas resistivas puras

Em um circuito resistivo puro em CA, as variações na corrente ocorrem em fase (ângulo de fase igual a zero) com a tensão aplicada. A Figura 6.8 mostra um circuito resistivo puro em CA, bem como a tensão e corrente do circuito, representadas pelas formas de onda, expressões trigonométricas, diagrama fasorial e números complexos.

Apesar da definição matemática de fasor envolver a representação dos valores de pico no diagrama fasorial, tecnicamente também se utiliza a representação dos valores eficazes, uma vez que estes são mais utilizados em eletricidade.



Circuito resistivo puro:



Expressões trigonométricas:

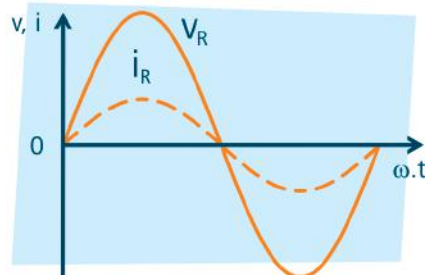
$$v_R = V_p \cdot \text{sen}(\omega \cdot t)$$

$$i_R = \frac{V_p}{R} \cdot \text{sen}(\omega \cdot t) = I_p \cdot \text{sen}(\omega \cdot t)$$

Diagrama fasorial:



Formas de onda:



Números complexos:

$$V_R = V_p \angle 0^\circ [V_p]$$

$$I_R = I_p \angle 0^\circ [A_p]$$

Figura 6.8: Representações da corrente e tensão de um circuito resistivo puro

Fonte: CTISM

6.5.1.1 Potência em cargas resistivas puras

Ao contrário de circuitos em CC, onde a potência é constante em função do tempo, nos circuitos CA a potência instantânea p varia em função da variação instantânea da tensão e da corrente, conforme a equação:

$$p = v_R \cdot i_R = (V_p \cdot \text{sen}(\omega \cdot t)) \cdot (I_p \cdot \text{sen}(\omega \cdot t)) = V_p \cdot I_p \cdot \text{sen}^2(\omega \cdot t)$$

A potência média de um circuito resistivo puro pode ser determinada, multiplicando-se a tensão eficaz pela corrente eficaz:

$$P_{\text{média}} = V_{\text{ef}} \cdot I_{\text{ef}} = 0,5 \cdot V_p \cdot I_p$$

A Figura 6.9 apresenta a variação da potência em função do tempo para um circuito resistivo puro. Nota-se que a potência assume apenas valores positivos, sendo denominada de **potência ativa**, uma vez que representa a potência fornecida à carga, produzindo trabalho útil.

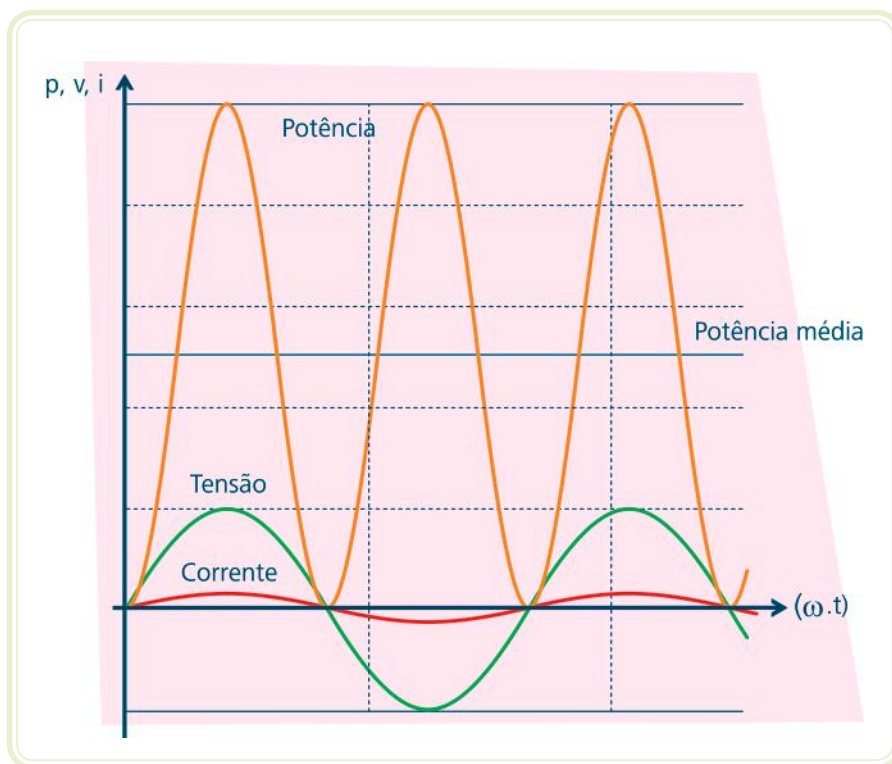


Figura 6.9: Variação da tensão, corrente e potência no circuito resistivo puro

Fonte: CTISM

6.5.2 Cargas capacitivas puras

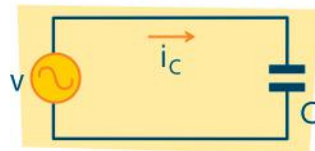
Em um circuito capacitivo puro em CA, as variações na corrente estão adiantadas 90° em relação à tensão aplicada. A Figura 6.10 mostra um circuito capacitivo puro em CA, bem como a tensão e corrente do circuito, representadas pelas formas de onda, expressões trigonométricas, diagrama fasorial e números complexos.



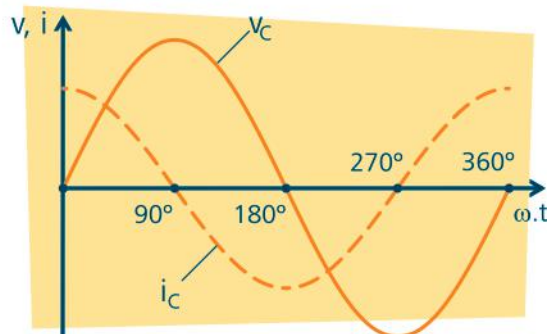
Reatância capacitiva (X_C) é a dificuldade imposta pelo campo elétrico do capacitor à passagem da corrente elétrica. Sua unidade é o *ohm*, e seu valor pode ser obtido pela equação:

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

Circuito capacitivo puro:



Formas de onda:



Números complexos:

$$V_C = V_p \angle 0^\circ [V_p]$$

$$I_C = I_p \angle +90^\circ [A_p]$$

Expressões trigonométricas:

$$i_C = \omega \cdot C \cdot V_p \cdot \sin(\omega \cdot t + 90^\circ)$$

$$I_p = \omega \cdot C \cdot V_p$$

$$V_C = V_p \cdot \sin \omega \cdot t$$

Diagrama fasorial:

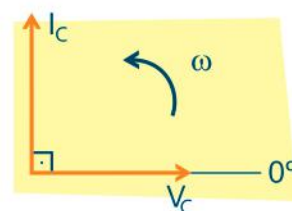


Figura 6.10: Representações da corrente e tensão de um circuito capacitivo puro

Fonte: CTISM

6.5.2.1 Potência em cargas capacitivas puras

A potência instantânea p de um circuito capacitivo puro varia conforme a equação:

$$p = v_C \cdot i_C = (V_p \cdot \sin(\omega \cdot t)) \cdot (I_p \cdot \sin(\omega \cdot t + 90^\circ)) = \frac{V_p \cdot I_p}{2} \cdot \sin(2 \cdot \omega \cdot t)$$

A Figura 6.11 apresenta a variação da potência em função do tempo para um circuito capacitivo puro. Nota-se que a potência assume valores positivos e negativos, e seu valor médio é igual a **zero**. Essa potência é denominada **potência reativa capacitiva**, uma vez que representa a potência trocada entre a fonte e o capacitor (carga e descarga), não representando trabalho útil.

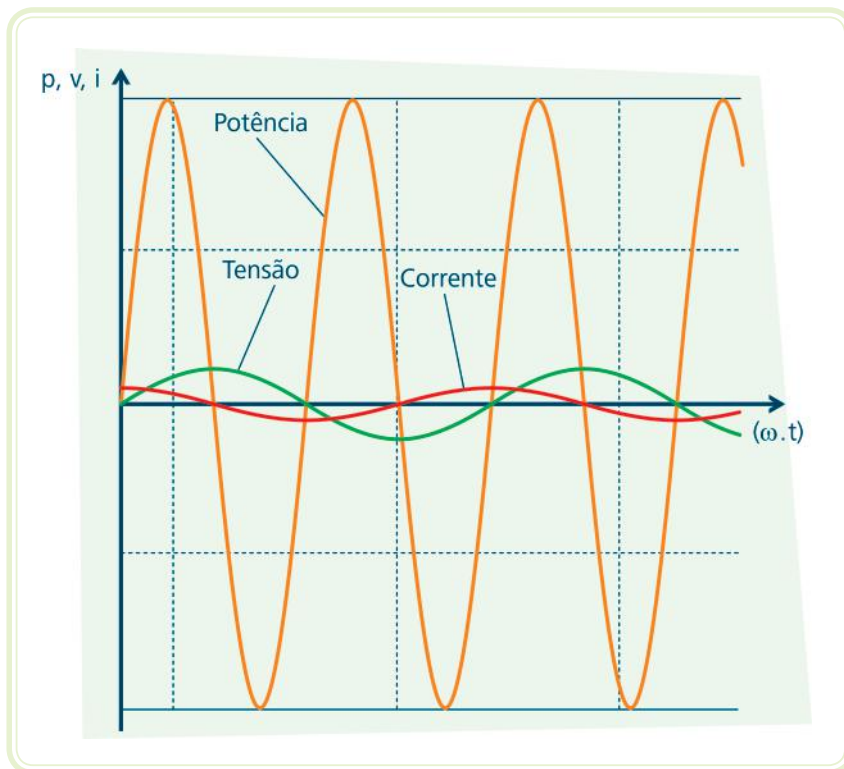


Figura 6.11: Variação da tensão, corrente e potência no circuito capacitivo puro
 Fonte: CTISM

6.5.3 Cargas indutivas puras

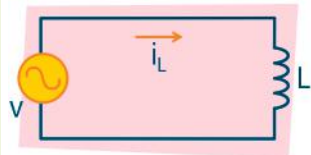
Em um circuito indutivo puro em CA, as variações na corrente estão atrasadas 90° em relação à tensão aplicada. A Figura 6.12 mostra um circuito indutivo puro em CA, bem como a tensão e corrente do circuito, representadas pelas formas de onda, expressões trigonométricas, diagrama fasorial e números complexos.



