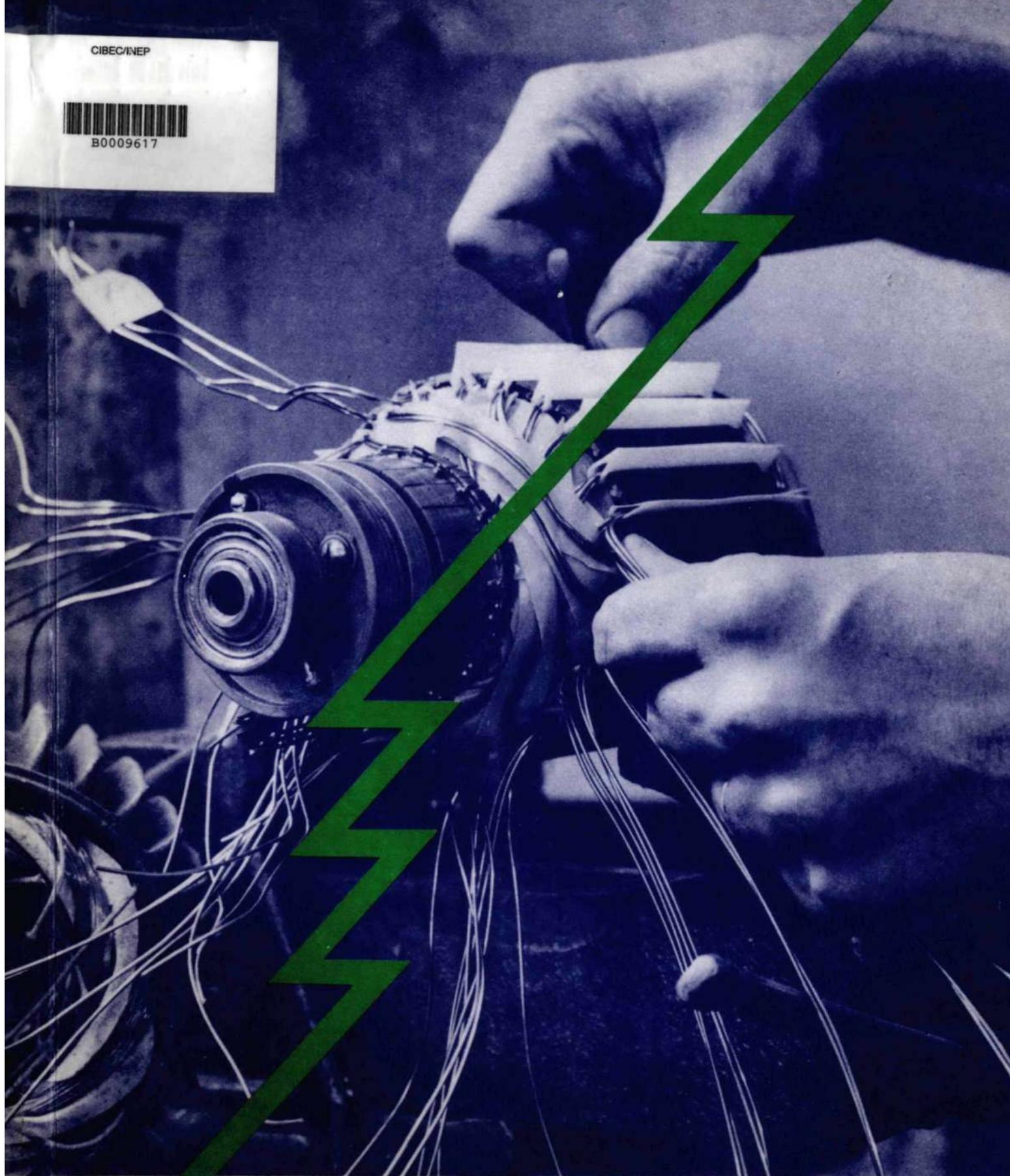


CIBEC/INEP



B0009617



# HABILITAÇÃO DE ELETROTÉCNICA

Conteúdos específicos para o professor

12.4  
h

# **Livros Grátis**

<http://www.livrosgratis.com.br>

Milhares de livros grátis para download.

FICHA TÉCNICA (Eletrotécnica)

COORDENADOR DE OPERAÇÕES  
Inácio Antonio Ovigli

CHEFE DO PROGRAMA DE EDUCAÇÃO TÉCNICA  
Carlos Alberto de Araújo Almeida

EQUIPE RESPONSÁVEL PELO PROJETO  
José Cerchi Fusari  
Judite Daré  
Ivete Palange  
Janete Bernardo da Silva  
Maria Pia Reginato  
Osvaldo Valter Avancini  
Regina Célia P. Baptista dos Santos  
Suely Giamelaro

ESPECIALISTAS CONTRATADOS  
Norberto Nery  
Roberto Atienza  
Inês Achcar

APOIO ADMINISTRATIVO E DATILOGRAFIA  
Vanderli Domingues  
Elmir de Almeida

MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO  
**FUNDAÇÃO CENTRO NACIONAL DE APERFEIÇOAMENTO  
DE PESSOAL PARA A FORMAÇÃO PROFISSIONAL**  
COP-COORDENADORIA DE OPERAÇÕES  
Programa de Educação Técnica Ensino Industrial

ATUALIZAÇÃO DE PROFESSORES  
EM CONTEÚDOS ESPECÍFICOS

# **HABILITAÇÃO DE ELETROTÉCNICA**

**Conteúdos específicos para o professor**

DESENVOLVIMENTO DE RECURSOS HUMANOS  
NAS ESCOLAS TÉCNICAS FEDERAIS - 1985

Obras da série "Atualização de Professores em Conteúdos Específicos - Eletrotécnica - 1º fase"

- O projeto de atualização de professores em conteúdos específicos: apresentação.
- O papel da escola e do professor, no desenvolvimento da ciência e da tecnologia.
- Projeto de atualização em conteúdos específicos: su gestões para o coordenador.
- Habilitação de Eletrotécnica: conteúdos específicos para o professor.
- Anexos: electrostática, eletrodinâmica e eletromagnetismo.

CATALOGAÇÃO NA FONTE: COMTEC/SIEFOR

C395 CENAFOR. Coordenadoria de Operações. Programa de Educação Técnica - Ensino Industrial.  
Habilitação de Electrotécnica : conteúdos específicos para o professor. - São Paulo : CENAFOR, 1985.  
186p. - (Atualização de professores em conteúdos específicos - Eletrotécnica - 1ª fase).

1. Aperfeiçoamento. 2. Professor. 3. Escola técnica.  
4. Eletrotécnica. I. Título. II. Série.

CDU: 377.114

## SUMARIO

### ELETRÓSTATICA

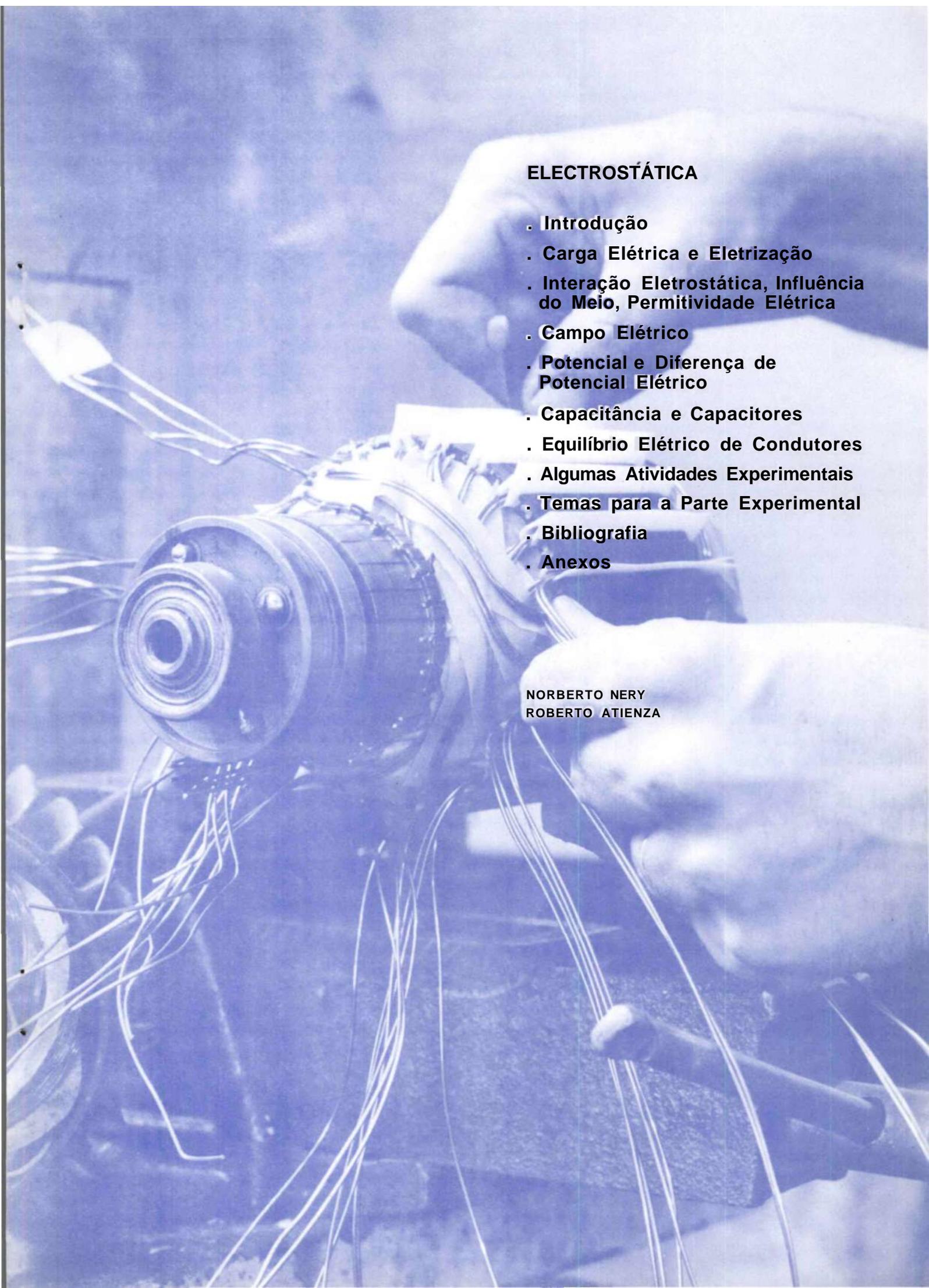
Introdução.....	7
Carga elétrica e eletrização.....	11
Interação eletrostática, influência do meio, permissividade elétrica.....	17
Campo elétrico.....	21
Potencial e diferença de potencial elétrico.....	27
Capacitância e capacitores.....	37
Equilíbrio elétrico de condutores.....	47
Algumas atividades experimentais.....	48
Temas para a parte experimental.....	49
Bibliografia.....	53
Anexos.....	54

### ELETRÓDINÂMICA

Introdução.....	57
Corrente elétrica.....	59
Sentido da corrente elétrica.....	62
Intensidade da corrente elétrica.....	63
Lei de Ohm.....	66
Resistividade e condutividade.....	71
Efeito Joule - Trabalho e potência.....	79
Geradores e receptores.....	83
Lei de Ohm generalizada.....	91
Leis de Kirchhoff.....	94
Sugestões para a parte prática.....	97
Bibliografia.....	98
Anexos.....	99

## **ELETROMAGNETISMO**

Introdução.....	103
Magnetismo.....	105
Forças entre regiões polares.....	108
Teorias do magnetismo.....	111
O campo magnético.....	112
Efeitos eletromagnéticos.....	122
Primeiro fenômeno eletromagnético.....	123
Aplicação do primeiro fenômeno.....	127
Segundo fenômeno eletromagnético.....	138
Lei circuital de Ampere.....	140
Interação entre correntes elétricas.....	151
Unidade de intensidade de corrente elétrica.....	152
Forças sobre cargas imersas num campo magnético ...	153
Terceiro fenômeno eletromagnético.....	157
Leis da indução eletromagnética.....	162
Lei de Lenz.....	165
Lei de Faraday-Neumann.....	165
Auto-Indutância.....	171
Parte experimental.....	184
Bibliografia.....	185
Anexos.....	186



## **ELECTROSTÁTICA**

- . **Introdução**
- . **Carga Elétrica e Eletrização**
- . **Interação Eletrostática, Influência do Meio, Permitividade Elétrica**
- . **Campo Elétrico**
- . **Potencial e Diferença de Potencial Elétrico**
- . **Capacitância e Capacitores**
- . **Equilíbrio Elétrico de Condutores**
- . **Algumas Atividades Experimentais**
- . **Temas para a Parte Experimental**
- . **Bibliografia**
- . **Anexos**

**NORBERTO NERY  
ROBERTO ATIENZA**

### INTRODUÇÃO

A eletrostática é basicamente o estudo das causas e efeitos do acúmulo de cargas elétricas em repouso.

As **leis** e conceitos envolvidos pela eletrostática são básicos e fundamentais no estudo da eletrotécnica. Através do histórico desta área observa-se que os primeiros fenômenos elétricos estudados pela humanidade foram os fenômenos eletrostáticos, destacando-se os efeitos produzidos por corpos eletricamente carregados, tais como produção de força e deslocamento por interação eletrostática. Uma abordagem interessante desse aspecto é feita por Dittrich e Volz(5), pela reflexão histórica em termos de desenvolvimento científico.

A Eletrostática permite também a compreensão das leis e fenômenos de eletrodinâmica, tais como corrente elétrica e trabalho realizado pelo deslocamento de cargas elétricas. Proporciona conceitos como campo elétrico e potencial, necessários ao entendimento de determinados equipamentos e processos (para-raios para descargas atmosféricas, tubo de raios catódicos, pintura eletrostática, máquinas fotocopadoras por eletrofotografia tipo xerox, filtros eletrostáticos, etc.) Fornece também os conceitos necessários para o estudo de alguns parâmetros de linhas de transmissão de energia elétrica, tal como a capacitância, além de conceitos como o da rigidez dielétrica, imprescindível para o estudo de materiais isolantes.

É inegável que o conceito de rigidez dielétrica, por exemplo, é necessário e importante para as disciplinas relacionadas a materiais Elétricos, Máquinas Elétricas, etc. Os conceitos de distribuição de campo elétrico e capacitância são importantes para disciplinas que abordem o estudo de linhas de transmissão e também para disciplinas ligadas à Eletrônica e que envolvam o estudo de semi-condutores porque permitem a compreensão do funcionamento de diodos, transistores e tinistores. Os conceitos de distribuição de campo elétrico e formas de blindagem eletrostática em instrumentos sensíveis de medição são necessários para a disciplina de medidas Elétricas .

Tendo em vista todas essas aplicações da Eletrostática, é de se esperar que o seu estudo proporcione o entendimento necessário dos seus conceitos e seus desdobramentos em diversas aplicações práticas.

Apesar da relevância, o ensino de Eletrostática tem apresentado vários problemas como:

1. É normalmente desenvolvido à parte de outros temas relacionados por ser interpretado como um conteúdo mais físico que técnico.
2. Tem sido difícil aos professores visualizarem aplicações práticas referentes a esse assunto.
3. A Eletrostática é relegada somente às disciplinas de Física ou, então, abordada descontextuadamente, desligada de conteúdos específicos como a Eletricidade, por exemplo.
4. Ausência de bibliografia. A maior parte dos livros de Física que abordam o assunto estão a nível de 29 grau. Dessa maneira, a abordagem suscinta com

promete a necessidade de compreensão desejável para o técnico em Eletrotécnica (vide referências 1, 2, 17).

Os livros disponíveis referentes ao nível universitário lançam mão de cálculos diferencial e integral e outros recursos mais avançados em termos de matemática, que fogem ao alcance e objetivo dos cursos técnicos de 2º grau. Isto ocorre devido às características intrínsecas ao assunto, como variações infinitesimais de carga, bem como a facilidade de se definir densidade de carga por meio de derivadas. Esses livros, portanto, funcionam mais para o professor como bibliografia complementar a fim de diminuir dúvidas que possam surgir em um ou outro problema mais complexo (Referências 7, 8, 9, 10 e 14). Para este estudo sugerimos a leitura do capítulo destinado à análise vetorial apresentada por Hayt (8) de maneira sucinta, porém completa, voltada ao estudo da Eletrostática e Eletromagnetismo. (Referência 8).

Uma outra alternativa em relação à bibliografia é a preparação e utilização de apostilas. Esta opção envolve o risco de se tratar o assunto através de uma análise qualitativa dos fenômenos e com descrições detalhadas de equipamentos utilizados sem se levar em conta uma análise quantitativa. Ou, ao contrário, valorizar exageradamente modelos matemáticos com predominância de exercícios e textos sucintos, com o prejuízo de tratamento fenomenológico físico. Embora este seja um risco comum à redação de qualquer assunto, é particularmente maior em relação a Eletrostática, uma vez que esse tema costuma ser encarado isoladamente sem ser considerado pré-requisito para o resto do curso e sem incluir os seus desdobramentos. É necessário, ainda, uma integração utilizando-se alguns requisitos da mate

mática, buscando-se uma compatibilidade com esse ANOTAÇÕES assunto em termos de conceito e métodos de cálculo já de domínio do aluno.

#### 5. Desenvolvimento da parte prática.

A parte prática de laboratório so é exequível em termos de verificação qualitativa, tais como a verificação da eletrização de um corpo e verificação de rigidez dielétrica.

Para experiências mais elaboradas para obtenção de dados quantitativos, seriam necessários equipamentos sofisticados que normalmente não existem nas escolas.

Em função dessas dificuldades é que estamos propondo iniciar esse trabalho de conteúdo específico através da Eletrostática, abordando os seguintes tópicos:

- Noção de carga elétrica e eletrização
- Interação eletrostática, influência do meio e permissividade elétrica
- Campo elétrico e suas características
- Potencial e diferença de potencial elétrico
- Capacitância e capacitores
- Energia eletrostática
- Equilíbrio de condutores.

Esses tópicos serão abordados enfatizando os aspectos que mais dificultam o ensino da Eletrostática na parte teórica, contendo, também, algumas sugestões para o desenvolvimento de algumas experiências.

Toda matéria é constituída de partículas elementares como prótons, elétrons e neutrons.

Estas partículas possuem propriedades físicas como massa e carga elétrica. Essas propriedades são atribuídas devido a alguns efeitos que se pode observar na natureza.

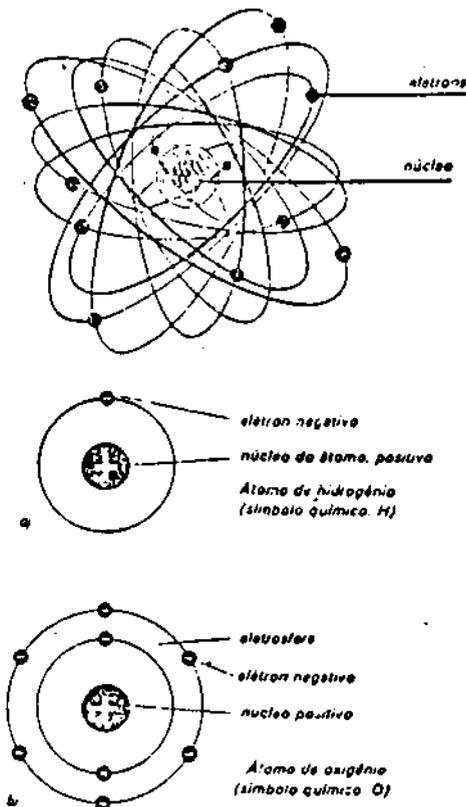
A massa, por exemplo, é uma propriedade física atribuída as partículas pois podemos observar, na natureza, a existência de uma força que age sobre os corpos que se encontram numa região do espaço onde existe um campo gravitacional. Esta força, segundo a lei de Newton, pode ser determinada como sendo,  $F = m.g$ .

A carga elétrica é, também, uma propriedade física destas partículas pois podemos observar a existência de uma força sobre os corpos, quando se encontram numa região do espaço onde haja um "campo elétrico". Esta força pode ser determinada por  $F = q.E$  onde  $q$  = carga elétrica,  $E$  = campo elétrico.

Assim, carga elétrica é uma propriedade da matéria tal como a massa. Podemos lançar mão de uma analogia entre os fenômenos de origem gravitacional (o movimento em queda livre de um pedaço de giz, por exemplo) e os fenômenos de origem elétrica. Esta analogia é útil na medida que nossos sentidos podem perceber mais facilmente os fenômenos de origem gravitacional do que os de origem elétrica.

Para se ter noção de carga elétrica é importante notar que a única maneira de se perceber a sua existência é através dos efeitos a ela atribuídos. Por exemplo, quando corpos que sofreram atrito se atraem ou se repelem, dizemos que possuem cargas elétricas ou que estão eletrizados.

Como a carga elétrica é uma propriedade inerente à matéria, é conveniente se ter um conhecimento prévio e elementar sobre estrutura da matéria, como o apresentado pelo modelo atômico de Rutherford Bohr, no qual o núcleo é constituído por um agregado de prótons e neutrons, e, envolvendo o núcleo, há um certo numero de elétrons girando em órbitas determinadas.



11.2 Representação simplificada:  
 a) de um átomo de hidrogênio;  
 b) de um átomo de oxigênio.

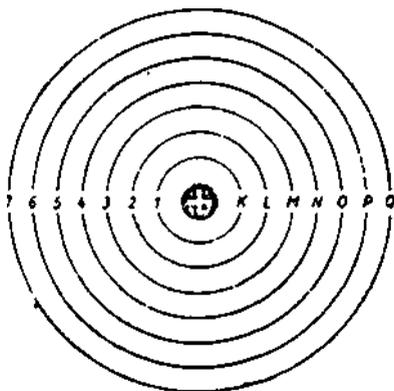


Fig. 1: Estrutura de um átomo

Este é um modelo bastante simples mas que apresenta as características necessárias para o entendimento da eletrostática, posto que a eletrização dos corpos consiste basicamente na perda ou aquisição de elétrons pelos seus átomos.

Caso o leitor sinta necessidade de recordar aspectos deste modelo atômico, recomendamos a leitura dos tópicos referentes a este assunto nos seguintes livros: Maya(12), Arnold (1), Dittrich (5), Johnson (9).

Ainda a respeito da carga elétrica e eletrização é importante observar que:

- Como se consegue produzir atração e repulsão entre corpos eletrizados, convencionou-se a existência na natureza de dois tipos de carga, arbitrariamente denominadas "positivas" e "negativas". Isto pode ser mostrado de modo bastante simples e fácil, utilizando-se dois pequenos bastões de vidro, um pedaço de seda e um de lã. Se atritarmos os dois bastões com seda e depois os aproximarmos, observaremos a existência de uma força de repulsão entre eles; se atritarmos um com seda e outro com lã e repetirmos o experimento observaremos a existência de uma força de atração. Esta eletrização por atrito é denominada também de Tribo-eletrização.

*Consideram alguns objetivos de formação do aluno de Eletrotécnica tais como: desenvolvimento do raciocínio científico, associação entre prática e teoria e outros que julgarem relevantes. Com base nesses objetivos pensem na melhor forma de explorar junto aos alunos a experiência dos bastões de vidro, indicando:*

1. o momento em que o experimento deve ser realizado e visando a que objetivo(S)
2. a atuação do professor (é quem demonstra o experimento? e quem dá instruções para que o experimento seja realizado? e quem explica os conceitos envolvidos na execução do experimento? e quem indaga sobre os conceitos?por que?)

#### ANOTAÇÕES

3 a atuação do aluno (e quem executa o experimento? e que observa? como descobre os conceitos, envolvidos? por que?)

Observe que o momento de exploração e a atuação do professor e dos alunos devem estar sobordinados aos objetivos a serem desenvolvidos. Assim, quando o objetivo é simplesmente fazer com que o aluno atente para a relação entre prática e teoria, o professor pode se limitar a uma demonstração da experiência e explicação dos conceitos envolvidos. No entanto quando se objetiva desenvolver a curiosidade científica, o raciocínio lógico que leva ao levantamento de hipóteses bem como a sua testagem, se alteram as atuações tanto do professor como do aluno e o momento previsto para a experiência.

Conforme demonstrado experimentalmente por Milikan (1909), a menor quantidade de carga existente é a carga do elétron, denominada carga elétrica fundamental. Esta experiência é descrita por Johnson (9) e outros.

A carga elétrica é uma propriedade inerente à matéria, não podendo portanto ser criada ou destruída (excetuando-se os processos de reações nucleares), o que se traduz como sendo o princípio da conservação das cargas. Portanto, a soma algébrica das cargas em um sistema eletricamente isolado é constante.

A existência ou não de cargas elétricas livres (elétrons fracamente atraídos pelos núcleos dos átomos) em um material permite classificar os materiais em condutores e isolantes, dependendo da densidade de cargas livres que se tenha. Por exemplo, em um grama de cobre, considerado bom condutor, existe por volta de  $10^{22}$  elétrons livres.

- Quanto à eletrização (obtenção de uma quantidade de cargas negativas diferente da quantidade de cargas positivas existente em um corpo), além da Tribo-eletrização, pode-se também praticar a eletrização por contato e por indução, em ambos os casos utilizando-se corpos condutores. As características destes tipos de eletrização são apresentadas de forma bem clara por Maya(12), Pauli(13), Johnson (9) e outros.

Qualitativamente é bastante simples realizar-se experiências para a verificação da eletrização de corpos. Pode-se utilizar eletroscópios tipo pêndulo, ou tipo folhas condutoras, que são equipamentos muito simples:

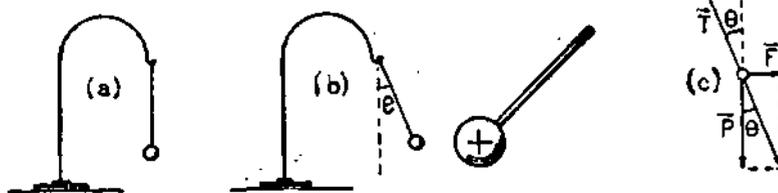


Fig. 2: a) Pêndulo elétrico solitário b) Pêndulo na presença de corpo eletrizado, c) Análise das forças que agem no pêndulo elétrico sua esfera se encontra em equilíbrio sob a ação de três forças que são o peso  $P$ , a força elétrica  $F$  e a tração do fio  $T$ .

## ANOTAÇÕES

- Você explicaria o conceito de carga elétrica de outra forma qual?

Procure identificar no programa do curso de Eletrotécnica em quais das disciplinas é importante e necessário o conceito de carga elétrica, suas propriedades e relacionamento com a estrutura da matéria

Como foi feita com a experiência dos bastões analise como essas situações relatadas ao lado poderiam ser exploradas nas aulas, identificando:

Objetivo(s)  
Momento de Aplicação  
Atuação do professor e do aluno

ANOTAÇÕES

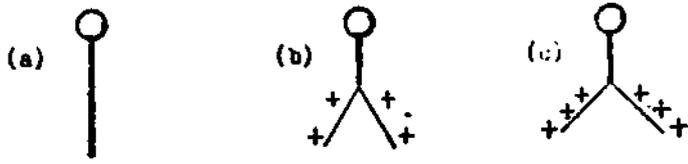


Fig. 3: a.) *Eletroscópio de folhas em estado neutro*  
b) *Eletroscópio eletrizado;*  
c) *Eletroscópio eletrizado com carga maior do que em b.*

## INTERAÇÃO ELETROSTÁTICA, INFLUÊNCIA DO MEIO PERMITIVIDADE ELÉTRICA

ANOTAÇÕES

A interação eletrostática compreende o estudo da força de origem elétrica existente entre corpos eletricamente carregados, ou seja, eletrizados.

CA. Coulomb (1785) demonstrou, através da utilização de uma balança de torção, a interação existente entre duas cargas elétricas puntiformes  $q_1$  e  $q_2$ , separadas por uma distância  $r$ . (cargas puntiformes são cargas cujas dimensões dos corpos em que se localizam são muito menores que as demais dimensões do sistema considerado).

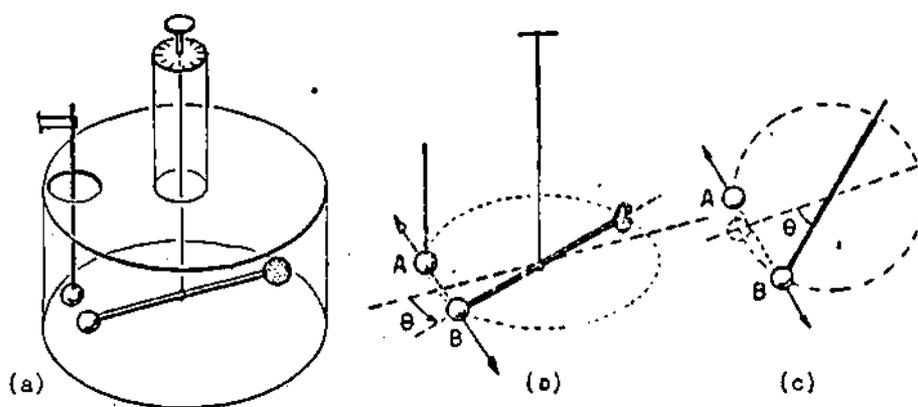


Fig. 4: Balança de torção. a) Vista geral do aparelho b) Eletrizadas com cargas homônimas as esferas A e B se repelem o travessão da balança sofre uma notação  $\theta$ . c) O mesmo fenômeno, em planta.

A expressão utilizada para a determinação do módulo desta força é conhecida como lei de Coulomb.

Matematicamente a lei de Coulomb pode ser expressa da seguinte forma:

$$F = K \cdot \frac{q_1 \cdot q_2}{r^2}$$

Esta expressão também é conhecida como Equação Fundamental da Eletrostática.

ANOTAÇÕES

K é uma constante dimensional que depende do meio onde se encontram as cargas, portanto K é uma característica do meio. Deve-se observar que o valor de K, para um determinado meio, dependerá do sistema de unidades utilizado. Estudos posteriores de eletromagnetismo demonstram que utilizando-se o Sistema Internacional de Unidades (SI), o valor de K para o vácuo é de  $9 \cdot 10^9$ .

Mais a frente, quando se estudar eletromagnetismo, verificaremos que, para simplificação das equações de Maxwell, é conveniente a seguinte substituição:

$$K = \frac{1}{4 \pi \epsilon}$$

onde  $\epsilon$  é também uma característica do MEIO, sendo denominada "Permitividade elétrica" ou "permissividade elétrica" ou ainda "constante dielétrica" do meio; e, utilizando-se o SI, o valor de  $\epsilon$  para o vácuo é de:  $\epsilon = \epsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12}$

Neste caso, a lei de Coulomb pode ser escrita na seguinte forma:

$$F = \frac{1}{4 \pi \epsilon} \cdot \frac{q_1 \cdot q_2}{r^2}$$

É comum também se utilizar a Permitividade relativa  $\epsilon_r$ , adotando-se a Permitividade do vácuo como referência. Assim podemos ter uma noção da ordem de grandeza da Permitividade do meio em estudo:

$$\epsilon_r = \frac{\epsilon_{\text{meio}}}{\epsilon_0}$$

Exemplos:

Meio	$\epsilon_r$
vácuo	1
água	81,5
mica	5,6 a 6,6
vidro	5,0 a 10

Um problema comum a esta altura é a definição de unidade carga elétrica, já que no SI a unidade de carga elétrica, coulomb (C), é uma derivada das unidades fundamentais de corrente elétrica e tempo.