Reatância indutiva (X_L) é a dificuldade imposta pelo campo eletromagnético do indutor à passagem da corrente elétrica. Sua unidade é o *ohm*, e seu valor pode ser obtido pela equação:

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

Circuito indutivo puro:



Números complexos:

$$V_L = V_p \angle 0^\circ \text{ [V}_p\text{]}$$

$$I_L = I_p \angle -90^\circ \text{ [A}_p\text{]}$$

Expressões trigonométricas:

$$i_L = \frac{1}{\omega \cdot L} \cdot V_p \cdot \sin(\omega \cdot t - 90^\circ)$$

$$i_p = \frac{1}{\omega \cdot L} \cdot V_p$$

$$v_L = V_p \cdot \sin(\omega \cdot t)$$

Formas de onda:

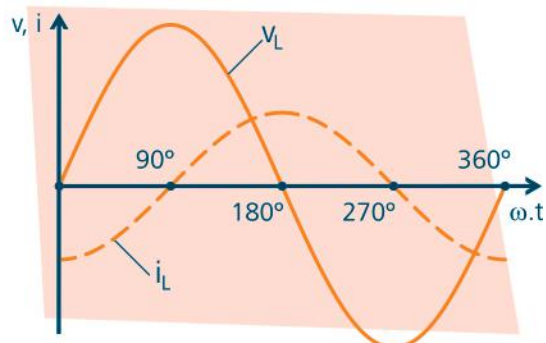


Diagrama fasorial:

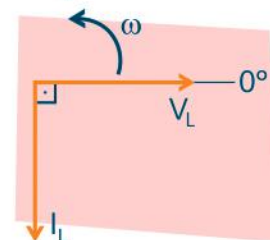


Figura 6.12: Representação da corrente e tensão de um circuito indutivo puro

Fonte: CTISM

6.5.3.1 Potência em cargas indutivas puras

A potência instantânea de um circuito indutivo puro varia conforme a equação:

$$p = v_L \cdot i_L = (V_p \cdot \sin(\omega \cdot t)) \cdot (I_p \cdot \sin(\omega \cdot t - 90^\circ)) = -\frac{V_p \cdot I_p}{2} \cdot \sin(2 \cdot \omega \cdot t)$$

A Figura 6.13 apresenta a variação da potência em função do tempo para um circuito indutivo puro. Nota-se que a potência assume valores positivos e negativos, sendo seu valor médio igual à **zero**.

Esta potência é denominada **potência reativa indutiva**, uma vez que representa a potência trocada entre a fonte e o indutor (carga e descarga), não representando trabalho útil. Nota-se que a potência reativa indutiva é oposta à potência reativa capacitiva.

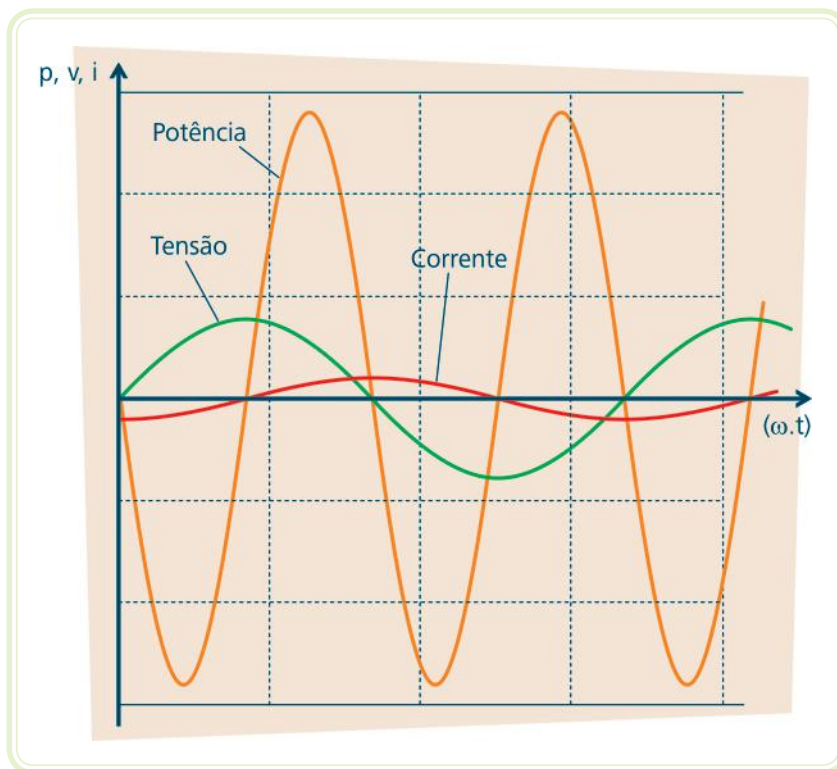


Figura 6.13: Variação da tensão, corrente e potência no circuito indutivo puro

Fonte: CTISM

6.6 Impedância

A impedância, por definição, é a relação entre os valores eficazes de tensão e corrente em um circuito CA genérico. Essa grandeza representa a oposição total oferecida pela carga (circuito misto) à passagem da corrente alternada senoidal. Seu valor é um número complexo composto pela resistência (componente real) e pela reatância (componente imaginário). Sua unidade é o *ohm*, podendo ser determinada pela equação (forma retangular):

$$Z = R + jX$$

Para um resistor e um capacitor em série (circuito capacitivo):

$$Z = R + \frac{1}{j\omega \cdot C} = R - j \cdot |X_C|$$

Para um resistor e um indutor em série (circuito indutivo):

$$Z = R + j\omega \cdot L = R + j \cdot |X_L|$$

A impedância de um circuito misto também pode ser representada através do triângulo de impedâncias, conforme a Figura 6.14.

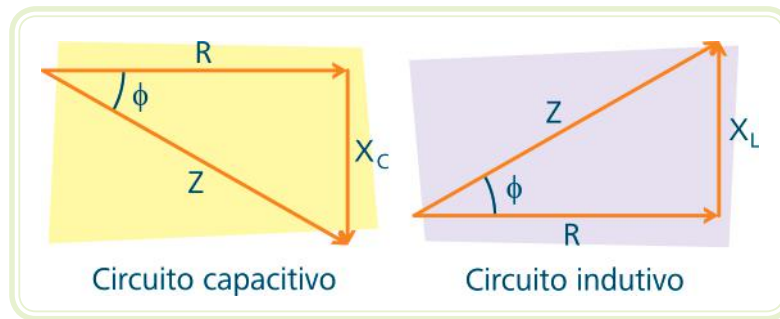


Figura 6.14: Triângulo de impedâncias para circuito capacitivo e indutivo

Fonte: CTISM

Na forma polar, a impedância é dada por:

$$Z = \sqrt{|R|^2 + |X|^2} \angle \phi$$

O conceito de impedância aplica-se a circuitos mistos, onde temos combinações entre resistor, capacitor e indutor, resultando nos circuitos **RC**, **RL**, **LC** e **RLC**, com as possíveis variações: série e paralelo.

No circuito RLC série, a impedância pode ser calculada pela equação:

$$Z = R + j \cdot (X_L - X_C)$$

Sendo que se, $X_L > X_C$, o circuito é indutivo; se $X_L < X_C$, o circuito é capacitivo; enquanto que, se $X_L = X_C$, o circuito estará em ressonância. Na ressonância as reatâncias indutiva e capacitiva se anulam, dando ao circuito um comportamento de resistivo puro.

No circuito RLC paralelo, a impedância pode ser calculada pela equação:

$$\frac{1}{Z_T} = \frac{1}{R} + j \cdot \left(\frac{1}{X_L} - \frac{1}{X_C} \right)$$

Sendo que se $X_L > X_C$, o circuito é capacitivo; se $X_L < X_C$, o circuito é indutivo; enquanto se $X_L = X_C$, o circuito estará em ressonância.

A-Z

RC

Resistivo e capacitivo

RL

Resistivo e indutivo

LC

Indutivo e capacitivo

RLC

Resistivo, indutivo e capacitivo



Admitância (Y), por definição, é o inverso da impedância. Esta grandeza representa a facilidade total oferecida pela carga à passagem da corrente alternada senoidal. Sua unidade é o *Siemens* (S) e seu valor pode ser determinado pela equação:

$$Y = \frac{1}{Z}$$

6.7 Potências e energias em circuitos CA monofásicos

Num sistema elétrico, existem dois tipos de energia: a energia ativa e a energia reativa. Qualquer equipamento que transforma a energia elétrica em outra forma de energia como um ferro elétrico, que transforma a energia elétrica em energia térmica, não necessita da energia intermediária. Dessa forma, a energia fornecida pelo gerador é totalmente utilizada ou consumida pelo ferro elétrico.

Já os equipamentos que possuem enrolamentos, tais como motores, transformadores, reatores para iluminação fluorescente, reatores para iluminação a vapor de mercúrio, etc., necessitam de energia magnetizante, como intermediária da energia ativa e passam a depender da energia ativa e reativa. O mesmo ocorre com circuitos capacitivos.

6.7.1 Potência ativa (P)

A potência ativa de um circuito mede a taxa de transformação de energia elétrica em trabalho, produzindo calor, iluminação, movimento, etc. Sua unidade é o W e seu valor pode ser determinado pela equação:

$$P = |V_{ef}| \cdot |I_{ef}| \cdot \cos \phi$$

Onde: ϕ é ângulo de fase ou ângulo da impedância.

6.7.2 Potência reativa (Q)

A potência reativa mede a taxa de processo de carga e descarga dos elementos reativos de um circuito, mantendo, assim, os campos elétrico ou eletromagnético. Sua unidade é o *Volt Ampère* reativo (VAr), e seu valor pode ser determinado pela expressão:

$$Q = |V_{ef}| \cdot |I_{ef}| \cdot \sin \phi$$

Em outras palavras, a energia reativa, que é utilizada para criar o campo magnético ou elétrico do circuito, não é consumida como energia ativa, mas trocada entre os elementos e o sistema. Entretanto, sua presença no circuito é fundamental para a criação dos campos magnéticos e elétricos, os quais possibilitam a ocorrência de fenômenos elétricos e eletromagnéticos, que produzem trabalho através do consumo de energia ativa.