( $1\text{C} = \frac{1\text{A}}{1\text{S}}$ , e normalmente ainda não se efetuou o estudo de corrente elétrica)

Uma alternativa é se definir a unidade de carga elétrica, o coulomb, como sendo a carga que, ao ser localizada no vácuo, à distância de 1 metro de outra carga igual, também no vácuo, repele-a com uma força de intensidade  $9 \cdot 10^9 \text{N}$ , pois como  $K = 9 \cdot 10^9$ , pela lei de Coulomb:

$$q_1 \cdot q_2 = \frac{F r^2}{9 \cdot 10^9}$$

para:  $F = 9 \cdot 10^9 \text{N}$ ;  $r = 1\text{m}$ , obtemos no SI,  $q_1 \cdot q_2 = 1\text{C}^2$ , portanto:

$$q_1 = q_2 = 1C$$

Assim, a unidade K no SI é:

$$U(K) = \frac{Nm^2}{C^2} \quad \text{e conseqüentemente}$$

$$U(\epsilon) = \frac{C^2}{Nm^2}$$

- Você teria alguma ou tra forma de introduzir a unidade de carga elétrica, o Coulomb? qual?
- Demonstre que como unidade de  $\epsilon$  também podemos utilizar  $\frac{F}{m}$  (farad/metro).
- Como estão os pré-requisitos de matemática para o desenvolvimento destes conteúdos?

## CAMPO ELÉTRICO

Para explicar mais facilmente o conceito de campo elétrico é conveniente fazer uma analogia com o conceito de campo gravitacional.

A todo momento assistimos manifestações do campo gravitacional terrestre de modo que sabemos, por experiência, que um corpo abandonado na proximidade da superfície terrestre irá cair. O estudo da Mecânica explica este fato dizendo que a Terra modifica as propriedades do espaço que a circunda, criando o que se chama de "campo gravitacional terrestre", que faz com que um corpo, com uma certa massa, situado num ponto deste campo, seja atraído para o centro da Terra.

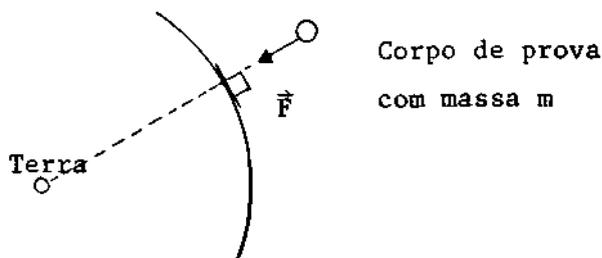


Fig. 5: Ação do campo gravitacional

Um corpo eletrizado situado em uma posição qualquer também modifica as propriedades do espaço nas suas proximidades. Podemos constatar este fato colocando uma carga elétrica puntiforme nessa região e verificando que esta é atraída ou repelida pelo corpo por uma força de origem elétrica, ou seja, devida à presença de cargas elétricas.

## ANOTAÇÕES

A aprendizagem de um conceito é uma tarefa complexa pois exige um processo de abstração a partir de uma realidade conhecida e significativa para o aluno.

Assim para promover a aprendizagem de conceitos é importante, a utilização de exemplos e analogias.

Que outros exemplos e analogias poderiam ser utilizados para que os alunos compreendam conceitos importantes desta área?

## CORPO ELETRIZADO

Nos condutores as cargas se distribuem pela superfície externa. De fato a carga de um corpo é a soma das cargas elétricas de mesmo sinal que assim se repelem tendendo a afastar-se o mais possível.

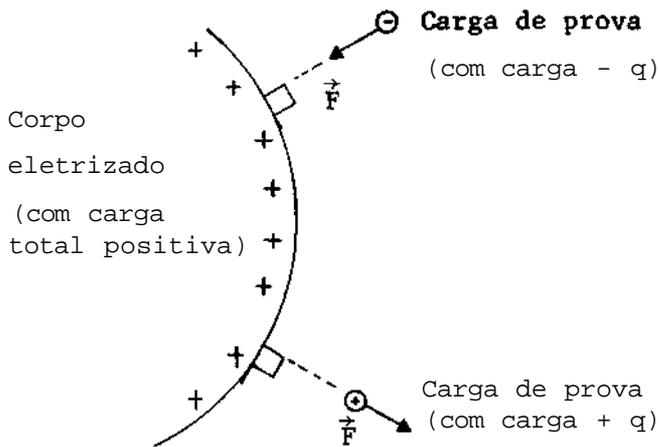


Fig. 6: Ação do campo elétrico

Analogamente à Mecânica, podemos explicar este fato dizendo que nesta região existe o que se convencionou chamar de "campo elétrico", que será simbolizado por " E ".

Portanto, podemos definir campo elétrico como uma propriedade dos pontos de uma região do espaço modificada por um corpo eletrizado, sendo a verificação da sua existência feita pela colocação de uma carga de prova nestes pontos; se esta ficar sujeita à ação de uma força de origem elétrica, concluiremos que no ponto em questão existe campo elétrico.

Como uma conceituação mais aprofundada do campo elétrico inclui necessariamente uma análise vetorial, esta abordagem deve ser coerente com o estudo de vetores realizado em Física ou Matemática, considerando o assunto como pré-requisito. Para uma análise mais detalhada do assunto recomendamos a leitura dos capítulos afins em Hayt(8) e Pauli(13). Neste caso, pode-se definir o vetor campo elétrico E num ponto, como sendo a força exercida por unidade de carga colocada no ponto, ou seja:

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

GAIOLA DE FARADAY ANTE  
PAROS ELETROSTATICOS  
OU BLINDAGENS ELETROSTATICAS

Verifique que o campo,  
no interior de um condutor é sempre nulo

Se o campo neste ponto for devido a vários corpos eletrizados, ou uma distribuição de cargas o campo resultante é a soma vetorial dos campos devidos a cada um destes corpos.

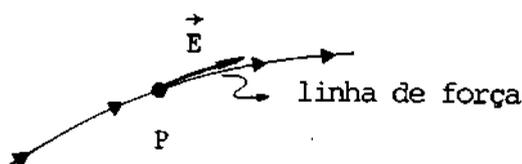
Note que o sentido de  $\vec{E}$  e o mesmo de  $\vec{F}$  se a carga  $q$  (carga de prova) for positiva, e será contrário ao sentido de  $\vec{F}$  se a carga de prova for negativa.

$$\vec{E} = \frac{\vec{F}}{-q} \Rightarrow -\vec{E} = \frac{\vec{F}}{q}$$

Porém, deve-se tomar o cuidado de verificar que tanto o módulo como o sentido de  $E$  independem da carga de prova, pois o sinal e módulo da carga influem proporcionalmente na força.

Uma abordagem bastante prática também pode ser feita a respeito do campo elétrico utilizando-se o conceito de linhas de força (ou linhas de campo), introduzido por M. Faraday, através do qual podemos ter uma visualização gráfica do campo elétrico em sua região de existência, ou seja, um mapeamento do campo elétrico.

Segundo o estabelecido por Faraday as linhas de força tem o mesmo sentido do campo, são tangentes a este vetor em cada ponto,



#### ANOTAÇÕES

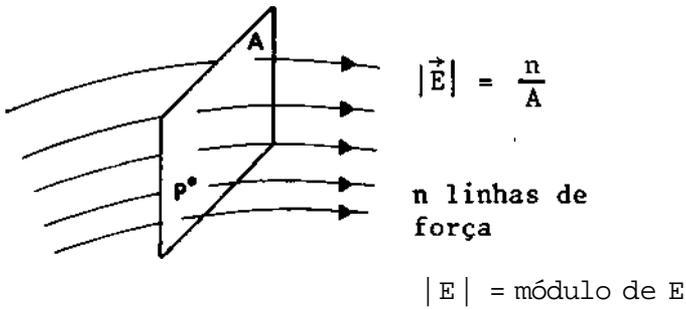
*Esse fato indica que um campo elétrico nunca penetra num espaço completamente envolvido por um condutor. Qualquer corpo A, colocado no interior de um condutor oco B, não sofre a ação de campos elétricos EXTERNOS.*

● A B esta constatação tem aplicação prática imediata para a proteção de instrumentos eletrônicos sensíveis contra a influência dos campos eletrônicos externos [ruídos] que, não só perturbariam a leitura, como poderiam torná-la incorreta. Para tanto, encerra-se o instrumento em uma caixa metálica ligada à terra.

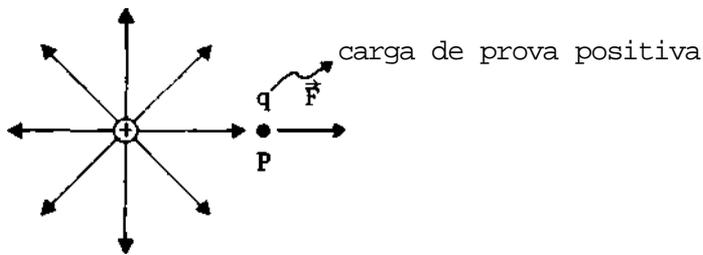
0 Como voce explicaria a independencia do módulo e sentido do campo elétrico em relação à carga do prova?

e o módulo do campo é proporcional à densidade de linhas de força nas proximidades do ponto.

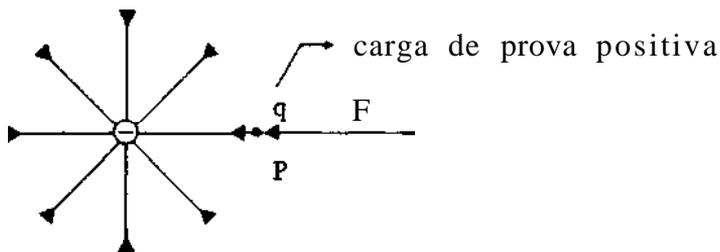
**ANOTAÇÕES**



Como as linhas de força têm o mesmo sentido do campo, uma carga positiva cria nas suas proximidades um campo conforme representado a seguir, já que se colocamos uma carga de prova positiva nesta região (nesse caso como já vimos o campo terá o mesmo sentido que a força), a força que se obtém é de repulsão.



Analogamente, para uma carga negativa obtemos:



O conhecimento da distribuição do campo elétrico é notadamente importante para a determinação da isolação de condutores e equipamentos elétricos em geral. É importante também como aplicação prática no caso de linhas de transmissão de energia elétrica, onde o campo eletromagnético influi nos parâmetros das linhas, tais como capacitância e indutância. A distribuição de campo mostrada na figura a seguir é utilizada para cálculo destes parâmetros.

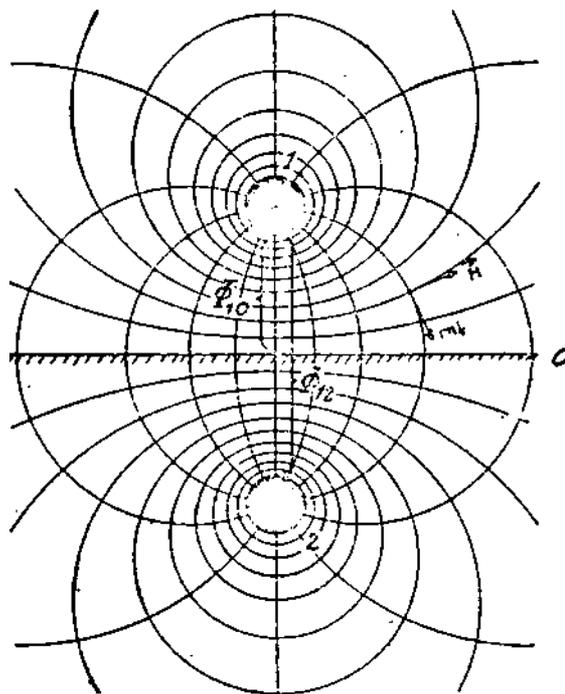


Fig. 7: Linhas de campo elétrico e magnético entre dois condutores, paralelos

Outros exemplos e aplicações a respeito podem ser encontradas nas diversas referências bibliográficas no final do texto.

Dimensionalmente, como o campo elétrico é definido por:  $\vec{E} = \frac{\vec{F}}{q}$ , teremos:

- Tente esboçar a distribuição de linhas de força para os seguintes arranjos de carga: (em caso de dúvida, consulte a bibliografia).

a)     ⊕     ⊖

b)     ⊕     ⊕

c)     ⊖     ⊖

As linhas de campo podem se cruzar? Por que?

$$U(\vec{E}) = \frac{U(\vec{F})}{U(q)} = \frac{N}{C} \text{ (Newton/Coulomb), que é a}$$

unidade do campo elétrico no SI.

Uma característica importante dos materiais, relacionada ao campo elétrico, é a chamada "rigidez dielétrica", que é a intensidade limite de campo aplicada a um dielétrico (isolante), acima da qual este perde a sua capacidade de isolante, tornando-se condutor. Esta característica é muito importante em termos de equipamento, tipo isoladores para linhas de transmissão, distribuição, materiais isolantes para máquinas elétricas tais como óleo para transformadores, papel impregnado, fibras, esmaltes, epoxy, etc, para característica de isolamento de condutores e bobinas em enrolamentos de motores geradores e transformadores.

Os ensaios para determinação destas características são realizados, normalmente, seguindo-se as normas, por exemplo: NBR-6869. Determinação da rigidez dielétrica de óleos isolantes - Método de ensaio (anexo 1), e os métodos de ensaio, por exemplo: P-MB - 330 Determinação da Rigidez Dielétrica dos Materiais Isolantes Sólidos sob Frequência Industrial. (Anexo 1)

Para realização destes ensaios utilizam-se os Hipots, que produzem tensões elevadas em CA, ou seja, produzem o campo elétrico necessário para a determinação da rigidez dielétrica. A título de ilustração anexamos alguns catálogos com as características destes equipamentos (anexo 2). Deve-se notar que para a operação destes equipamentos é imprescindível a observação de procedimentos adequados à segurança devido à presença de altas tensões. Existem órgãos oficiais que realizam estes ensaios, fornecendo relatórios aos interessados. Em São Paulo isto pode ser feito no Instituto de Eletrotécnica da Universidade de São Paulo.

## ANOTAÇÕES

*Tente demonstrar que a unidade do campo elétrico também pode ser  $\frac{V}{m}$  (volt/metro).*

- Os alunos tem apresentado dificuldades quanto a compreensão destes conceitos?
- Quais alternativas metodológicas têm sido utilizadas?
- Existe na sua região algum órgão ou empresa que realiza os ensaios normalizados para determinação da rigidez dielétrica? Qual?
- Você tem idéia do custo de um ensaio deste tipo?
- É realizada alguma experiência no laboratório em que isto seja utilizado?

A partir do conceito de campo chega-se ao estudo do potencial e ao entendimento de diferença de potencial elétrico.

Essa noção pode ser materializada através de exemplos de outras áreas, como os da Mecânica, tendo em vista ser um conceito que deve ser absorvido pelo conhecimento de suas causas, e, assim, indiretamente verificar sua existência e quantificar seu comportamento. Colocações desse gênero podem ser encontradas em várias das bibliografias sugeridas, mas em especial salientamos os enfoques dados por Sears(15) - Volume II, onde se mostra que pode ser recuperado o trabalho feito ao separar duas partes do sistema que se atraem mutuamente (terra e corpo).

A determinação de um campo por meio do vetor campo envolve, em geral, o conhecimento de três elementos: a direção, o sentido e o módulo de  $E$ . Em lugar desses elementos podem ser dadas as três componentes cartesianas de  $E$ , num sistema de referencia.

Esse fato levou os pesquisadores do século XVIII e XIX à procura de um processo para determinação de um campo que envolvesse o menor número de elementos. Descobriu-se que isso era possível quando a **força** associada aos pontos da região fosse tal que o trabalho realizado pela mesma dependesse só da posição inicial e final da trajetória. Isto ocorre com o **campo** da gravitação e se passa também no campo eletrostático.

É possível, assim, mostrar uma função, uma

atribuição, um dever dos pontos do campo a partir do qual o campo pode ser determinado. Associar este conceito à queda livre, por exemplo, facilita o entendimento. Da mesma forma que uma pedra abandonada no campo gravitacional se desloca, a força do campo agente na carga elétrica abandonada em um campo elétrico tende a deslocá-la na própria direção e no próprio sentido.

#### ANOTAÇÕES

Essa função ou atribuição acima referida denomina-se função potencial ou simplesmente potencial do ponto.

A diferença dos valores do potencial que dois pontos assumem é igual de sinal contrário ao trabalho realizado pelo campo, por unidade de carga, quando a unidade de carga positiva é transportada de um ponto a outro.

$$V_{\text{inicial}} - V_{\text{final}} = \frac{\zeta}{q} \quad \text{onde } \zeta \text{ trabalho para transporte de carga } q \text{ de A até B.}$$

O incremento de potencial entre os pontos A e B é (conforme definição de incremento, em matemática) o potencial final menos o potencial inicial:

$$\Delta V = V_B - V_A$$

No cálculo do trabalho proposto intervém a grandeza oposta (potencial inicial menos o potencial final) denominada "diferença de potencial entre os pontos A e B" ou "tensão entre os pontos A e B" e representada pelo símbolo  $U_{AB}$ , ou simplesmente  $U$ .

$$V_A - V_B = \Delta V = U_{AB} = U$$

A diferença de potencial entre os pontos A e

*Hã uma relação entre o lançamento de uma pedra para cima ou o deslocamento de uma carga contra as forças de campo. Nas duas situações há uma correspondência de um trabalho resistente representado por sinal negativo.*

B de um campo eletrostático é numericamente igual ao trabalho que o campo efetua sobre uma carga positiva e unitária que for levada de A para B. No caso de carga negativa, o deslocamento tem sentido oposto ao do campo. Em qualquer dos casos, o trabalho realizado pelo campo é sempre positivo, pois o deslocamento não contraria as forças de campo.

## ANOTAÇÕES

Assim como as temperaturas em um sistema de corpos nos permitem conhecer o sentido em que tendem a efetuar-se as trocas de calor, os potenciais no campo eletrostático nos permitem prever o sentido em que tendem a mover-se cargas abandonadas no campo, em repouso.

A definição do potencial em um ponto depende do referencial adotado (nível de referência). Porém, a diferença de potencial entre dois pontos, ou Tensão, é inteiramente definida, da mesma forma que na Mecânica apenas as variações de energia potencial são inteiramente determinadas.

Cabe, nessa oportunidade, lembrar a problemática de referencial com vários exemplos, como a Terra e os satélites estacionários, a Terra e o Sol e outros. Para fixar ideias supomos que este nível de referência é o tampo da mesa do laboratório. Se o nível de referência for agora escolhido numa menor altura, por exemplo, como no assoalho, a energia potencial de corpos sobre a mesa não é mais zero. Se o nível de referência for escolhido no teto, a energia no tampo da mesa se apresenta negativa.

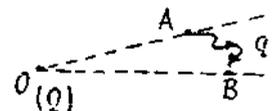
Os exemplos ilustram o seguinte fato: para se definir o POTENCIAL num ponto é preciso convencionar uma posição de referência e atribuir, arbitrariamente, um valor no potencial, nessa posição. A escolha da po

*Este fato é igualmente importante para compreensão dos assuntos que seguirão sobre equilíbrio elétrico de condutores e da corrente elétrica. Esses conhecimentos facilitarão a introdução à Eletrodinâmica e à Eletrônica, partindo do conceito de corrente elétrica como sendo as cargas em movimento.*

Não confundir  
O → referencial

e  
B → ponto ou posição de referência

Consideremos uma carga de prova  $q$  situada em ponto qualquer P do campo de uma carga  $Q$



Seja B um ponto fixado, arbitrariamente distinto de O. Diz-se que a energia potencial da carga  $Q$  no ponto A é o trabalho que o campo realiza quando a carga  $Q$  é levada do ponto A

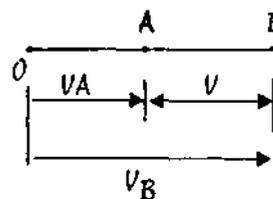
sição de referencia depende do problema particular que se estiver examinando, assim como o valor atribuído ao potencial, nessa posição.

#### ANOTAÇÕES

ao ponto de referencia

B.

Exemplo:



Dessa forma, se em um campo eletrostático se considerar um percurso fechado qualquer, e se transportar uma carga de prova ao longo desse percurso até completar a volta, o trabalho realizado pelo campo é nulo.

Todo campo de forças cujo trabalho entre dois pontos não depende da forma da trajetória é conservativo. Aos campos conservativos, e são a eles, associam-se o conceito de energia potencial e o conceito de potencial.

Essa movimentação de cargas, que estamos aqui estudando, promove no seu meio material a dissipação de energia elétrica em virtude do choque das partículas elétricas em movimento com as partículas do meio condutor; o fenômeno é denominado efeito JOULE\* e consiste na produção de energia térmica à custa de energia elétrica. Exemplos do filamento da lâmpada elétrica e da faísca elétrica de tubos catódicos, diodos e outros também ajudam, não só a ilustrar esses conhecimentos como mostram o uso de tais conceitos na Eletrodinâmica, na Eletrônica, na Eletroquímica e na Eletromedicina.

Uma apresentação oportuna nesse sentido é feita

\* Alguns estudos poderiam ser inseridos, com grande proveito, a respeito de como o cálculo de trabalho pode ser obtido, atribuindo-se à força que surge na carga um valor médio, já que a força sendo variável, o trabalho pode ser obtido dividindo-se a trajetória em pequenas porções.

ta por SEARS e ZEMANSKY no seu volume de Física onde primeiramente apresentam mecanismos para retirada, quase que totalmente, do ar de recipientes de vidro ou metálicos, como no caso de lâmpadas elétricas, das válvulas de rádio e de TV, dos osciloscópios de raios catódicos, das células fotoelétricas e das válvulas de raios X. Esses aparelhos não poderiam existir se não houvesse meios de produzir o vácuo. Em seguida apresentam a experiência de Thomaz Edison, onde elétrons são liberados do filamento de uma lâmpada aquecida e atraídos por uma placa positiva, mas repelidos por uma placa negativa. A liberação de elétrons de um fio aquecido é chamada emissão ou efeito termiônico, o que é demonstrado na figura a seguir

ANOTAÇÕES

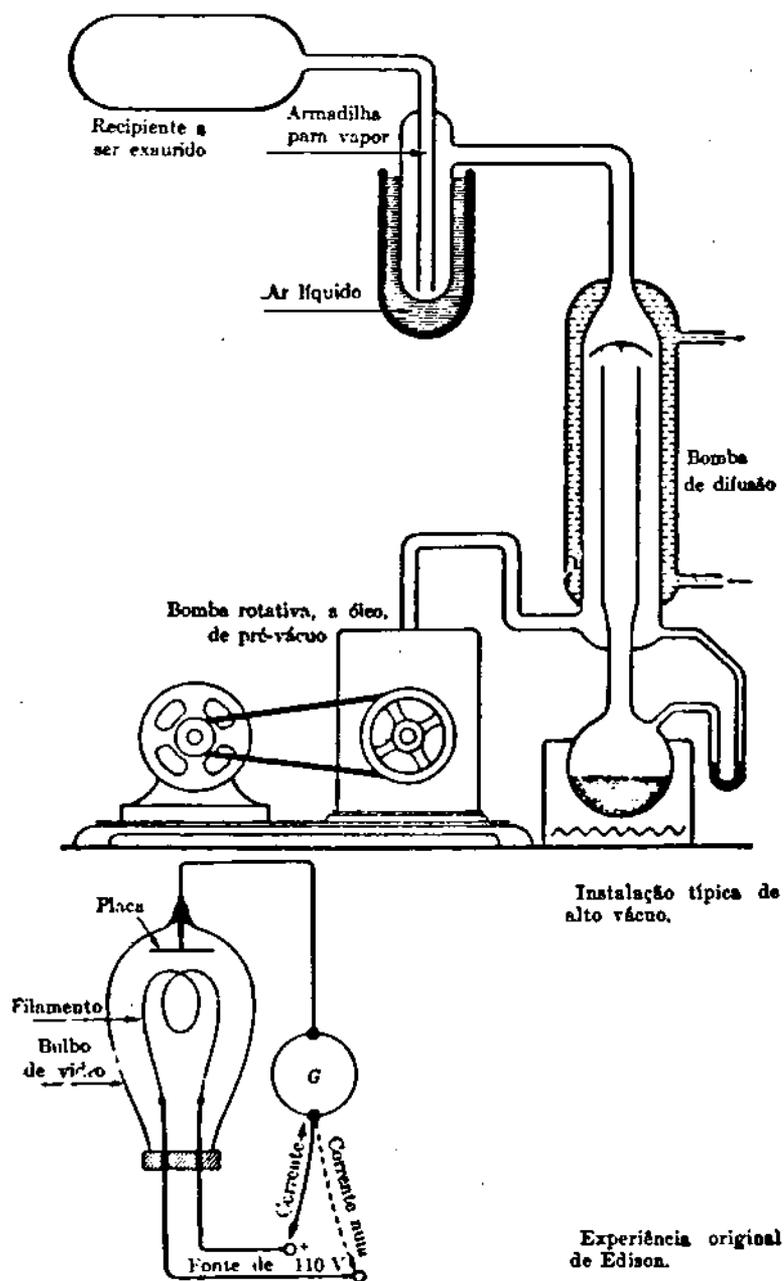
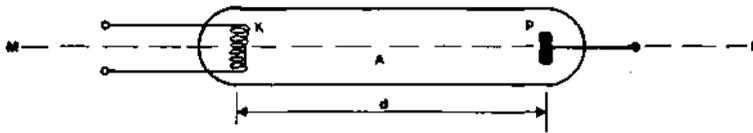


Fig. 7A: *Instalação típica de alto vácuo e Experiência original de Edison*

Basicamente é o mesmo que acontece no díodo representado, na sua forma mais simples, no livro do Prof. Johnson, por uma ampola de vidro A, altamente evacuada, onde se encerra um filamento K e uma placa P, se parados um do outro por uma certa distância d.



Pode-se admitir, no caso, que os elétrons sejam liberados pelo filamento aquecido ao rubro, com velocidade desprezível. Entre a placa P e o filamento K estabelece-se uma diferença de potencial  $V_p - V_k = U$ , sendo  $V_p > V_k$ . Os elétrons emitidos de carga (e) e massa (m) são atraídos pela placa.

O campo elétrico (E) efetua sobre o elétron o trabalho:

$$\zeta = (-e) (V_k - V_p) = e U$$

Pelo Teorema de Energia Cinética esse trabalho é igual à energia cinética adquirida pelo elétron, concluindo-se:

$$e V = \frac{m v^2}{2}$$

$$v = \sqrt{2 \cdot \frac{e \cdot V}{m}} \quad e$$

como  $\zeta = F \cdot d$  e  $F = e \cdot E$

segue-se que:  $\zeta = e \cdot E \cdot d$

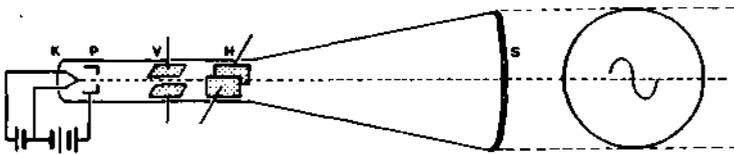
que comparada com a expressão anterior conclui-se que:

$$E \cdot d = V \quad E = \frac{V}{d}$$

Da equação deduzida para a velocidade (v) depreendemos que esta não depende da distância  $d$ ; entretanto esta grandeza influi na intensidade do campo  $E$  que interfe

re na força exercida no elétron  $F$  e na aceleração sofrida pelo elétron. Se chega assim a uma informação fundamental quanto maior a distância entre o filamento e a placa, tanto menor é a aceleração dos elétrons, mas a velocidade atingida no fim do percurso é invariável. Ainda, quanto maior for a tensão, mais intenso é o campo elétrico e surge a possibilidade de descarga disruptiva (faísca), com possíveis danos para instalações em seres vivos.

Outras aplicações correntes podem ser lembradas nessa oportunidade para se mostrar as diversas aplicações desta teoria, como o caso dos tubos de raios catódicos aplicados em osciloscópios, TVs, vídeos e terminais de micros e na eletromediana como na tomografia computadorizada, cintilografia, ecocardiograma e em monitores de eletrocardiograma. No caso mais simples um tubo apresenta o seguinte esquema:



- K - é a fonte emissora (cátodo) ou canhão eletrônico
- P - placa para focalização do feixe
- V - campo elétrico horizontal para deflexão
- H - campo elétrico para deflexão vertical
- S - parede do tubo recoberta por uma camada fluorescente

Em virtude da persistência das imagens na retina e da duração da fluorescência, quando o ponto de incidência descreve uma curva, sobre o anteparo, o observador vê a curva.

Na mesma linha uma abordagem sobre o radar, microscópio eletrônico, telescópio eletrônico podem completar o assunto e evidenciar a importância da eletrostática em outros campos técnicos.

Retomando verifica-se que desse estudo da movimentação das cargas podemos conceituar um volt como a diferença de potencial (d.d.p.) existente entre dois pontos, quando o campo realiza o trabalho de um joule no transporte de uma carga unitária. Assim, para transportar um coulomb de carga de um ponto para o outro, temos:

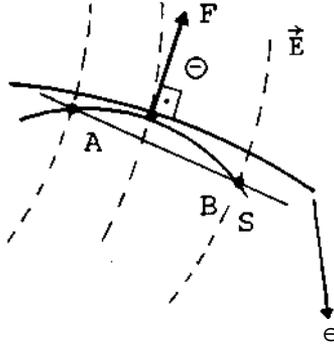
$$V_{\text{inicial (A)}} - V_{\text{final (B)}} = \frac{\zeta}{q} \text{ portanto:}$$

$\underbrace{\text{inicial (A)} \quad \text{final (B)}}_{\text{d.d.p. (volt)}}$	$\zeta = \text{trabalho (joule)}$	ou ainda $V_A - V_B = \frac{\zeta}{q}$  $\zeta = q (V_A - V_B)$
$q = \text{carga (coulomb)}$	$1 \text{ volt} = \frac{\text{joule}}{\text{coulomb}}$	

Vamos imaginar um móvel solto num plano inclinado. Ele realiza trabalho pois há uma diferença de potencial entre um ponto e outro. Vamos agora imaginar um móvel num plano horizontal. Ele não realiza trabalho pois não há diferença de potencial entre dois pontos.

Se dois pontos assumem o mesmo potencial em uma superfície, não haverá possibilidade de realizar trabalho. A superfície onde não acontece trabalho é chamada de EQUIPOTENCIAL (S).