A potência reativa estará presente num circuito elétrico, quando nele estiver inserido algum elemento armazenador de energia, como o indutor ou o capacitor, ou ainda ambos. O valor médio das potências reativas, tanto capacitiva quanto indutiva é zero, indicando que não há consumo de energia. Entretanto, ocorre o processo de carga e descarga de energia reativa cuja taxa é dada pela expressão da potência reativa.

6.7.3 Potência aparente (S)

A potência aparente (Figura 6.15) é a soma vetorial das potências ativa e reativa, e é também chamada de potência total ou instalada. Sua unidade é o *Volt Ampère* (VA), e seu valor pode ser determinado pela equação:



Através das equações das energias ativa, reativa e aparente, podemos concluir que o triângulo de energias é proporcional ao triângulo de potências cujo fator de proporcionalidade é o tempo. Em função da proporcionalidade entre os triângulos, podemos concluir que ambos possuem o mesmo ângulo de fase ϕ . Entretanto, em uma indústria, esta proporcionalidade só é válida se considerarmos a operação concomitante de todas as cargas que compõem o circuito em análise.

Como a maioria das cargas de uma instalação elétrica é indutiva, elas exigem um campo eletromagnético para funcionar. Sendo assim, uma instalação qualquer necessita de dois tipos de energia, a ativa e a reativa indutiva.

O módulo do fator de potência sempre é um número de 0 a 1, podendo ser capacitivo ou indutivo, dependendo de a energia reativa resultante ser capacitiva ou indutiva.

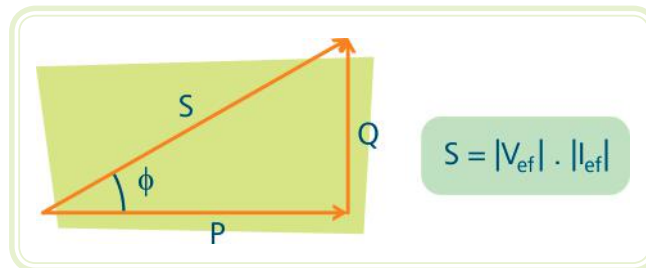


Figura 6.15: Triângulo de potências para uma carga indutiva

Fonte: CTISM

6.7.4 Energias ativa, reativa e aparente

A existência das potências ativa, reativa e aparente em circuitos CA permite definir as energias ativa (E), reativa (E_r) e aparente (E_{ap}) envolvidas, conforme as equações:

$$E = P \cdot t \text{ [Wh]}$$

$$E_r = Q \cdot t \text{ [VArh]}$$

$$E_{ap} = S \cdot t \text{ [VAh]}$$

Onde: t é o tempo de operação do circuito, em horas.

6.7.5 Fator de potência (FP ou $\cos \phi$)

O FP de um circuito mede a relação entre a potência ativa e a potência aparente de um circuito, isto é, o aproveitamento da potência total de um circuito para a produção de trabalho útil. O FP não possui unidade e corresponde ao cosseno do ângulo de fase ϕ , conforme a equação:

$$FP = \cos \phi = \frac{P}{S}$$

Devido à proporcionalidade entre o triângulo de energias e o triângulo de potências, o fator de potência também pode ser determinado em função das energias, conforme a equação:

$$FP = \cos \phi = \frac{E}{E_{ap}}$$

Resumo

Nesta aula estudamos os princípios e fundamentos que regem os circuitos de corrente alternada monofásicos, desde a geração até a análise de circuitos envolvendo cargas resistivas, capacitivas e indutivas. Nessas cargas, analisamos o comportamento e a relação entre as grandezas elétricas, diferenciando as formas de potências envolvidas.

Os conhecimentos de corrente alternada são fundamentais no setor no industrial, sendo base para o estudo da correção do fator de potência e circuitos trifásicos de corrente alternada.

Atividades de aprendizagem



1. Explique o princípio de funcionamento de um gerador elementar de corrente alternada.
2. De que depende a tensão induzida nas bobinas de um gerador de corrente alternada? Represente matematicamente.
3. Diferencie valor de pico, pico a pico, médio e eficaz de um sinal senoidal.
4. Quais as formas de representação de um sinal senoidal? Exemplifique e explique cada uma.
5. Estabeleça a relação entre corrente e tensão em circuitos resistivos, capacitivos e indutivos puros.
6. Diferencie resistência, reatância indutiva e reatância capacitiva. Qual a influência da frequência nessas grandezas?
7. Conceitue impedância de um circuito elétrico.

8. Diferencie potência ativa, potência reativa, potência aparente e fator de potência.
9. Nos dados de placa de motores elétricos consta o FP. Entre dois motores de mesma potência mas de FP diferentes (0,75 e 0,85), qual é o mais vantajoso do ponto de vista técnico?

Aula 7 – Correção do fator de potência

Objetivos

Reconhecer as causas e consequências do baixo fator de potência.

Reconhecer as vantagens da correção do fator de potência, aplicando técnicas para a sua correção.

Dimensionar bancos de capacitores para correção do fator de potência.

Fator de potência de um circuito, por definição, é a relação entre a potência ativa e a potência aparente desse circuito; ou seja, é um fator que mede o aproveitamento da potência total de um circuito na produção de trabalho. Como a potência aparente é igual à soma vetorial das potências ativa e reativa, podemos concluir que, quanto maior a potência reativa, menor será o fator de potência.

Em circuitos industriais, o baixo fator de potência geralmente está associado aos seus inúmeros equipamentos indutivos, tais como motores, transformadores, reatores, etc., resultando num aumento da corrente de seus circuitos e, conseqüentemente em perdas de energia e quedas de tensão nas instalações da indústria e também da concessionária. Em função disso, a Resolução no 456, que trata das condições gerais de fornecimento de energia elétrica no Brasil, limita o fator de potência em 0,92 (tanto capacitivo quanto indutivo), a fim de reduzir perdas de energia e ampliar a capacidade de transmissão e distribuição de energia em nosso sistema elétrico e nos circuitos das empresas.

7.1 Causas do baixo FP

Motores, transformadores, reatores de lâmpadas e outros equipamentos com enrolamentos, precisam, além da energia ativa, da energia reativa indutiva para seu funcionamento. Apesar de necessária, a utilização de energia reativa indutiva deve ser limitada ao mínimo possível por não realizar trabalho efetivo, servindo apenas para magnetizar as bobinas desses equipamentos.



Acesse Resolução 456:
<http://www.aneel.gov.br/cedoc/res2000456.pdf>



Consumidores com fator de potência abaixo de 0,92 estão sujeitos à cobrança de multa proporcional à energia reativa excedente, devendo, portanto, aplicar métodos para a adequada correção do fator de potência



No ambiente industrial, os principais causadores do baixo fator de potência são motores e transformadores operando em vazio ou com pequenas cargas, motores e transformadores superdimensionados, grande quantidade de motores de pequena potência, máquinas de solda, lâmpadas de descarga (fluorescentes, vapor de mercúrio, vapor de sódio) com reatores de baixo FP e excesso de energia reativa capacitiva.

O excesso de energia reativa exige condutores de maior bitola e transformadores de maior capacidade, ocasionando também perdas por aquecimento e quedas de tensão. Um valor alto de energia reativa significa um baixo fator de potência. Valores ideais para o fator de potência são os mais próximos da unidade (1), o que significa baixa necessidade de energia reativa. Dessa forma, podemos concluir que o FP indica o grau de eficiência do uso dos sistemas elétricos.

7.2 Consequências do baixo FP

Baixos valores de FP são decorrentes de quantidades elevadas de energia reativa. Essa condição resulta em aumento na energia total que circula nas redes de distribuição de energia elétrica da concessionária e das unidades consumidoras, podendo sobrecarregar as subestações, as linhas de transmissão e distribuição. Isso prejudica a estabilidade e as condições de aproveitamento dos sistemas elétricos, trazendo inconvenientes diversos, tais como perdas na instalação, quedas de tensão e subutilização da capacidade instalada.

7.3 Medição do FP

Há várias maneiras de se medir o FP, seja direta ou indiretamente. A medida direta pode ser feita com o cossenômetro. O cossenômetro mede o FP instantâneo, o que se torna um problema para cargas variáveis, como é o caso das indústrias.

A medida indireta poderá ser feita com um wattímetro (medidor de potência ativa) e um varímetro (medidor de potência reativa), permitindo calcular o FP através das seguintes equações:

$$\operatorname{tg} \phi = \frac{VAr}{W} \rightarrow \phi = \arctan \operatorname{tg} \frac{VAr}{W} \rightarrow FP = \cos \phi$$



FP e harmônicas:
http://www.cp.com.br/upl/artigo_4.pdf

Outro método de medida indireta utiliza um wattímetro, um amperímetro e um voltímetro. Nesse caso, a potência aparente é determinada através do produto da corrente e da tensão, permitindo calcular o FP através da equação:

$$FP = \cos \phi = \frac{W}{VA}$$

Estes dois métodos indiretos também permitem obter o FP instantâneo. No caso das indústrias, cujo faturamento de energia é mensal, as concessionárias de energia obtêm o FP do período indiretamente, através das medições das energias ativas e reativas no referido período. Desta forma o FP do período pode ser calculado através da seguinte equação:

$$\operatorname{tg} \phi = \frac{\text{kVArh}}{\text{kW}} \rightarrow \phi = \arctan \operatorname{tg} \frac{\text{kVAr}}{\text{kW}} \rightarrow \text{FP} = \cos \phi$$

7.4 Métodos de correção do FP

A primeira providência para corrigir o baixo FP é a análise das causas que levam a utilização excessiva da energia reativa, evitando principalmente a operação de motores ou transformadores a vazio ou com pequenas cargas; o superdimensionamento de motores e transformadores; o uso de motores de baixo FP e o uso de reatores com baixo FP.

A eliminação dessas causas passa pela racionalização do uso e/ou substituição de equipamentos, que podem solucionar o problema de excesso de energia reativa nas instalações. Ainda, se for de interesse da empresa, pode-se aumentar o consumo de energia ativa, aumentando, dessa forma, o fator de potência.

A partir destas providências, uma forma de reduzir a circulação de energia reativa pelo sistema elétrico consiste em produzi-la o mais próximo possível da carga, através do uso de capacitores. Instalando-se capacitores junto às cargas indutivas, a circulação de energia reativa fica limitada a eles. Na prática, a energia reativa passa a ser fornecida pelos capacitores, liberando parte da capacidade do sistema elétrico e das instalações das unidades consumidoras.