De fato, sendo o  $V_A = V_B$ , resulta  $\zeta = q (V_A - V_B) = 0$  (zero), o que se justifica lembrando que a definição de trabalho aplicada ao caso se entende:



$$\zeta = |\mathbf{F}| \cdot \overline{AB} \cdot \cos \theta$$

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

Isto é, para  $\zeta$  ser nulo só se  $\theta = 90^\circ$  onde a força é perpendicular ao deslocamento.

Vários livros a respeito do assunto abordam com clareza a capacidade eletrostática de um condutor solitário e o fenômeno denominado condensação eletrostática, que consiste no aumento da carga de um condutor sem aumento do seu potencial. Destacamos um estudo racional e de fácil entendimento colocado pelo Prof. Johnson (9) em seu livro sobre ELETROSTÁTICA, onde, com simplicidade, chega ao conceito de capacidade ou capacitância de um condensador como a relação invariável entre essa carga e sua tensão:

$$C = \frac{Q_{\text{Armadura coletora}}}{V_{\text{arm. colet.}} - V_{\text{arm. cond.}}} = \frac{Q}{U}$$

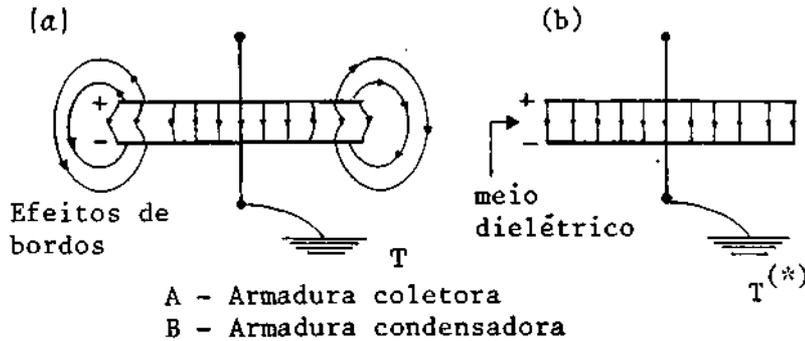
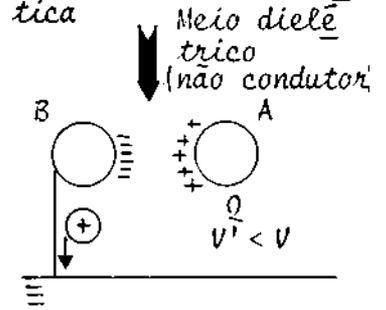


Fig. 8: a) **Caso real:** a carga induzida é menor do que a carga indutora; o campo é uniforme na região mediana, mas não junto aos bordos; existe campo fora do condensador.  
 b) **Caso ideal:** a carga induzida é igual à carga indutora; o campo é uniforme e só existe dentro do condensador, onde se despreza uma pequena "dispersão" do campo junto às bordas, tendo em vista a pequena distância entre as armaduras em confronto com sua extensão.

(\*) T - é a Terra ou genericamente qualquer condutor capaz de receber a carga induzida; ainda poderá ser a armadura coletora de outro condensador como acontece na associação de condensadores em série.

ANOTAÇÕES

Condensação Eletrostática



Um gerador carregou o corpo A ao potencial  $V$  pela aproximação de um corpo B ligado à TERRA o condutor A passa para o potencial  $V' < V$ . Assim, se ligarmos novamente A ao gerador, ele receberá mais uma carga  $\Delta Q$  para se elevar novamente ao potencial  $V$ . Esse é o mecanismo da condensação de cargas.

A partir da noção de potencial chega-se à ideia do Capacitor, e à noção da grandeza capacitância. É importante caracterizar neste momento o conceito de Rigidez dielétrica do meio dielétrico de forma qualitativa, lembrando que quando aumentamos a diferença de potencial entre as armaduras de um condensador, o campo elétrico aumenta, e que, em virtude de modificações que têm lugar no dielétrico, pode levar passagem de corrente através do mesmo (faísca/arco) e a perda de carga (queima do capacitor).

É útil, para o entendimento da noção anterior, descrever não só as descargas atmosféricas (raios) através do surgimento da tensão que as origina como bem descrevem vários autores, mas também o escoamento de cargas pelas pontas dos para-raios que são acompanhados de luminescência (eflúvios elétricos ou descarga em coroa, popularmente conhecida como fogo de Sant'Elmo). No caso do meio dielétrico a descarga chama-se CORRENTE ELÉTRICA NO DIELÉTRICO e a descarga DISRUPTIVA é denominada explosiva.

*Passando uma nuvem eletrizada nas imediações da construção, os para-raios sofrem influência eletrostática; a carga induzida em sua parte superior, de sinal oposto ao da carga da nuvem, produz um campo intenso e ioniza o ar nas imediações. Assim, oferece-se à descarga, se ela ocorrer num trajeto inofensivo (de menor resistência) para a estrutura. Quando o raio não solta, o escoamento das cargas pelas pontas dos para-raios é acompanhado de luminescência do ar nas vizinhanças (eflúvios elétricos ou descarga coroa), fenômeno conhecido por fogo de Sant'Elmo.*

(ANEXO 5)

Eis em milhares de volts por centímetro alguns valores de rigidez dielétrica:

Ar . . . . .	32 (KV/cm)
Papel . . . . .	40 a 100
Papel parafinado . . . . .	400 a 500
Mica . . . . .	600 a 750
Vidro . . . . .	75 a 300

Além da apresentação dos aspectos teóricos dos condensadores é necessário explorar suas aplicações práticas. Para isto consulte os Anexos 3.

As garrafas de Leyde (condensadores de laboratório), utilizadas em alta tensão (A.T.), possuem uma espessura de dielétrico relativamente alta. A percepção desta característica permite relacionar qualitativamente a espessura do dielétrico ao nível de tensão relativo à aplicação capacitor.

Assim como a espessura, o material é outro aspecto construtivo. A influência da natureza do dielétrico sobre a capacitância foi posta em evidência por FARADAY, introduzindo diferentes materiais entre as armaduras. Por exemplo, introduzindo-se entre as armaduras, onde só existia o ar, uma lâmina de vidro, observa-se uma diminuição da diferença de potencial entre as mesmas, o que se traduz dizendo que a capacidade do condensador aumentou.

Conclui-se que a capacitância de um capacitor também varia consideravelmente com a natureza da substância isolante entre as placas. Este material isolante é geralmente dielétrico, e a razão entre a capacitância de um capacitor fornecido com um determinado dielétrico entre suas placas, e a capacitância do mesmo capacitor quando entre as placas existe o ar ou o espaço vazio, se denomina constante dielétrica (vide pg. seguinte).

SUBSTÂNCIA	CONSTANTE DIELÉTRICA	ANOTAÇÕES
Ar. ....	1	
Papel Parafinado. ....	2,0 - 2,6	
Borracha. ....	2,0 - 3,5	
Óleo. ....	2,2 - 4,7	
Mica. ....	2,5 - 6,6	
Goma-laca. ....	2,9 - 3,7	
Vidro. ....	5,4 - 9,9	
Água. ....	81	

A razão pela qual a capacitância varia com o dielétrico é que os próprios dielétricos contêm um grande número de prótons e elétrons que, embora não possam circular pela ação do campo, podem contudo mover-se apreciavelmente. Isto é, acham-se agregados de um modo elástico e não rígido. A deformação da estrutura do dielétrico, produzida ao carregar o capacitor, tem um efeito fundamental sobre as forças de atração e repulsão que ajudam ou se opõem à passagem de carga e, portanto, é uma ação significativa sobre a capacitância.

A mica ou papel parafinado é usado com frequência como dielétrico. São encontrados no comércio capacitadores de mica e de papel parafinado, com dimensões relativamente pequenas e com capacidade variadas e, conseguindo trabalhar, em alguns casos, até 1000 volts. Esses capacitores são fabricados de forma a se constituírem por vários capacitores associados.

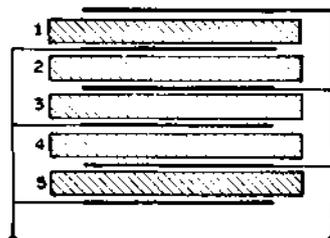
#### CONDENSADORES DE FRANKLIN

É um tipo de condensador que facilita a introdução do estudo do processo de fabricação, já que é formado por lâminas retangulares, iguais entre si, cada uma com área  $A$ , e,  $n$  lâminas isolantes entre si, um

pouco maiores que as lâminas metálicas e de espessuras h. As lâminas empilhadas sobrepondo alternadamente uma lâmina condutora e uma isolante e, ligadas associadamente, constituem o condensador.

#### ANOTAÇÕES

C - capacidade do condensador



Pode-se demonstrar que

$$C = n \cdot \epsilon \cdot \frac{A}{h}$$

onde.

$n$  = nº de lâminas dielétricas

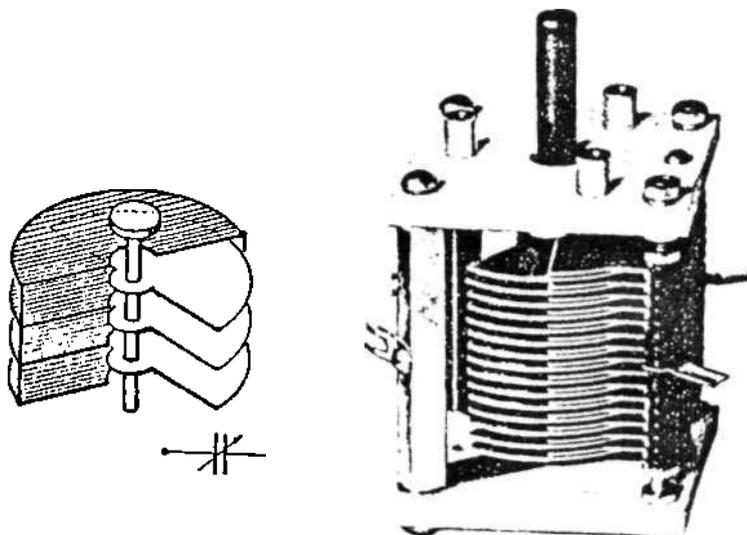
$A$  = área da lâmina

$h$  = espessura da lâmina

$\epsilon$  = constante dielétrica do meio

Fig. 9: Condensador de Franklin

Inicialmente, nas aplicações práticas desses componentes, foi muito empregado o condensador a ar, de capacidade variável, do tipo Franklin onde as lâminas metálicas que constituem a armadura são rígidas e rigidamente ligadas entre si.



Você costuma analisar com os alunos a variação das grandezas com a rotação do eixo do condensador?

essa análise facilita a compreensão de que conceito?

Fig. 10: Condensador Variável

Os condensadores variáveis são empregados em aparelhos de rádio, televisão e similares.

No processo de fabricação dos capacitores em geral pode-se usar o papel alumínio alternado com o papel parafinado, funcionando respectivamente como armaduras e meio dielétrico do capacitor.

O papel alumínio é atacado quimicamente di

rante o processo de fabricação promovendo uma certa rugosidade, o que vai produzir um aumento da área  $A$  em relação à superfície lisa, de modo a viabilizar maiores valores para  $C$  sem aumentar muito o tamanho físico do capacitor.

A alternância entre o papel alumínio e o papel refinado, como isolante, forma um condensador tipo Franklin. Os papéis enrolados simultaneamente e associados convenientemente produzem uma capacidade  $C$ .

Desde a inclusão do pacote acima descrito em uma caneca, o acesso das conexões (terminais) e as normas brasileiras pertinentes sobre o assunto e outros documentos anexos podem ser explorados para se concretizar o conhecimento prático sobre o assunto. (Revista Siemens, 4/83, Boletins Técnicos - ICOTRON, MB-451, partes II-T e II-U, Boletins Técnicos Lorenzetti-Anexo 3).

São estudos de grande interesse para o relacionamento das grandezas eletrostáticas e suas aplicações:

- Eletrômetro de Disco, instrumento criado por Lord Kelvin, destinado a medições de tensões relativamente elevadas através das forças atrativas entre as armaduras (placas de um condensador).
- A experiência de Milikan que desenvolveu um processo muito interessante para determinação de carga elementar do elétron, através de um condensador plano a ar, que mediante o uso de um nebulizador produz gotículas de óleo que se injetam, através de um orifício, no espaço entre as armaduras. Através do Raio X, ioniza-se o ar agregando um ou mais elétrons às gotículas de óleo de modo a possibilitar o seu estudo e a determinação da carga.

*Você costuma relacionar esses assuntos com a Física?*

Essas aplicações são práticas e não comerciais e de grande valia laboratorial. Porém, existem muitas aplicações tecnológicas, práticas, comerciais, importantes e úteis que poderiam ser incluídos na discussão dos empregos dos fenômenos eletrostáticos. Por exemplo, o precipitador eletrostático é um poderoso aparelho de prevenção à poluição atmosférica. Graças a ele é possível viver nas vizinhanças de uma fábrica de cimento, ou de uma indústria de processamento de minérios. Geralmente, o precipitador extraí mais de 99% da cinza e poeira dos gases de uma chaminé de uma usina termelétrica à carvão. A ideia básica desta técnica antipoluidora está esquematizada na fig. 11. A parede externa de um conduto metálico fica ligada a terra, enquanto um fio condutor que lhe é coaxial tem um potencial elevado e negativo. Com esta geometria (que corresponde a um capacitor cilíndrico) há um campo elétrico não uniforme, com as linhas de força dirigidas para o eletrodo (fio) negativo. Perto deste eletrodo o campo tem valores elevados, suficientes para ionizar o ar, o que transforma a mistura quiescente das moléculas neutras numa efervescência de eletrons livres e íons positivos, dando origem ao efeito corona. Os eletrons desta descarga em corona são repelidos pelo fio. A maioria deles vai ligar-se às moléculas de oxigénio, formando íons  $O_2^-$ , que são acelerados para fora. À medida que esta corrente de íons passa através do gás, ficam carregadas pela captura de íons, e são forçadas pelo campo para a parede externa. Quando as partículas são sólidas retiram-se periodicamente do conduto mediante agitação que as faz cair numa tremonha; quando são líquidas o resíduo escorre pelas paredes e é recolhido em baixo.

#### **ANOTAÇÕES**

*Como você discute essas aplicações práticas? Incentiva os alunos a pesquisas na área e a exposição aos companheiros de sala?*

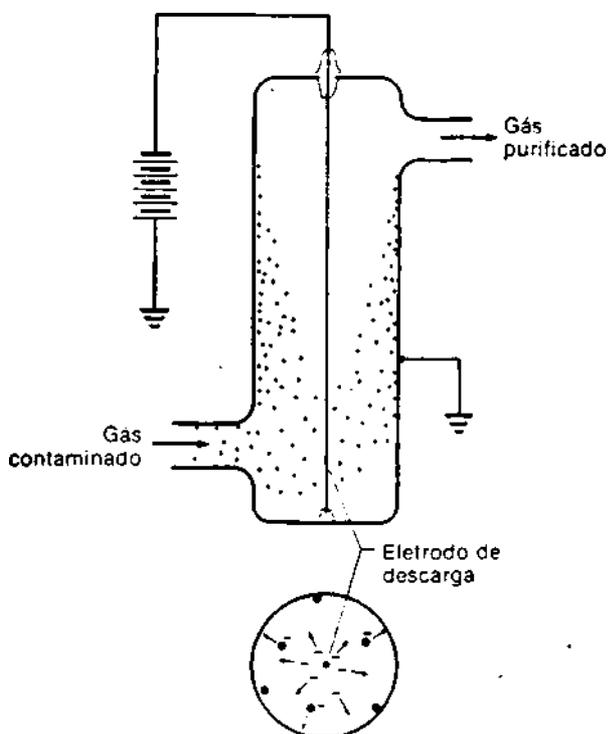


Fig. 11: ?Precipitador eletrostático

Outros exemplos técnicos além da precipitação eletrostática incluem: pintura eletrostática com tinta de "spray"; separação eletrostática de partículas de rocha em minerais; tubos de raios catódicos, para-raios, etc.

Uma aplicação muito interessante é a máquina de eletrofotografia, cuja forma mais usada é a xerografia. Este é um exemplo bem familiar da utilização da eletrostática, haja visto o número de pessoas que hoje se utilizam destas máquinas copiadoras. É também um processo interessante do ponto de vista da utilização de sequência de diferentes eventos eletrostáticos. O processo xerográfico foi inventado em 1937, por Chester Carlson. O nome, que significa "escrita seca", foi adotado posteriormente para acentuar a diferença do proces

so químico úmido. O conceito inovador de Carlson não teve aceitação imediata e a realização prática da ideia só se tornou possível depois de uma pequena campanha arriscar o seu futuro no esforço intenso de desenvolvimento do processo, tornando-se posteriormente um famoso sucesso empresarial.

A fig. 12 ilustra os quatro estágios envolvidos na xerografia. A formação de uma imagem eletrostática ocorre numa placa fina e extensa de material fotocondutor, suportado por um condutor metálico ligado à terra. O fotocondutor é um bom isolante no escuro, mas capaz de conduzir corrente ao receber luz. Sobre a superfície deste fotocondutor é depositado, no escuro, uma camada uniforme de cargas elétricas. Este processo (fig. 12a) é realizado por meio da descarga em corona, positiva, em um fio mantido a cerca de + 5000V. Este fio passa sobre o fotocondutor recobrimo-o de íons positivos, elevando o seu potencial a cerca de 1000V. No condutor suporte ligado à terra, por indução, forma-se um acúmulo de cargas igual e de polaridade negativa. No escuro, o fotocondutor não permite o deslocamento de cargas e a diferença de potencial se mantém. A placa fotocondutora é então exposta à luz, na forma de um documento a ser copiado (fig. 12b), havendo então uma absorção de fótons de luz, formando-se pares de cargas móveis. Cada par consiste de uma carga negativa (um elétron) e uma carga positiva (uma lacuna, ou falta de elétron). Os elétrons móveis dirigem-se para a superfície do fotocondutor; no encontro com as cargas positivas (móveis) há uma neutralização do par. Nos pontos onde há iluminação na superfície do fotocondutor, o processo de eletrização é completamente desfeito. Onde não há iluminação, a carga eletrostática inicial permanece na superfície, de modo a se obter uma "imagem eletrostática" duplicata da imagem óptica formada pela

distribuição dos pontos iluminados ou não. Para revelar a imagem eletrostática, distribui-se sobre a placa pequenas partículas negativas e pigmentadas (o toner), que são atraídas para as regiões de carga positiva (fig. 12c), aparecendo uma imagem visível. As partículas são então transferidas para uma folha de papel previamente eletrizada positivamente, para atraí-las. Um aquecimento rápido do papel provoca a fusão destas partículas e produz uma impressão permanente.

### ANOTAÇÕES

Como você discute essas aplicações práticas? Incentiva os alunos a pesquisas na área e a exposição aos companheiros de sala?

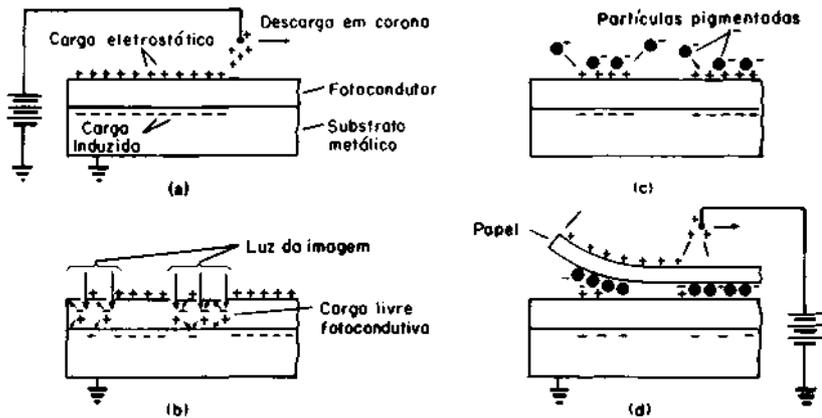


Fig. 12: *Etapas do processo xerográfico*

Esses exemplos facilitam a apreensão do conceito de energia eletrostática ( $W$ ). Esse conceito pode ser extraído a partir de uma analogia com o conceito de energia potencial, quando uma carga fica sujeita a um campo eletrostático. Em corrente alternada, estudo que realizaremos a seguir, veremos o uso de capacitores para correção do fator de potência, para compensação em motores, como equipamentos corretivos e, na Eletrônica, em filtros e outras aplicações.

$$W = \frac{1}{2} Q \cdot V = \frac{1}{2} CV^2$$

ou

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

Você costuma fazer esta demonstração matemática? Considera-a útil?

Entende-se **por** energia eletrostática de um sistema de cargas a soma das energias potenciais individuais de todas as cargas do sistema.

De um modo geral, a energia aumenta quando se movimentam cargas elétricas contrariando as forças elétricas que elas exercem mutuamente. Da mesma forma, como acontece com a energia potencial no campo da gravidade, aumenta ao suspender-se um macaco de bate-estacas. A energia eletrostática diminui quando se movimentam cargas elétricas a favor das forças elétricas que elas exercem mutuamente, assim como a energia potencial no campo de gravidade diminui quando se deixa o macaco de bate-estacas cair no solo.

#### **EQUILÍBRIO ELÉTRICO DE CONDUTORES**

O equilíbrio elétrico de condutores pode ser feito mediante análise de dois condutores eletrizados diferentes, colocados em contato mediante um fio condutor. Verifica-se que o movimento de cargas elétricas, em meios materiais, acarreta a dissipação de energia elétrica em virtude de choques dos elétrons em movimento (corrente) com as partículas do meio condutor. Assim, tem-se a conversão da energia elétrica em energia térmica.

Isso significa que a energia eletrostática do sistema é menor no estado de equilíbrio do que no estado inicial, como era de se esperar.

#### **ANOTAÇÕES**

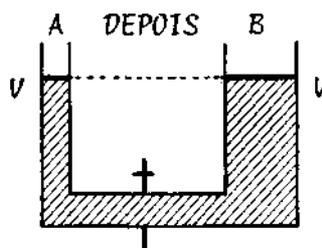
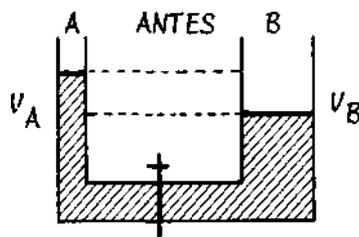
*Destas informações, o que você desenvolveria com seus alunos?*

- *Por exemplo: transformação dessa energia em:*
  - . *Vento Elétrico*
  - . *Torniquete Elétrico*
  - . *Luminescência e em outras formas de energia.*

Uma analogia mecânica pode auxiliar a boa compreensão do assunto, pensando-se um sistema que atinge o equilíbrio hidrostático por meio de vasos comunicantes já que, também neste caso, houve perda de energia dissipada pelas forças viscosas durante o escoamento, evidenciada pelo aumento de temperatura da água.

ANOTAÇÕES

Analogia Mecânica



Para fixar ideias, consideremos dois condutores de capacidade  $C_1$  e  $C_2$ , dotado das cargas  $Q_1$  e  $Q_2$  aos potenciais  $V_1$  e  $V_2$  respectivamente. Estabelecida a comunicação elétrica entre estes condutores e aguardado o equilíbrio elétrico, será o  $V$  o potencial do sistema e  $Q'_1$  e  $Q'_2$  as cargas dos condutores.

*Demonstrar que, partindo desse fato chega-se a*  
 $Q'_1 + Q'_2 = Q_1 + Q_2$   
*chega-se a*

$$V = \frac{C_1 V_1 + C_2 V_2}{C_1 + C_2}$$

ALGUMAS ATIVIDADES EXPERIMENTAIS

As demonstrações práticas e outras atividades experimentais relativas à área eletrostática são difíceis de serem viabilizadas, não so pela grande influência das condições ambiente de temperatura e umidade, como também pelo custo dos equipamentos para a montagem do laboratório.

Experiências mais elementares para verificação de alguns pontos teóricos e trabalhos sobre aplicações práticas a respeito dos cuidados para o tratamento dos efeitos eletrostáticos são plenamente viáveis.

A listagem de assuntos apresentada para o desenvolvimento de experiências, em grande parte, pode ser encontrada nos livros do Prof. Johnson e Sears que constam da bibliografia proposta. Quanto à possibilidade de grupos de alunos desenvolverem estudos práticos, e apresentado um relatório que poderia ser o resultado de um desses trabalhos de grupo (Anexo 4). Normalmente os alunos conseguem produzir esses estudos em um trabalho de equipe. No próximo item sugerimos para cada uma das experiências propostas, alguns temas alternativos para a parte prática, sob o título de Trabalho, envolvendo desenvolvimento de pesquisa por parte do aluno.

#### **TEMAS PARA A PARTE EXPERIMENTAL**

##### 1. Eletrização por Atrito

Objetivo:

1. Através da "tribo-eletrificação" ou "tribo - eletrização" caracterizar a existência de cargas positivas e negativas.

2. Verificação da primeira Lei das Ações Elétricas  
Materiais e Equipamentos:

Pêndulo Elétrico - Pós Eletroscópicos (mínio  $Pb_3O_4$  e enxofre) e uma peneira.

Trabalho:

Cargas eletrostáticas produzidas por escoamento de fluidos.

2. Eletrização **por Contato**

Objetivo:

Eletrização de um corpo neutro N por contato com um corpo eletrizado E.

Materiais e Equipamentos:

- . Eletroscópio de folhas
- . Eletroscópio de pilha

Trabalho:

Escoamento de cargas estáticas e malha de terra.

3. Campo **Elétrico**

Objetivo:

Trabalho que o campo realiza sobre o elétron

Equipamento:

Diodo tendo o filamento F e a placa P separados por distância  $d$  variável

Trabalho:

Blindagens eletrostáticas.

4. **Distribuição das Cargas em Condutor em Equilíbrio Elétrico**

Objetivo:

Demonstrar que as cargas se distribuem exclusivamente na superfície.

Equipamentos:

- . Esfera Oca de Coulomb
- . Manga Cônica de Faraday
- . Hemisférios Móveis de Cavendish e Biot.

## 5. Poder das Pontas

## ANOTAÇÕES

### Objetivo:

Verificar que a densidade elétrica superficial torna-se relativamente elevada em protuberâncias afiladas de condutores eletrizados.

### Equipamentos:

- . Ponta eletrizada
- . Molinete elétrico
- . Pára-raios

### Trabalho:

Estudo dos diversos tipos de para-raios

## 6. Gerador Elétrico

### Objetivo:

Analisar o gerador elétrico-eletrostático e preparar os alunos para os assuntos que se seguirão.

### Equipamentos:

Geradores eletrostáticos (Gerador Van de Graff e outros)

### Trabalhos:

Apresentar estudos sobre:

- . Geradores Eletroquímicos (pilhas, acumuladores, etc.)
- . Pares termo-elétricos
- . Geradores Eletro-mecânicos (dínamos, alternadores, ...).

*Com a finalidade de comparar a energia eletrostática com outras alternativas de energia.*

## 7. Condensador Elétrico ou Capacitor

### Objetivo:

Carga e Descarga com C.C.

### Equipamentos:

- . Fonte C.C.
- . Capacitores
- . Resistores

Trabalho:

Estudo do processo de fabricação de capacitores.

ANOTAÇÕES

## 8. Associação de Capacitores

Objetivo:

Estudo das diversas formas de se associar condensadores e suas aplicações

Equipamentos:

Diversos capacitores e instrumentos de medida de Capacidade.

## BIBLIOGRAFIA

## ANOTAÇÕES

1. ARNOLD, Robert. *Fundamentos de Eletrotécnica.* São Paulo, E.P.U.
2. CARDOSO, José Ivan et alli. *Aulas de Física .* São Paulo, Atual Edições.
3. Conference Record of the 9th Annual Meeting of the IEEC - Industry Applications Society.
4. DESSAUER, J.H & CLARK, M.E. *Xerography and Related process Focal Press.*
5. DITTRICH, Harry & VOLZ, Eugen. *Eletricidad practica.* Darmstadt, Ed. Winclers.
6. FERRARA, Arthemio A.P. et alli. *Eletricidade basica.* São Paulo, L. CiSncias e Tecnologia Editora.
7. HALLIDAY, David & RESNICK, Robert. *Fisica* Rio de Janeiro, Livros Técnicos e Científicos Editora.
8. HAYT, William H. *Eletromagnetismo.* Rio de Janeiro, Livros Técnicos e Científicos Editora.
9. JOHNSON, N.O.F. *Eletrostática* Livraria Nobel.
10. MARTINS, Nelson & TIMONER, Abrahão. *Introdução a teoria da eletricidade o magnetismo.* São Paulo, L. P. M.
11. MAUAD, Farid C. & NERY, Norberto. *Eletricidade bá sica-* São Paulo, P.K.R. Edições.

12. MAYA, Paulo A. *Curso básico de eletricidade* . São Paulo, Discubra.
13. PAULI, Ronald U. et alli. *Física*. São Paulo. E. P. U.
14. SCHAFFER, Hamilton N.R.S. *Laboratorio de eletricidade e magnetismo* . Rotacional.
15. SEARS, Zemansky. *Física I e II. Ao Livro Técnico S/A*. Rio.
16. TIPLER, Paul A. *Física* . Rio de Janeiro, Guanabara.
17. VALKENBURGH, Von. *Eletricidade básica*. Rio de Janeiro, Livraria Freitas Bastos.