Como já sabemos, as energias reativa indutiva e capacitiva são opostas, isto é, numa mesma rede elétrica, o momento de carga do capacitor corresponde ao de descarga do indutor e o momento de carga do indutor corresponde ao de descarga do capacitor. Dessa forma, a energia descarregada pelo capacitor é absorvida pelo indutor, e vice-versa. A isso se chama compensação de energia reativa, conforme mostra a Figura 7.1.



Assista a um filme de um experimento prático para correção do fator de potência:
<http://br.youtube.com/watch?v=k1n23hyl8yw>

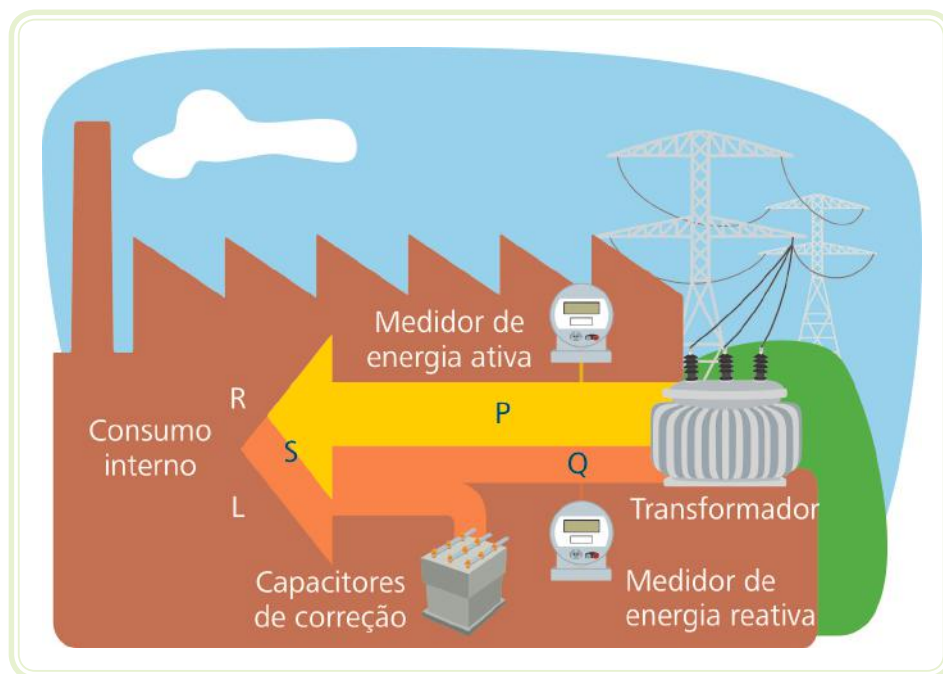


Figura 7.1: Compensação de reativos utilizando capacitores

Fonte: CTISM

Observe na Figura 7.1 que grande parte da energia reativa necessária para o motor é suprida pelo capacitor, reduzindo o suprimento pelo sistema elétrico a uma pequena parcela. Sem o capacitor, toda a energia reativa seria suprida pelo sistema elétrico, aumentando as perdas, quedas de tensão e congestionando o sistema.



Devemos tomar cuidado na quantidade da compensação, pois ela pode ser insuficiente ou excessiva. Será insuficiente quando o suprimento de energia reativa capacitiva for inferior ao mínimo necessário para o atendimento da legislação vigente, resultando num FP indutivo menor que 0,92. Será excessiva quando ultrapassar a necessidade de suprimento do motor, injetando energia reativa capacitiva no sistema, além do limite permitido pela legislação vigente, resultando num FP capacitivo menor que 0,92.

7.5 Vantagens da correção do FP

7.5.1 Liberação da capacidade do sistema

Quando os capacitores estão em operação em um sistema elétrico, funcionam como fonte de energia reativa, fornecendo corrente magnetizante para os motores, transformadores, etc., reduzindo, assim, a corrente da fonte geradora. Menor corrente significa menos potência aparente nos transformadores,

alimentadores ou circuitos de distribuição. Isso quer dizer que capacitores podem ser utilizados para reduzir a sobrecarga existente ou, caso não haja sobrecarga, permitir a ligação de cargas adicionais.

O excesso de energia reativa, tanto indutiva quanto capacitiva, é prejudicial ao sistema elétrico. A concessionária de energia poderá cobrar multa sempre que o excesso de reativos ultrapassar o limite estabelecido pelo FP mínimo, independentemente de ser indutivo ou capacitivo.



7.5.2 Redução de perdas

Diminuindo-se a energia reativa fornecida pelo sistema à carga, reduz-se consequentemente, a corrente elétrica nos condutores de alimentação. Dessa forma, as perdas por efeito *Joule* diminuem, uma vez que são proporcionais ao quadrado da corrente.

7.5.3 Melhoria da tensão

As desvantagens de tensões abaixo da nominal em qualquer sistema elétrico são bastante conhecidas. Geralmente as quedas de tensão estão relacionadas com as perdas nos condutores. A correção do FP reduz as perdas e, consequentemente, melhora os níveis de tensão.

7.5.4 Eliminação de multas

A legislação vigente permite a cobrança de multas, sob forma de consumo reativo para instalações com FP abaixo de 0,92. Dessa forma, a eliminação de multas, através da correção do FP, aumenta a lucratividade da empresa.

7.6 Tipos de correção com capacitores

7.6.1 Correção individual

Na correção individual os capacitores são instalados junto ao equipamento cujo FP se pretende aumentar. Este tipo de correção é considerado como a melhor solução do ponto de vista técnico.

Vantagens da correção individual

- Reduz as perdas energéticas em toda a instalação, diminuindo a carga nos circuitos de alimentação dos equipamentos compensados.
- Melhora os níveis de tensão de toda a instalação.

- Pode-se utilizar um sistema único de acionamento para carga e capacitor, economizando-se em equipamentos de manobra.
- Produz energia reativa somente onde é necessário.

Desvantagens da correção individual

- Muitos capacitores de pequena potência são mais caros que capacitores concentrados de maior potência.
- Pouca utilização dos capacitores no caso do equipamento compensado não ser de uso constante.

7.6.2 Correção por grupos de cargas

Na correção por grupos, os capacitores são instalados de forma a compensar um setor ou um conjunto de máquinas. Os capacitores são colocados junto ao quadro de distribuição que alimenta esses equipamentos.

Vantagem da correção por grupos

- A potência necessária será menor que na compensação individual, o que torna a instalação mais econômica.

Desvantagem da correção por grupos

- Não diminui a corrente nos alimentadores de cada equipamento corrigido.

7.6.3 Correção geral

Na correção geral, os capacitores são instalados no quadro de distribuição geral, isto é, na rede de entrada da empresa. A correção geral é utilizada em instalações elétricas com número elevado de cargas com potências diferentes e regimes de utilização pouco uniformes. A Figura 7.2 exemplifica as formas de correção individual, por grupos de cargas e geral.

Vantagens da correção geral

- Os capacitores instalados são mais utilizados.

- Fácil supervisão.
- Possibilidade de controle automático.
- Melhoria geral do nível de tensão.
- Instalações adicionais suplementares relativamente simples.

Desvantagem da correção geral

- Não alivia os circuitos alimentadores e terminais da empresa, resolvendo apenas o problema da multa.

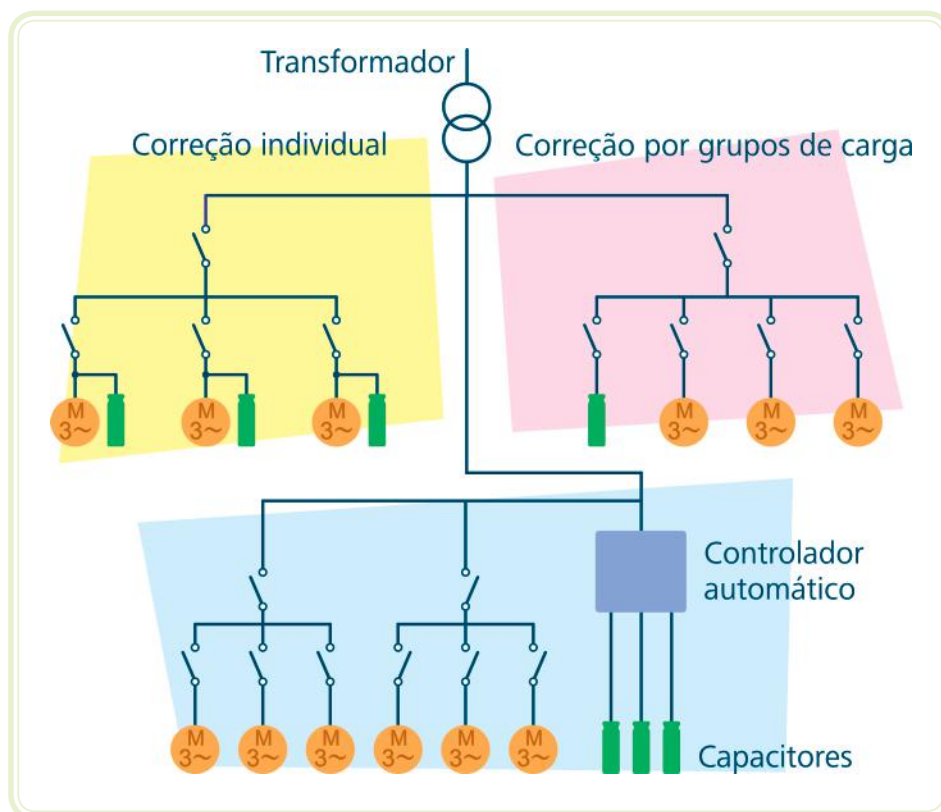


Figura 7.2: Correção individual, por grupos de cargas e geral

Fonte: CTISM

7.6.4 Correção mista

A correção mista consiste em utilizar a correção geral e por grupos de carga. Essa correção é vantajosa quando existem cargas de grande porte, pois reduz significativamente as perdas no sistema.

7.6.5 Correção automática

Nas formas de compensação geral e por grupos de equipamentos, é usual utilizar-se de uma solução em que os capacitores são agrupados por bancos controláveis individualmente. Um relé varimétrico, sensível às variações da energia reativa, comanda automaticamente a operação dos capacitores necessários à obtenção do fator de potência desejado.