## **ANEXOS**

Anexo 1 - P-MB 330

Anexo 2 - COMERCIAL GONÇALVES, Catálogo

Anexo 3 - ABNT, Normas Técnicas

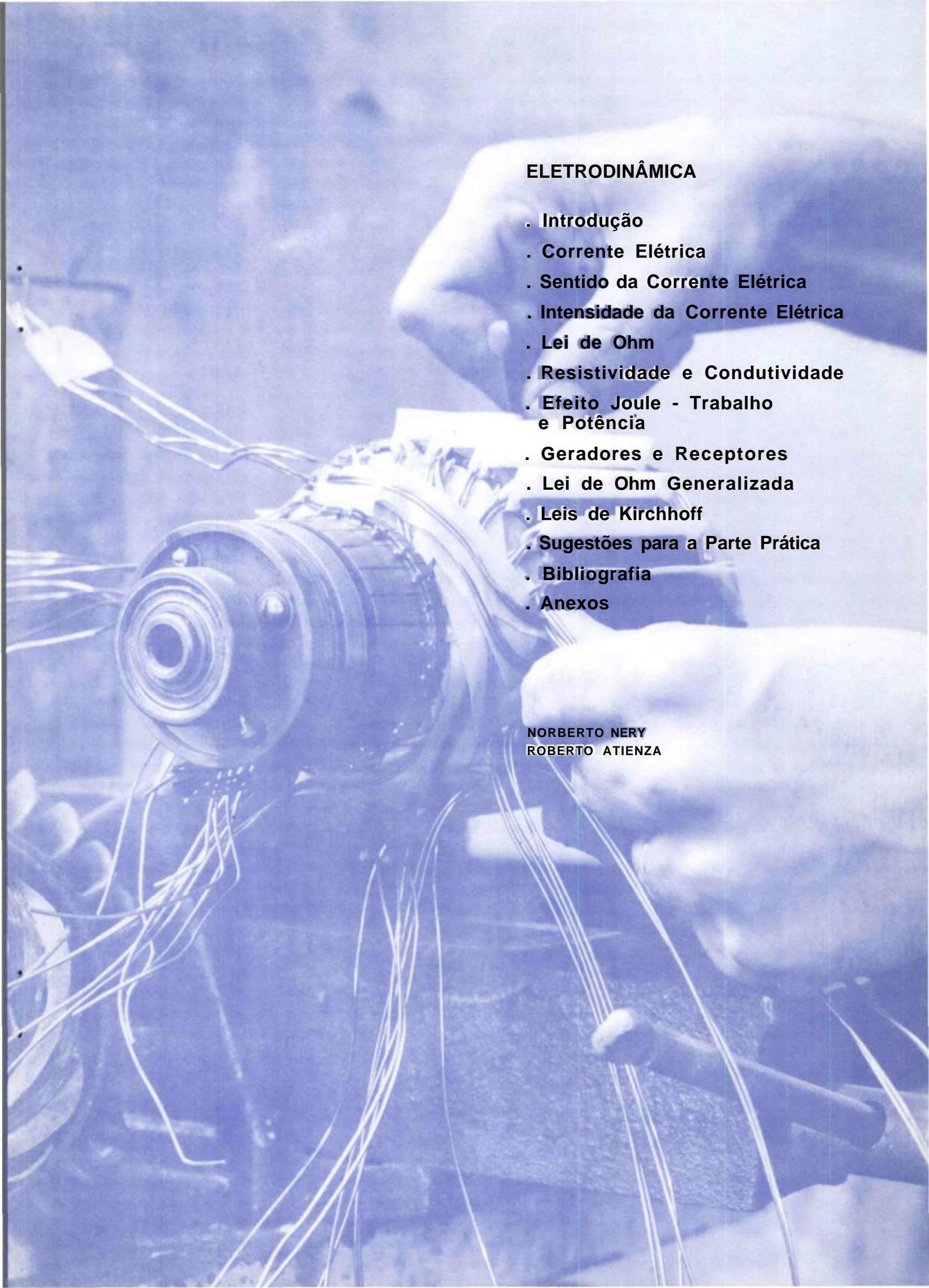
Anexo 3 - ICOTRON, Boletins

Anexo 3 - INDUCON, Manual

Anexo 3 - LORENZETTI, Catálogos

Anexo 4 - Trabalho de Grupo

Anexo 5 - Projeto de Norma de Para-Raio



## **ELETRODINÂMICA**

- . **Introdução**
- . **Corrente Elétrica**
- . **Sentido da Corrente Elétrica**
- . **Intensidade da Corrente Elétrica**
- . **Lei de Ohm**
- . **Resistividade e Condutividade**
- . **Efeito Joule - Trabalho e Potência**
- . **Geradores e Receptores**
- . **Lei de Ohm Generalizada**
- . **Leis de Kirchhoff**
- . **Sugestões para a Parte Prática**
- . **Bibliografia**
- . **Anexos**

**NORBERTO NERY  
ROBERTO ATIENZA**

## INTRODUÇÃO

A eletrodinâmica compreende o estudo do deslocamento de cargas elétricas em condutores, as trocas de energia associadas a este deslocamento e as características dos corpos e materiais que influem neste deslocamento.

Como este assunto envolve o desenvolvimento e compreensão de conceitos básicos em Eletricidade, tais como: corrente elétrica, resistência elétrica, resistividade, etc, amplamente abordados nos cursos de Eletrotécnica, tentaremos apresentar alternativas e exemplos práticos com o objetivo de tornar mais claro e motivante o desenvolvimento deste assunto.

A parte experimental, que pode ser realizada em laboratório, é bastante ampla e pode fornecer uma grande quantidade de subsídios às aulas teóricas, tal como a comprovação das leis e fenômenos da eletrodinâmica, e serve também como uma introdução aos cursos de Medidas Elétricas, Instrumentação e Circuitos Elétricos, razão pela qual ao final do texto apresentamos algumas sugestões para experiências e trabalhos práticos, ou de pesquisa.

O texto no seu conteúdo dá continuidade ao assunto desenvolvido no texto de Eletrostática sendo abordados os seguintes tópicos:

- Corrente elétrica
- Lei de Ohm
- Resistividade e condutividade
- Efeito Joule, trabalho e potência

- Geradores e receptores
- Lei de Ohm generalizada
- Leis de Kirchhoff

## ANOTAÇÕES

Os fenómenos eletromagnéticos serão estudados a seguir no próximo texto.

O fenômeno da transferência de cargas elétricas, ou carga em movimento é de vital importância para o estudo da Eletrotécnica, posto que, pelo processo de transferência de cargas de um lugar para outro podemos também transferir energia de um lugar para outro.

Como foi visto em eletrostática, quando uma carga elétrica é colocada numa região onde atua um campo elétrico, tenderá a se movimentar, pois estará sujeita à ação de uma força de origem elétrica.

Em materiais condutores metálicos, os elétrons pertencentes à camada de valência são fracamente atraídos pelos respectivos núcleos, de forma que são considerados elétrons "livres". Na ausência de campo elétrico, estes elétrons movem-se caoticamente descrevendo trajetórias aleatórias com grande velocidade (da ordem de  $10^5 \text{ m/s}$ ), com mudanças bruscas de direção ocasionadas por colisões com a rede cristalina constituída pelos átomos do material, de modo que embora movendo-se com altas velocidades, o deslocamento é praticamente nulo.

A presença de um campo elétrico altera ligeiramente a trajetória destes elétrons, apresentando um deslocamento maior em sentido oposto ao campo, devido à força exercida:  $F = q \cdot E$ , que produz

*Como você exemplificaria a importância da possibilidade da transferência de energia de um lugar para outro?*

- *Note que o estudo da eletrostática deve preceder este ponto, senão como explicaremos a existência da força  $\vec{F}$ ?*

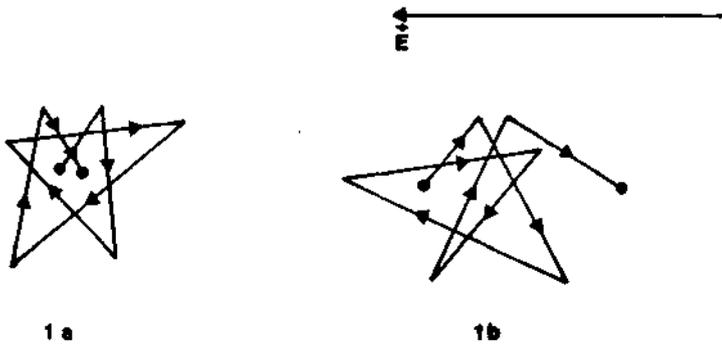


Fig. 1: Movimento característico dos elétrons

um componente sistemático na velocidade na sua direção. Este componente é denominado "velocidade de migração", sendo praticamente constante e da ordem de  $10^{-4}$  m/s, portanto muito pequena em relação à velocidade com que se manifestam os efeitos da corrente. Este fato pode ser compreendido recorrendo-se a uma analogia bastante simples com a hidráulica: imaginando-se o condutor como um tubo previamente cheio de água (que corresponde aos elétrons livres do condutor que são da ordem de  $10^{22}$  elétrons livres/cm<sup>3</sup> do condutor), quando se abre um registro em uma das extremidades do tubo, imediatamente a água começa a verter na outra extremidade, embora a velocidade de avanço no tubo seja relativamente pequena.

O conceito de corrente elétrica em um condutor pode então ser entendido como sendo o movimento ordenado das suas cargas livres, devido à ação de um campo elétrico estabelecido em seu interior pela aplicação de uma tensão (diferença de potencial) entre dois pontos desse condutor.

- Sugira outras analogias e outras formas de explicar este fato.

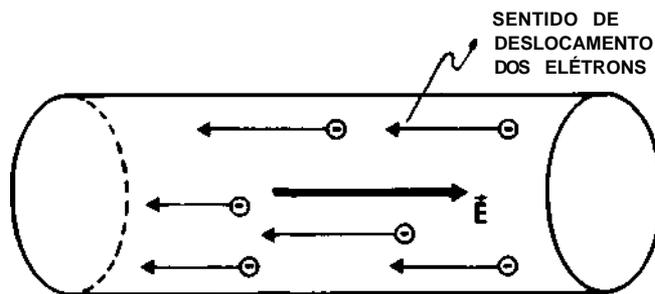


Fig. 2: Corrente elétrica em sólidos condutores

Convém lembrar que o sentido de deslocamento dos elétrons é **contrário** ao campo, por possuírem carga elétrica negativa. ( $\vec{F} = q \cdot \vec{E}$ ).

Mas, o fenômeno corrente elétrica não se processa somente em metais condutores, mas também através de líquidos e gases. No caso do mercúrio e de metais fundidos, a corrente processa-se exatamente como no caso dos metais em estado sólido, devido à existência dos elétrons livres. Porém, no caso de outros líquidos e gases, os portadores (cargas móveis) são constituídos por íons positivos e íons negativos, pois neste caso os átomos não estão presos a uma rede cristalina como **no** caso dos sólidos metálicos.

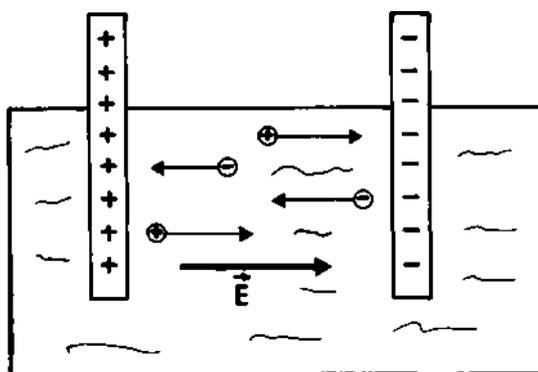


Fig. 3: Corrente elétrica em líquidos

Nos gases pode haver corrente elétrica desde que contenham **íons** no seu interior, isto é, desde que

## ANOTAÇÕES

estejam ionizados. Esses íons são produzidos geralmente por agentes externos que incidem sobre o gás, como por exemplo, raios X, ou pela própria passagem de corrente elétrica. O ar atmosférico à pressão normal é praticamente isolante, embora apresente uma pequena concentração de íons. Quando determinados gases são colocados sob pressão reduzida tornam-se mais facilmente condutores e neste caso encontram aplicações práticas tais como a lâmpada fluorescente e lâmpada néon.

### SENTIDO DA CORRENTE ELÉTRICA

Como os portadores de carga podem ser positivos e negativos, podemos ter deslocamento de cargas livres em dois sentidos. Mas, por convenção adota-se, qualquer que seja o meio e portanto os portadores, o sentido de corrente como sendo o do deslocamento das cargas positivas, ou seja, o mesmo sentido do campo que ocasionou a corrente.

Nestas condições, em um sólido condutor, a corrente elétrica terá o sentido conforme apresentado na figura a seguir.

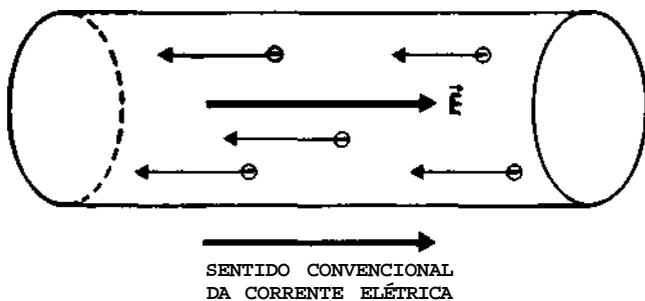


Fig. 4: Sentido da corrente elétrica

Quando o sentido do campo elétrico, que dá origem a corrente inverter-se, periodicamente o sentido da corrente acompanha esta inversão e a corrente é denominada alternada. Caso o sentido do campo permaneça invariável, embora podendo variar sua intensidade, as cargas constituintes da corrente se deslocam sempre no mesmo sentido e neste caso a corrente é denominada contínua.

**INTENSIDADE DA CORRENTE ELÉTRICA**

Para um estudo quantitativo de corrente elétrica precisamos definir o que se entende por intensidade de corrente. Para isto consideremos um corpo condutor, com uma secção transversal S, sendo percorrido por uma corrente elétrica, conforme figura a seguir.

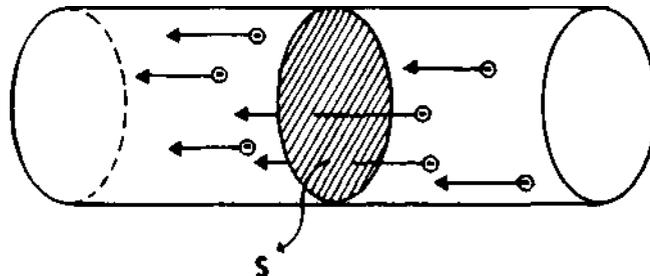


Fig. 5: Intensidade de corrente

Nesta situação, em um determinado intervalo de tempo ( $\Delta t$ ), um certo número de portadores de carga (elétrons no caso) atravessa a secção transversal do corpo. Portanto uma certa quantidade de carga ( $\Delta Q$ ) atravessa a secção transversal do corpo.

Onde:  $\Delta Q = n \cdot q$

$q$  = carga de cada portador (elétron)

$n$  = numero de portadores que atravessou a secção transversal.

Nestas condições define-se como intensidade média de corrente a relação:

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

$I_m$  = intensidade média de corrente

Define-se ainda, intensidade instantânea de corrente como o limite da razão  $\Delta Q/\Delta t$  quando o intervalo de tempo  $\Delta t$  tende a zero.

$$I = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta Q}{\Delta t} = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} I_m$$

ou, utilizando cálculo diferencial poderíamos escrever que a intensidade instantânea de corrente é a derivada da carga que atravessa a seção, em relação ao tempo.

$$I = \frac{dq}{dt}$$

A unidade de intensidade de corrente elétrica no SI é, segundo a definição de intensidade de corrente:

$$U(I) = \frac{C}{S} = \text{ampere, A}$$

Ou, segundo a definição original das unidades elétricas no SI: "0 ampere é a intensidade de corrente elétrica constante que, mantida em dois condutores paralelos, retilíneos, de comprimento infinito, de seção circular desprezível e situados no vácuo à distância de um metro um do outro, produziria entre esses condutores uma força igual a  $2 \times 10^{-7}$  newton por metro de comprimento".

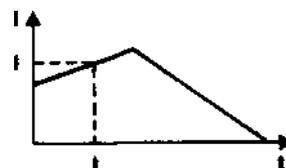
Os instrumentos normalmente utilizados para a medida da intensidade de corrente elétrica são os amperímetros, basicamente constituídos por galvanômetros.

## ANOTAÇÕES

Se tivéssemos considerado um líquido ou um gás ionizado como seria determinada a quantidade de carga  $\Delta Q$ ?

O que se poderia dizer da intensidade média de uma corrente alterada, sem esquecer os efeitos produzidos?

Seria possível introduzir este conceito desta forma? A intensidade instantânea de corrente também não poderia ser obtida de um gráfico de  $I = f(t)$ , tomando-se o valor de  $I$  para o instante desejado?



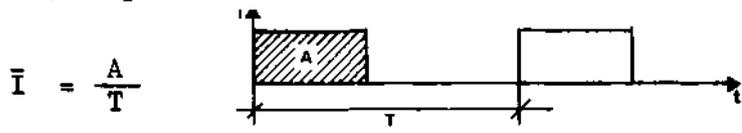
- Neste caso utilizamos uma unidade derivada (C), para introduzir uma unidade de base (A), embora possa parecer incoerente, é mais prático que a definição do SI.