7.7 Dimensionamento dos capacitores

Conforme vimos anteriormente, o primeiro passo na correção do FP é identificar suas causas, buscando soluções economicamente viáveis, as quais poderão envolver readequação de cargas, mudanças operacionais e também substituição de equipamentos. Para isto, deveremos conhecer o diagrama unifilar do sistema, suas condições operacionais, a carga instalada, bem como as energias ativas e reativas medidas pela concessionária.

Complementando estas medidas para redução do FP, precisamos determinar a forma de correção e a potência reativa capacitiva necessária. A melhor forma de correção é definida conhecendo-se os equipamentos instalados e suas características operacionais. Para determinação da potência reativa capacitiva, precisamos conhecer o fator de potência atual, a potência ativa do equipamento e/ou conjunto de equipamentos, bem como o fator de potência desejado. Isto poderá ser feito, analisando o triângulo de potências atual e o desejado, conforme a Figura 7.3.

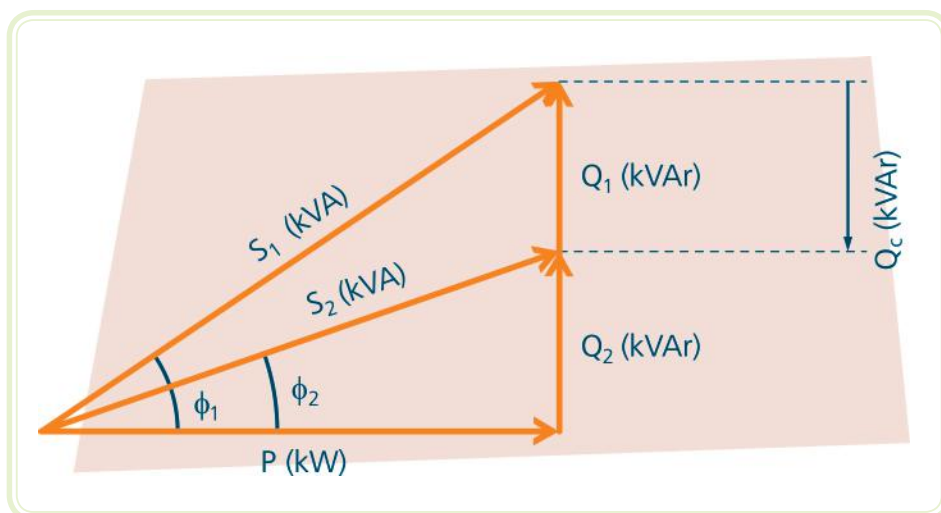


Figura 7.3: Determinação da potência reativa capacitiva

Fonte: CTISM

$$Q_c = Q_1 - Q_2 = P \cdot (\operatorname{tg} \phi_1 - \operatorname{tg} \phi_2)$$

Onde:

Q_c : potência reativa do capacitor

Q_1 : potência reativa antes da correção do fator de potência

Q_2 : potência reativa depois da correção do fator de potência

P : potência ativa da carga

A potência reativa capacitiva, sendo oposta à indutiva, tende a reduzir a potência reativa total da carga, alterando o triângulo de potências. O FP unitário é obtido quando o valor de Q_c anula totalmente a potência reativa indutiva. Como a legislação brasileira não exige FP unitário, a Q_c calculada deverá atender, no mínimo, à legislação, mantendo o FP sempre acima de 0,92.



Apesar da unidade de capacitância ser o *Farad* (F), capacitores para correção de FP também informam a Q_c individual de cada um. Assim, associando-se capacitores em paralelo aumenta-se a Q_c total, constituindo chamado banco de capacitores.

Resumo

Nesta aula estudamos as causas e consequências de um baixo fator de potência industrial, bem como as vantagens e desvantagens dos diferentes métodos de correção. A correção do fator de potência industrial é fundamental para melhorar o aproveitamento dos circuitos elétricos, reduzir perdas e evitar multas.

Atividades de aprendizagem

1. Conceitue fator de potência.
2. O que significa dizer que um consumidor está com baixo fator de potência?
3. Cite as principais causas e consequências de um baixo fator de potência industrial.
4. Como o fator de potência é medido pelas concessionárias de energia elétrica?
5. Por que a concessionária cobra multa para consumidores com fator de potência abaixo do limite? Qual é o limite?



6. Explique as principais formas para correção do fator de potência.
7. Quais as vantagens da correção do fator de potência para uma indústria?
8. Cite as principais vantagens e desvantagens dos diferentes tipos de correção por capacitores.
9. Explique como são dimensionados os capacitores para a correção do fator de potência.

Aula 8 – Sistema trifásico

Objetivos

Reconhecer as características e vantagens do sistema trifásico.

Diferenciar e aplicar as ligações estrela e triângulo em circuitos trifásicos.

Conhecer as etapas de um sistema elétrico de potência.

Diferenciar e determinar as potências em circuitos trifásicos.

Na aula 6 estudamos os princípios da corrente alternada, através de circuitos monofásicos, isto é, constituídos de apenas uma bobina geradora cuja alimentação das cargas era feita através de dois condutores. Entretanto, sistemas de potência envolvem a geração, transmissão e distribuição de grandes quantidades de energia, necessitando de um sistema elétrico com elevado desempenho.



Tecnicamente existem vários tipos de sistemas, tais como o monofásico, o bifásico, o trifásico, o hexafásico, etc. Entretanto, as vantagens dos sistemas trifásicos prevaleceram entre os demais sistemas, tornando-o o mais utilizado nos sistemas elétricos de potência em todo o mundo. Os outros sistemas também são utilizados, entretanto em pequena escala e em aplicações específicas.

8.1 Sistema monofásico

O entendimento do sistema monofásico é necessário para o estudo do sistema trifásico. Note que um sistema monofásico difere de um circuito monofásico. A instalação de uma lâmpada utiliza um circuito monofásico, na grande maioria das vezes derivado de um sistema trifásico que emprega geradores, transformadores, linhas de transmissão e linhas de distribuição trifásicas. Já um sistema monofásico é aquele oriundo de um gerador monofásico que produz uma única tensão senoidal chamada tensão de fase. A Figura 8.1 mostra, de forma simplificada, duas tipologias de gerador monofásico cujo princípio de geração já foi estudado na aula 7.

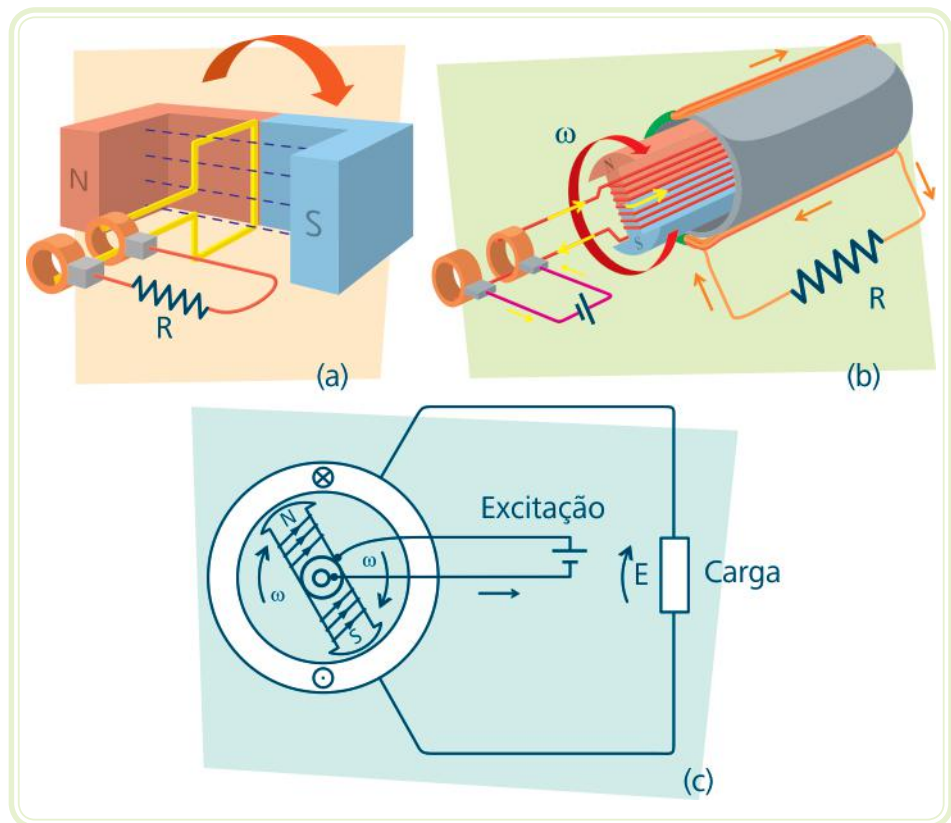


Figura 8.1: Gerador monofásico, detalhes construtivos com (a) campo fixo com geração no rotor (parte giratória); (b) e (c) campo móvel com geração no estator (parte estática)

Fonte: CTISM



Fisicamente ambas as tipologias são viáveis, entretanto, tecnicamente nos deparamos com o problema de alimentar uma bobina em pleno movimento. Para isto utilizam-se anéis coletores e escovas, os quais deslizando, mantém o contato elétrico. Entretanto, os desgastes mecânicos, as perdas elétricas, os custos, o tamanho e a manutenção são proporcionais à corrente circulante. Como a corrente fornecida pela bobina de geração é muito maior do que aquela necessária para a criação do campo magnético, é mais viável tecnicamente e economicamente a tipologia de geração no estator.

Na Figura 8.1 (a) temos um gerador monofásico com geração no rotor, isto é, o campo magnético do estator é fixo, enquanto a bobina de geração é forçada a girar dentro desse campo magnético, induzindo, pelas Leis de *Faraday* e *Lenz*, uma tensão alternada em seus terminais. Na Figura 8.1 (b) e (c) temos um gerador monofásico com geração no estator, isto é, o campo magnético é produzido no rotor, que é forçado a girar no interior da bobina de geração fixa, induzindo, pelas leis de *Faraday* e *Lenz*, uma tensão alternada em seus terminais.

8.2 Sistema trifásico

Os sistemas que possuem mais de uma fase são denominados polifásicos, apresentam fases iguais, porém defasadas entre si de um ângulo de $360^\circ/n$, sendo n o número de fases. O sistema polifásico composto de três fases, chamado de trifásico, é o mais usado em todas as etapas do sistema elétrico. Por outro lado, existem aparelhos que demandam três fases para o seu funcionamento, como é o caso de motores elétricos trifásicos.

Os sistemas trifásicos apresentam uma série de vantagens em relação aos monofásicos, tais como:

- Possibilidade de obtenção de duas tensões diferentes na mesma rede ou fonte. Além disso, os circuitos monofásicos podem ser alimentados pelas fases do sistema trifásico.
- As máquinas trifásicas têm quase 50% a mais de potência que as monofásicas de mesmo peso e volume.
- O conjugado (torque) dos motores trifásicos é mais constante que o das máquinas monofásicas.
- Para transmitir a mesma potência, as redes trifásicas usam condutores de menor bitola que as monofásicas.
- Redes trifásicas criam campos magnéticos giratórios utilizados pelos motores de indução trifásicos que são os mais baratos e robustos de todos os motores elétricos.

8.2.1 Gerador trifásico

Em um gerador trifásico, existem três enrolamentos distribuídos simetricamente no estator da máquina, propiciando uma separação física de 120° entre os enrolamentos. Dessa forma, a geração resulta em três tensões (fases) com a mesma amplitude e frequência, porém defasadas em 120° . A Figura 8.2 mostra, de forma simplificada, um gerador trifásico com geração no estator e rotor, bem como seus enrolamentos e formas de onda.



Sistemas trifásicos:
http://pt.wikipedia.org/wiki/sistema_trif%C3%A1sico



Assista a um filme de um experimento prático com tensões trifásicas:
<http://br.youtube.com/watch?v=22434jhxyjs>

Na verdade um gerador trifásico nada mais é do que três geradores monofásicos num mesmo equipamento, compartilhando o campo magnético e a estrutura mecânica do rotor e estator, permitindo, assim, a geração de mais energia com menor tamanho e menos custo de fabricação.

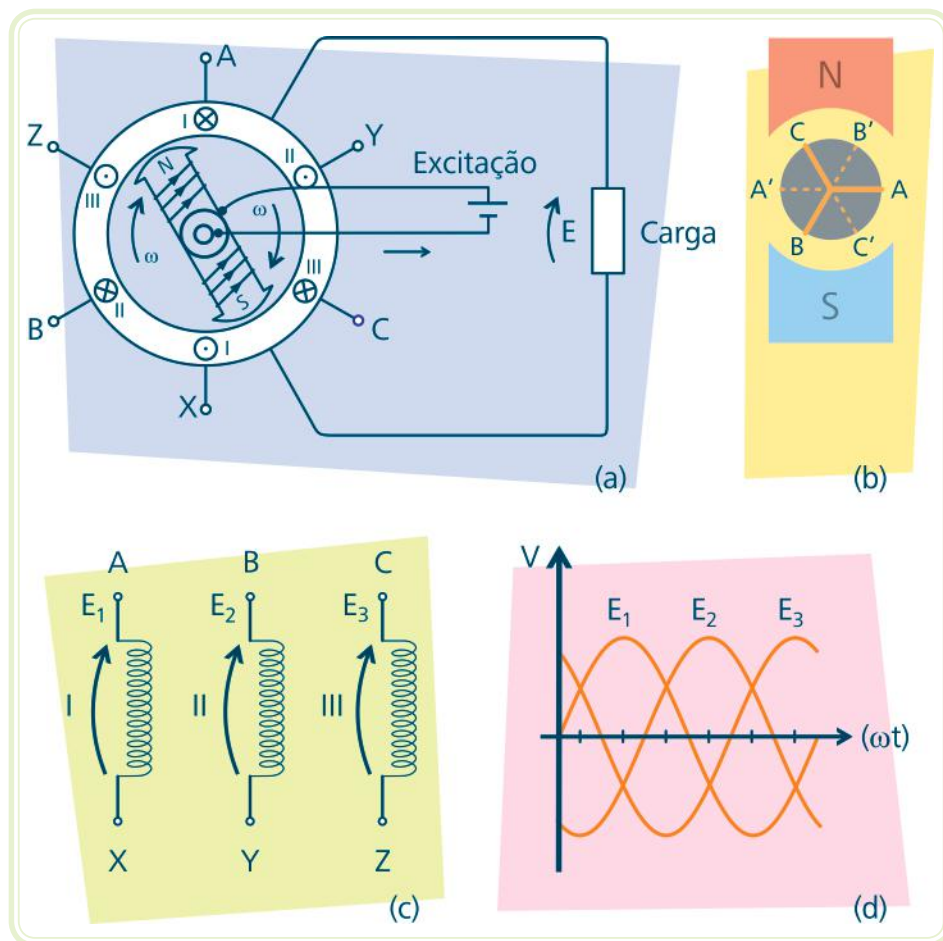


Figura 8.2: Gerador trifásico, detalhes construtivos com (a) campo móvel com geração no estator; (b) campo fixo com geração no rotor (c) enrolamentos e (d) formas de onda
Fonte: CTISM

Da mesma forma que no gerador monofásico, a tipologia com geração no estator é a mais viável, entretanto utilizaremos aqui a tipologia com geração no rotor para um melhor entendimento das tensões geradas. Para isso, precisamos compreender os seguintes conceitos:

Rotação de fase: é o sentido no qual as fases irão girar. Ex.: sentido horário ou anti-horário.

Sequência de fase: é a ordem em que as fases irão se suceder. Ex.: ABC, CBA.

Assim, considerando o gerador da Figura 8.2 (b), se o sentido de rotação do rotor for anti-horário, teremos um sistema trifásico ABC anti-horário (\overrightarrow{ABC}). Caso o sentido de rotação for horário, teremos um sistema CBA horário (\overrightarrow{CBA}). Observe que a rotação de fase está relacionada ao sentido de giro, enquanto a sequência de fase está relacionada à ordem em que as bobinas geradoras foram enroladas.

A Figura 8.3 mostra a representação por forma de onda, expressões trigonométricas, números complexos e diagrama fasorial para as tensões A, B e C da Figura 8.2 (b), considerando um sistema.

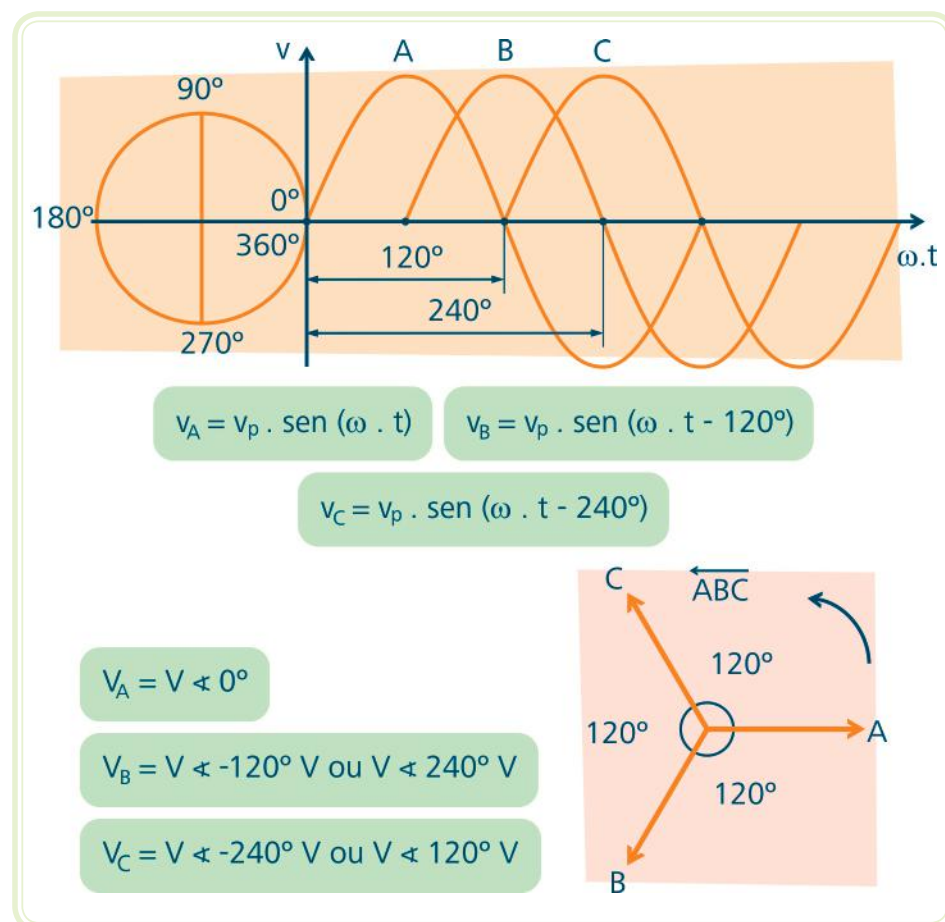


Figura 8.3: Representações das tensões de um gerador trifásico ABC anti-horário
Fonte: CTISM



Apesar de haver várias combinações para a sequência de fase, existem apenas duas sequências possíveis, definidas como ABC e CBA. Dessa forma, ABC é o mesmo que BCA e CAB, enquanto CBA é o mesmo que BAC e ACB.

8.3 Ligações estrela e triângulo

Como vimos, os geradores trifásicos possuem três bobinas (seis terminais). Considerando a utilização independente destas bobinas, necessitaríamos de seis condutores para o transporte da energia gerada por um gerador trifásico. Entretanto, existem duas formas de ligação das bobinas de máquinas elétricas trifásicas que permitem a redução do número de condutores e, consequentemente, dos custos no transporte da energia. Estas ligações são denominadas estrela (Y) e triângulo ou delta (Δ), devido ao seu formato.

A ligação dos terminais A', B' e C', como na Figura 8.4 (a), resulta num gerador ligado em Y, ao passo que a ligação de A em B', de B em C' e de C em A',

como na Figura 8.4 (b), resulta num gerador ligado em Δ . Note que na ligação Δ não há condutor neutro, enquanto na ligação Y, o ponto de interligação das bobinas origina o condutor neutro (N).

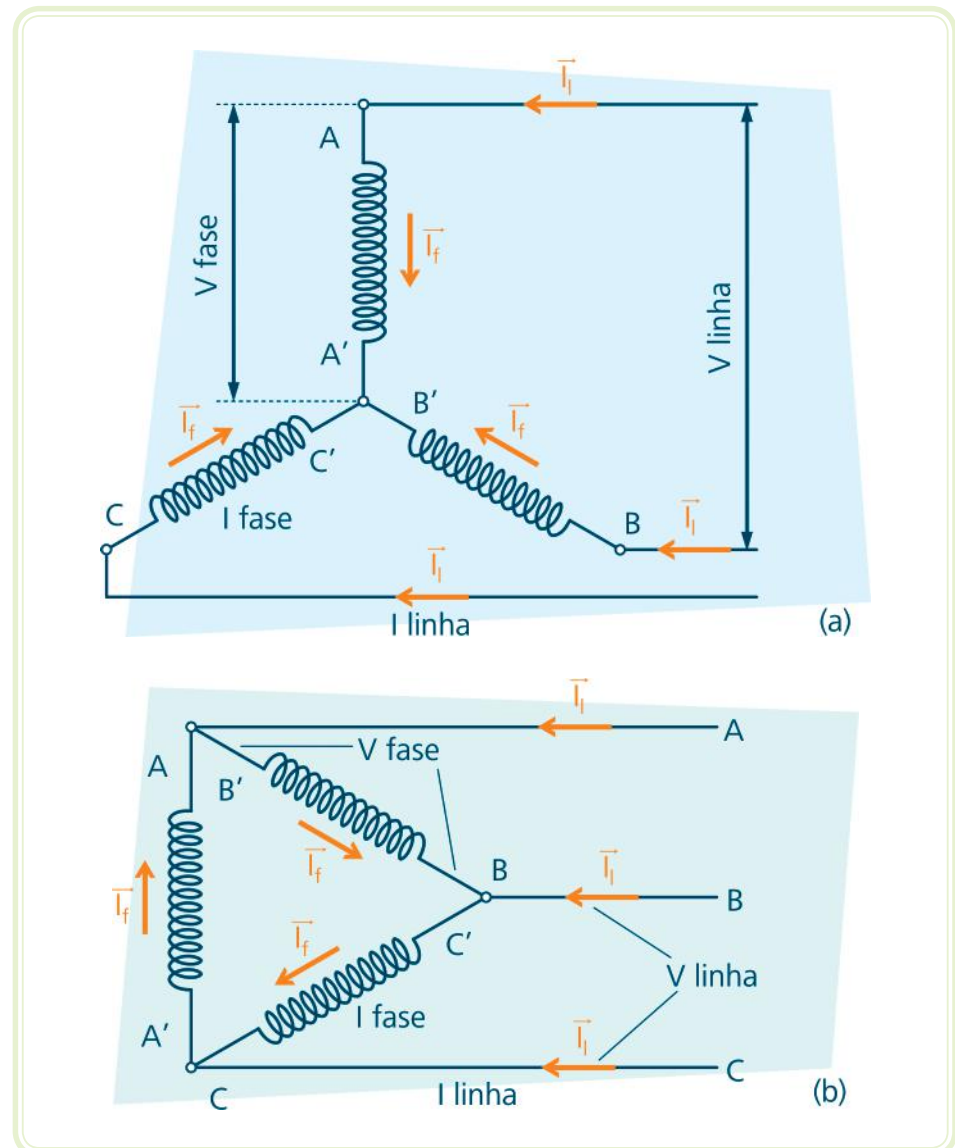


Figura 8.4: (a) Ligação estrela e (b) ligação triângulo

Fonte: CTISM

A ligação das bobinas nas configurações Y e Δ , produz valores de linha e valores de fase, aplicados às tensões e às correntes dos circuitos trifásicos.

Considerando equilibrada a carga dos geradores da Figura 8.4, isto é, mesma potência conectada a cada fase, obtemos as seguintes relações entre os valores de correntes e tensões de linha e de fase:

Na ligação Y

$$|I_l| = |I_f|$$

$$|V_l| = \sqrt{3} \cdot |V_f|$$

Na ligação Δ

$$|V_l| = |V_f|$$

$$|I_l| = \sqrt{3} \cdot |I_f|$$

Corrente de linha (I_l): é a corrente que circula nos terminais das máquinas elétricas, isto é, a corrente fornecida à rede pelo gerador ou recebida da rede pelos motores e transformadores (linha).



Corrente de fase (I_f): é a corrente que circula pelo interior das bobinas das máquinas elétricas.

Tensão de linha (V_l): é a diferença de potencial entre duas fases quaisquer de um gerador ou da rede que alimenta motores e transformadores.

Tensão de fase (V_f): é a diferença de potencial entre os terminais individuais de qualquer bobina de uma máquina elétrica. No caso da ligação Y, entre qualquer fase e o neutro.

Observe que na ligação Y, as correntes de linha e de fase são iguais em módulo, enquanto a tensão de linha é $\sqrt{3}$ vezes maior que a tensão de fase. Já na ligação Δ ocorre o contrário; as tensões de linha e de fase são iguais em módulo, enquanto a corrente de linha é $\sqrt{3}$ vezes maior que a corrente de fase. A relação $\sqrt{3}$ surge, em ambos os casos, devido à defasagem angular de 120° entre as fases. Além das possíveis variações de módulo, as correntes de linha e de fase, bem como as tensões de linha e de fase poderão estar defasadas, dependendo do tipo de ligação, sequência de fase e rotação de fase.

As relações apresentadas entre valores de linha e fase também são válidas para as ligações de outras máquinas elétricas trifásicas, como transformadores e motores elétricos equilibrados. A opção pelas ligações Y ou Δ se deve às características técnicas e operacionais do sistema elétrico e as especificações técnicas das máquinas elétricas. Por exemplo, um motor elétrico com a especificação de placa 380/220 V pode ligar em partida direta tanto numa rede trifásica de 380 V (valor de linha) ou de 220 V (valor de linha). O menor valor da especificação do motor, no caso 220 V, corresponde à tensão nominal da bobina. Dessa forma, numa rede de 220 V, para que a bobina do motor receba a tensão nominal, a forma de ligação de suas bobinas será Δ . Já numa rede de 380 V a ligação correta será a Y, caso contrário o motor será submetido a uma sobretensão, o que ocasionaria sua queima.



Sistema elétrico de potência:
http://pt.wikipedia.org/wiki/sistemas_el%C3%A9tricos_de_pot%C3%A2ncia

8.4 Etapas do sistema elétrico de potência

O sistema elétrico brasileiro está organizado em quatro etapas: geração, transmissão, distribuição (primária e secundária) e utilização, conforme mostra a Figura 8.5.

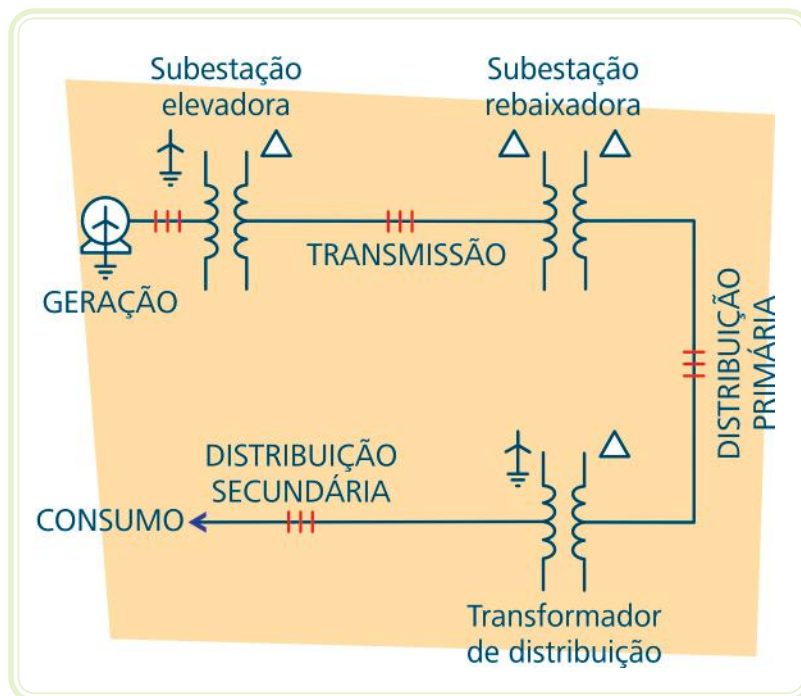


Figura 8.5: Etapas do sistema elétrico

Fonte: CTISM

8.4.1 Geração

A geração de energia elétrica consiste na obtenção e na transformação da energia de fontes primárias disponíveis em nosso planeta em energia elétrica. Os princípios, bem como as formas de geração de energia elétrica já foram abordados na aula 7.



Tecnicamente, o emprego de alta tensão reduz as perdas de energia por aquecimento dos condutores (efeito *Joule*), em função da redução da corrente elétrica, permitindo ainda aumentar a capacidade de transmissão de energia dos mesmos.

8.4.2 Transmissão

O sistema de geração de energia elétrica no Brasil é basicamente hidrotérmico, com forte predominância de hidrelétricas que, em sua grande maioria, encontram-se distantes dos grandes centros de consumo. Ainda, a grande extensão do território brasileiro, associada à irregularidade pluviométrica nas diferentes regiões do país, tornou necessária a interligação do sistema elétrico brasileiro, através de linhas de transmissão de alta tensão.

A tensão de geração, na grande maioria das centrais, é na ordem de alguns kV devido às limitações de isolamento elétrico dos geradores. Entretanto, essa tensão

é muito baixa para a transmissão, acarretando elevadas perdas e exigindo superdimensionamento das linhas, devido às elevadas correntes elétricas e esforços mecânicos. Dessa forma, muito próxima às centrais geradoras, uma subestação eleva a tensão de geração para níveis técnicos compatíveis com os níveis de energia a serem transmitidos. Esta subestação é denominada elevadora, conforme mostra a Figura 8.5.

Nos entroncamentos das linhas de transmissão, bem como nas proximidades dos centros de consumo, a elevada tensão de transmissão é reduzida, constituindo as linhas de subtransmissão e redes de distribuição. Nesse caso são utilizadas subestações rebaixadoras, com funcionamento inverso ao das subestações elevadoras.

8.4.3 Distribuição

Apesar de as linhas de transmissão e subtransmissão transportarem energia a longas distâncias com significativa redução de perdas, as altas tensões envolvidas não oferecem a segurança necessária e viabilidade financeira para adentrar nos centros urbanos, distribuindo energia às unidades consumidoras. Dessa forma, próxima aos centros de consumo, subestações rebaixadoras reduzem a tensão para níveis mais seguros, constituindo a rede de distribuição de média tensão, também chamada de distribuição primária, geralmente nas tensões de 13,8 ou 23,1 kV. Na grande maioria das subestações rebaixadoras, a distribuição primária é feita através de vários circuitos alimentadores, que atendem regiões e/ou bairros específicos. Na Figura 8.5 as bobinas do primário e secundário dos transformadores dessa subestação rebaixadora estão ligadas em Δ , tornando a distribuição primária de energia também a três fios.

A tensão de distribuição primária atende aos seguintes critérios: ser suficientemente baixa, para fins de viabilidade financeira e de segurança na utilização e manutenção e ser suficientemente alta, a fim de manter reduzidas as perdas no transporte, desde a subestação até os centros de consumo. Dessa forma, seu valor não é compatível com os padrões de utilização em equipamentos elétricos e eletrônicos, devendo ser novamente rebaixada. Este rebaixamento é feito através de transformadores de distribuição dispostos muito próximos às unidades consumidoras, sendo geralmente fixados aos postes da rede. A partir destes transformadores, constitui-se a rede de distribuição de baixa tensão, também chamada de distribuição secundária, geralmente nas tensões comerciais de 127, 220, 380 e/ou 440 V.



As bobinas do primário dos transformadores de uma subestação elevadora geralmente estão ligadas em Y, enquanto as bobinas do secundário estão ligadas em Δ , permitindo a transmissão de energia a três fios.



Os consumidores supridos de energia em baixa tensão são classificados pela concessionária de energia em monofásicos, bifásicos e trifásicos, segundo o número de fases que recebem, em função da carga instalada. Consumidores com carga instalada elevada deverão comprar energia diretamente da rede de distribuição primária, arcando com os custos de rebaixamento da tensão, porém usufruindo tarifas mais baixas.

Observe na Figura 8.5 que as bobinas do primário dos transformadores de distribuição são ligadas em Δ , enquanto que as bobinas do secundário são ligadas em Y. A Ligação em Y permite a distribuição secundária a quatro fios (três fases e um neutro).

8.4.4 Utilização

Uma vez gerada, transmitida e distribuída, a energia elétrica encontra-se disponível para a utilização pelos consumidores. Entretanto, a grande maioria das necessidades energéticas envolve outras modalidades de energia. Dessa forma, em sua utilização final, a energia precisa ser transformada novamente, através dos mais diversos equipamentos, resultando em energia mecânica, térmica, luminosa, sonora, etc. A transformação e utilização dessas energias caracterizam o consumo de energia elétrica.

8.5 Potências em circuitos trifásicos

As potências ativa, reativa e aparente estão presentes tanto em circuitos CA monofásicos, quanto em circuitos CA trifásicos. Entretanto, precisamos entender como estas potências são determinadas em circuitos trifásicos.

Relembrando as potências em circuitos CA monofásicos, estudadas na aula 7, temos:

$$P = |V_{ef}| \cdot |I_{ef}| \cdot \cos \phi$$

$$Q = |V_{ef}| \cdot |I_{ef}| \cdot \sin \phi$$

$$S = |V_{ef}| \cdot |I_{ef}|$$

Considerando um circuito trifásico equilibrado e tendo em vista que eles são constituídos por três circuitos monofásicos de mesma potência conectados em Y ou Δ , poderemos determinar as potências trifásicas totais através dos valores de fase, conforme as equações:

$$P = 3 \cdot |V_f| \cdot |I_f| \cdot \cos \phi$$

$$Q = 3 \cdot |V_f| \cdot |I_f| \cdot \sin \phi$$

$$S = 3 \cdot |V_f| \cdot |I_f|$$

Observe que as expressões referidas empregam valores eficazes e são válidas para a determinação das potências de máquinas elétricas trifásicas ligadas tanto em Y como em Δ .

Ainda, considerando o mesmo circuito equilibrado e substituindo os valores de fase por valores de linha, através das relações já conhecidas, poderemos determinar as potências trifásicas totais através dos valores de linha, conforme as equações:

$$P = \sqrt{3} \cdot |V_l| \cdot |I_l| \cdot \cos \phi$$

$$Q = \sqrt{3} \cdot |V_l| \cdot |I_l| \cdot \sin \phi$$

$$S = \sqrt{3} \cdot |V_l| \cdot |I_l|$$

Entretanto, caso as cargas sejam desequilibradas, deveremos determinar as potências ativas e reativas individuais de cada fase (A, B e C), para posterior somatório. Já a potência aparente poderá ser obtida empregando o triângulo de potências, conforme as equações:

$$P = |V_{fA}| \cdot |I_{fA}| \cdot \cos(\phi_A) + |V_{fB}| \cdot |I_{fB}| \cdot \cos(\phi_B) + |V_{fC}| \cdot |I_{fC}| \cdot \cos(\phi_C)$$

$$Q = |V_{fA}| \cdot |I_{fA}| \cdot \sin(\phi_A) + |V_{fB}| \cdot |I_{fB}| \cdot \sin(\phi_B) + |V_{fC}| \cdot |I_{fC}| \cdot \sin(\phi_C)$$

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

Resumo

Nesta aula estudamos os princípios e características do sistema trifásico e como ele é aplicado no sistema elétrico brasileiro. Estudamos também as relações entre as grandezas elétricas nos circuitos de corrente alternada trifásicos, bem com as formas de ligação de equipamentos trifásicos. Com esta aula finalizamos os estudos de eletricidade, adquirindo conhecimentos básicos e aplicáveis que servirão de base para o estudo de disciplinas voltadas à eletrotécnica, eletrônica e automação industrial.



Atividades de aprendizagem

1. Diferencie o sistema monofásico do sistema trifásico.
2. Qual a vantagem do gerador trifásico com geração no estator em relação ao gerador trifásico com geração no rotor?
3. Qual a vantagem da utilização de equipamentos elétricos trifásicos?
4. Explique como surgem as tensões trifásicas num gerador trifásico.
5. Qual a defasagem angular entre as tensões de um gerador trifásico? A que se deve este valor.
6. Conceitue rotação de fase e sequência de fase.
7. Quais os tipos de ligações empregadas em circuitos trifásicos?
8. Estabeleça a relação entre tensões, correntes de linha e de fase para cada ligação.
9. Explique as etapas do sistema elétrico brasileiro.
10. Qual a finalidade dos transformadores no sistema elétrico de potência?
11. Como podem ser determinadas as potências em circuitos trifásicos? Qual a relação com os circuitos monofásicos.

Referências

ALBUQUERQUE, R. O. **Circuitos em Corrente Alternada**. 7ª edição. São Paulo: Érica, 1997.

ALBUQUERQUE, R. O. **Circuitos em Corrente Contínua**. 7ª edição. São Paulo: Érica, 1997.

BOYLESTAD, R. L. **Introdução à Análise de Circuitos**. 10ª Ed. São Paulo: Prentice Hall, 2004.

EDMINISTER, J. A. **Circuitos Elétricos**. 2ª Ed. Coleção Schaum. São Paulo: Pearson Education do Brasil, 2001.

GUSSOW, M. **Eletricidade Básica**. 2ª Ed. Coleção Schaum. São Paulo: Pearson Makron Books, 1997.

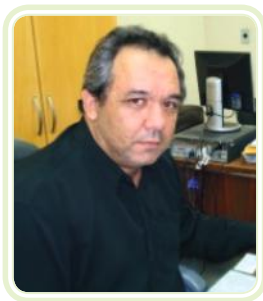
LOURENÇO, A. C.; CRUZ, E. C. A.; JÚNIOR, S. C. **Circuitos em Corrente Contínua**. 5ª edição. São Paulo: Érica, 1998.

NEVES, E. G. C. **Eletrotécnica Geral**. 2ª edição. Editora e Gráfica Universitária – UFPel, 2004.

REIS, L. B. D. **Geração de Energia Elétrica**. Barueri-SP: Ed. Manole, 2003.

WEG ACIONAMENTOS LTDA. **Correção do Fator de Potência**. Manual Técnico.

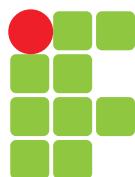
Currículo dos professores-autores



José Abílio Lima de Freitas é natural de Santa Maria-RS e professor do Colégio Técnico Industrial (CTISM) da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM). É graduado em Engenharia Elétrica pela UFSM, graduado em Formação Pedagógica – Licenciatura Plena em Ensino Profissionalizante pela Universidade de Santa Cruz do Sul (UNISC). Especialista em Engenharia de Segurança do Trabalho pela UFSM. Mestre em Engenharia de Produção pela UFSM. Trabalhou por vários anos em empresas de projetos e construção de redes elétricas e telefônicas, adquirindo boa experiência na gestão de equipes de trabalho e no acompanhamento e execução de projetos. No CTISM ministra as disciplinas de Instalação e Manutenção Elétrica e Projetos Elétricos. Atua também como Coordenador do Curso Técnico em Segurança do Trabalho. É membro do Núcleo de Ensino a Distância e participante em projetos de extensão, ministrando cursos de capacitação para eletricitistas de geração, transmissão e distribuição de energia elétrica nas áreas de Eletricidade e de Segurança do Trabalho.



Marcos Daniel Zancan é natural de Ivorá-RS e professor do Colégio Técnico Industrial (CTISM) da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM). É Técnico em Eletromecânica pelo CTISM, graduado em Engenharia Elétrica pela UFSM, graduado em Formação Pedagógica – Licenciatura Plena em Ensino Profissionalizante pela Universidade de Santa Cruz do Sul (UNISC). Especialista em Engenharia de Segurança do Trabalho no Centro Universitário Franciscano (UNIFRA). Mestre em Engenharia de Produção pela UFSM. No CTISM ministra as disciplinas de Eletrotécnica, Acionamentos Elétricos e Automação e Controle. Atualmente é Diretor de Ensino do CTISM e membro da equipe do PROEJA e do Núcleo de Ensino a Distância. Participa também em projetos de extensão, ministrando cursos de capacitação para eletricitistas de geração, transmissão e distribuição de energia elétrica nas áreas de eletricidade e de segurança do trabalho.



INSTITUTO FEDERAL
PARANÁ



PDE | PRONATEC

PROGRAMA NACIONAL DE ACESSO AO
ENSINO TÉCNICO E EMPREGO

ELETRICISTA INDUSTRIAL