Os galvanômetro são dispositivos que produzem a deflexão de um ponteiro sobre uma escala graduada. Esta deflexão é conseguida a partir dos efeitos eletromagnéticos da corrente, que serão estudados a seguir no texto de eletromagnetismo. Podemos adiantar que no caso de correntes contínuas estes aparelhos medem o "valor médio" ( $\bar{I}$ ) da intensidade de corrente que pode ser definido da seguinte forma:

$$\bar{I} = \frac{1}{T} \int_0^T i(t) dt$$

onde:  $i(t)$  = função descrita pelos valores instantâneos da corrente no tempo  
 $T$  = período da função

ou, simplificadamente:



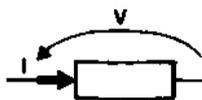
A= área sob o gráfico de  $i(t)$

No caso de correntes alternadas veremos que normalmente os aparelhos nos indicarão o chamado "valor eficaz", a ser definido posteriormente quando estudarmos circuitos em corrente alternada, e em Medidas Elétricas.

Segundo Hayt e Kemmerly(6), um obscuro físico alemão, George Simon Ohm, publicou em 1827 um artigo intitulado "Die galvanische Kette mathematisch bearbeitet - Investigação Matemática sobre o Circuito Galvânico", no qual foram considerados os resultados de um dos primeiros esforços para medir correntes e tensões elétricas, descrevê-las e relacioná-las matematicamente. Um dos resultados foi o estabelecimento de uma relação fundamental, que hoje conhecemos como "Lei de Ohm", mesmo considerando que o mesmo resultado teria sido descoberto 46 anos antes, na Inglaterra, por um semi-recluso Henry Cavendish. No entanto acreditamos que, ninguém, incluindo Ohm, sabia do trabalho de Cavendish, pois este só foi descoberto e publicado muito após a morte de ambos.

Ohm constatou que tomando-se um fio condutor, qualquer que fosse o material de sua constituição, o seu comprimento e a sua espessura, a razão entre a tensão(V) mantida entre seus terminais e a correspondente intensidade de corrente(I) estabelecida era constante. Esta constante é denominada resistência elétrica do condutor(R)

R =



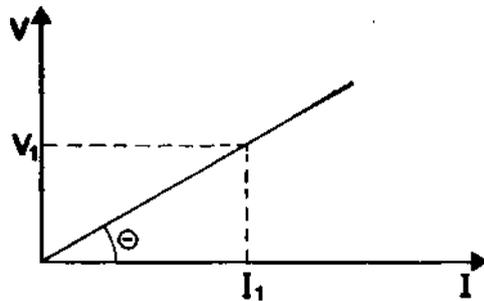
R = resistência elétrica

*Esta é, sem dúvida, a mais importante Lei para o estudo de eletricidade em geral, visto que relaciona as principais grandezas envolvidas pelo assunto.*

Experimentalmente pode-se verificar que um corpo constituído de material condutor, mantido a uma temperatura constante, possui uma relação constante entre a tensão aplicada e a intensidade de corrente que o percorre, o que pode ser visualizado através de um

gráfico de  $V = f(I)$  dos valores obtidos,

ANOTAÇÕES

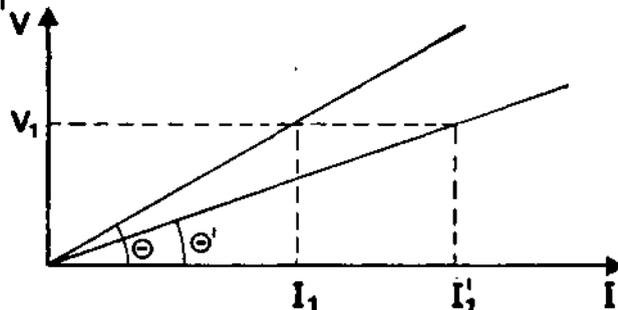


**Fig. 6:** Gráfico de  $V = f(I)$

Observe que:

$$R = \frac{V}{I} = \operatorname{tg} \theta = \text{constante, correspondente à inclinação da reta.}$$

Se substituirmos o corpo por um outro de resistência menor, a reta obtida terá uma inclinação menor e para uma mesma tensão aplicada ( $V_1$ ), obteremos uma intensidade de corrente maior ( $I_1'$ ) que a anterior ( $I_1$ ).

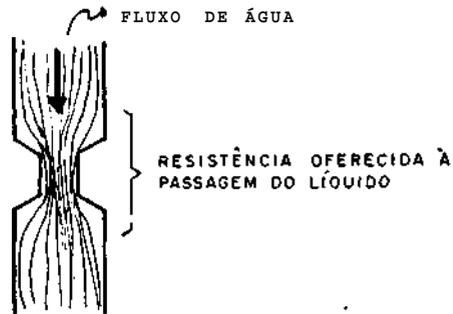


**Fig. 7:** Gráfico de  $V = f(I)$  para resistências diferentes

Portanto, fisicamente a resistência de um corpo condutor representa a oposição que ele oferece a passagem de corrente elétrica.

Novamente podemos lançar mão da analogia com a hidráulica. A resistência elétrica pode ser relacionada a um estreitamento da seção de um tubo por onde

passa um fluxo de água, que se relaciona à corrente elétrica. ANOTAÇÕES



No SI, a unidade de resistência é:

$$U (R) = \frac{V}{A} = \text{ohm}, \Omega$$

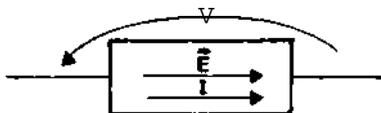
Também pode-se definir a grandeza inversa da resistência, denominada condutância (G).

$$\left[ G = \frac{1}{R} \right]$$

$$U (G) = \frac{1}{\Omega} = \text{siemens}, S$$

Consequentemente, a condutância representa a facilidade oferecida por um corpo condutor à passagem de corrente elétrica.

É importante lembrar ainda, que, quando a corrente elétrica percorre um condutor sólido, as cargas da corrente (cargas imaginárias positivas, para utilizarmos o sentido convencional da corrente) passam de um ponto de maior potencial para um de menor potencial, razão pela qual a tensão sobre o condutor é chamada de "queda de tensão". E neste caso as cargas estão se deslocando no mesmo sentido do campo elétrico.



Os componentes que encontram sua utilização prática devido à sua resistência são chamados resistores. Existem resistores das mais variadas formas e tamanhos (mais a frente, quando estudarmos o efeito Joule, verificaremos que o tamanho está relacionado à potência a ser dissipada).

Os resistores comumente utilizados são os de fio, de carbono e de filme metálico, com os mais variados valores de resistência, que vão de valores em  $m\Omega$  a  $M\Omega$ , e de potência, em  $mW$  a  $kW$ . Podem ser de valor fixo ou variável como os reostatos, potenciômetros e trimmers.

É interessante que se apresente aos alunos neste momento os diversos tipos, formatos, e tamanhos de resistores existentes, não esquecendo também daqueles usados em eletrodomésticos, como os resistores de aquecimento de chuveiro, ferros de passar, etc. e os utilizados também para medição como os decádicos de precisão. É importante lembrar ainda que a resistência existe como uma característica intrínseca dos materiais condutores, mesmo que não sejam utilizados como resistores, tal como a resistência dos fios condutores de energia, fios utilizados em enrolamento de motores, geradores, etc, e, nestes casos a resistência é normalmente uma característica indesejável que provoca perdas irreversíveis de energia.

### **ANOTAÇÕES**

A fim de ilustrar a apresentação dos resistores é interessante uma consulta a catálogos técnicos de fabricantes que apresentem características construtivas, materiais utilizados na fabricação, especificações, aplicações e limitações dos resistores (anexo 1).

É também interessante levar ao conhecimento dos alunos os instrumentos utilizados para medida da resistência elétrica como o ohmímetro, ponte de wheatstone e de Kelvin, além dos medidores de terra e megohmímetros (anexo 2)

## RESISTIVIDADE E CONDUTIVIDADE

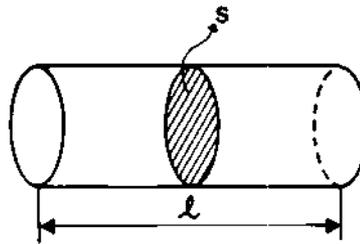
ANOTAÇÕES

A resistência de um fio condutor homogêneo e de secção transversal constante, ou seja, filiforme, depende do material do qual é constituído.

É diretamente proporcional ao seu comprimento e inversamente proporcional à área  $S$  da sua secção transversal, isto é:

$$R \propto \frac{\ell}{S}$$

$\alpha$  = proporcional



A constante de proporcionalidade é usualmente indicada por  $\rho$  e denominada resistividade. Esta, a uma fixada temperatura, tem um valor característico para cada material, pois em cada um se verifica uma densidade diferente de elétrons livres.

Introduzindo a constante  $\rho$  :

$$R = \rho \cdot \frac{\ell}{S}$$

A unidade da resistividade no SI é:

$$U(\rho) = \frac{\Omega \cdot \text{m}^2}{\text{m}} = \Omega \cdot \text{m}$$

Como os condutores utilizados em instalações elétricas e de modo geral, em transporte de energia elétrica, normalmente têm o comprimento muito maior que a secção transversal, é comum também utilizar-se a unidade de resistividade como sendo:

$$U(\rho) = \frac{\Omega \text{ mm}^2}{\text{m}}$$

*Esta interpretação da resistividade é bem intuitiva, porém podemos encontrar maneiras mais detalhadas de fazer esta apresentação, como nas referências da bibliografia.*

Convém frisar que a resistividade é função do material bem como da temperatura, isto é, ela só pode ser tomada como constante característica de um material para uma dada temperatura. E também é importante saber que a resistividade é uma propriedade do material, e não de um corpo, como a resistência.

Analogamente à resistência, fisicamente a resistividade pode ser entendida como sendo a grandeza que representa a dificuldade que um material apresenta para a passagem de corrente elétrica.

Também é utilizada a grandeza inversa da resistividade que é a condutividade, indicada por  $\sigma$ .

$$\sigma = \frac{1}{\rho}$$

Conseqüentemente:

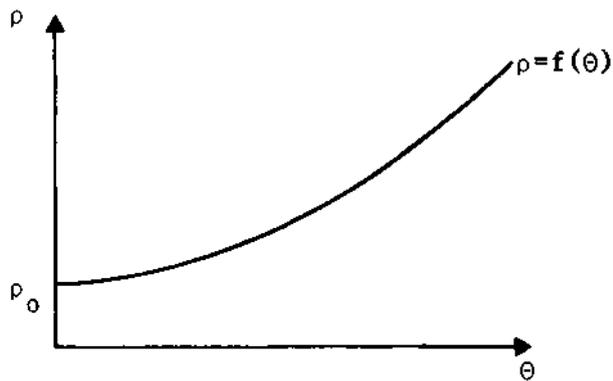
$$U(\sigma) = \frac{1}{\Omega \cdot m} = \frac{S}{m}$$

A variação da resistividade com a temperatura em condutores metálicos obedece aproximadamente a uma função polinômica do tipo:

$$\rho(\theta) = \rho_0 + a\theta + b\theta^2 + c\theta^3 + \dots$$

onde,  $\rho_0$  = resistividade a temperatura  $\theta_0 = 0^\circ\text{C}$ ;  $a, b, c$  = coeficientes que dependem do material.

Esta função pode ser representada graficamente como mostrado a seguir:



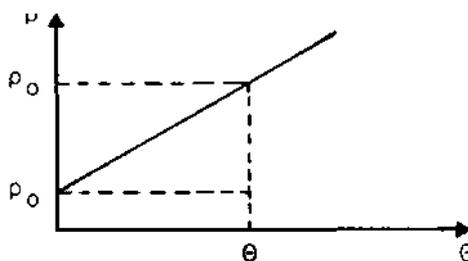
Colocando-se  $\rho_0$  em evidência:

$$\rho(\theta) = \rho_0 \left( 1 + \frac{a}{\rho_0} \theta + \frac{b}{\rho_0} \theta^2 + \dots \right)$$

e fazendo:  $\frac{a}{\rho_0} = \alpha$  ;  $\frac{b}{\rho_0} = \beta$ ;

Como normalmente estes coeficientes, exceto  $\alpha$ , são muito pequenos, a função  $\rho = f(\theta)$  pode ser aproximada dentro de certos intervalos de temperatura, da ordem de até dezenas de graus Celsius, por uma função linear,

$$\rho(\theta) = \rho_0 (1 + \alpha \theta)$$



Nestas condições, a variação de resistividade de  $\Delta \rho = \rho_\theta - \rho_0$  é proporcional à variação de temperatura  $\Delta \theta = \theta - \theta_0$ , ou seja:

$$\begin{aligned} \Delta \rho &= a \Delta \theta \\ \rho_\theta - \rho_0 &= a \Delta \theta \\ \rho_\theta &= \rho_0 + a \Delta \theta \\ \rho_\theta &= \rho_0 \left( 1 + \frac{a}{\rho_0} \Delta \theta \right) \end{aligned}$$

Como:  $\frac{a}{\rho_0} = \alpha$

$$\rho_{\theta} = \rho_0 (1 + \alpha \Delta\theta)$$

O coeficiente  $\alpha$  é característico do material e é denominado coeficiente de variação da resistividade de com a temperatura. Possui unidade:  $\frac{1}{^{\circ}\text{C}}$ , ou seja,  $^{\circ}\text{C}^{-1}$

Considerando que a variação da resistência de um corpo condutor, quando submetido a uma variação de temperatura, é devido principalmente à variação da resistividade, posto que as variações nas dimensões (dilatação) são muito pequenas dentro da faixa de variação de temperatura considerada, temos:

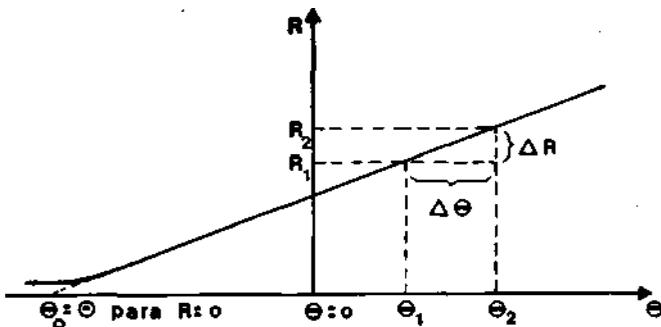
$$\rho_{\theta} = \frac{R_{\theta} S}{l} \quad \rho_0 = \frac{R_0 S}{l}$$

Portanto:

$$\frac{R_{\theta} S}{l} = \frac{R_0 S}{l} (1 + \alpha \Delta\theta)$$

$$R_{\theta} = R_0 (1 + \alpha \Delta\theta)$$

Ou ainda, se prolongarmos a curva linearizada de  $R = f(\theta)$  até a temperatura na qual a resistência do metal é zero (no caso do cobre esta temperatura é de aproximadamente  $-234,5^{\circ}\text{C}$ ), teremos:



( $-234,5$  para o cobre)

$$\text{Como: } R_2 = R_1 (1 + \alpha \Delta\theta) \quad (\text{I})$$

$$\alpha \Delta\theta = \frac{R_2}{R_1} - 1$$

$$\alpha R_1 = \frac{R_2 - R_1}{\Delta\theta} = \frac{\Delta R}{\Delta\theta}$$

Por semelhança de triângulos podemos escrever:

$$\alpha R_1 = \frac{\Delta R}{\Delta\theta} = \frac{R_1}{|\theta_0| + \theta_1}$$

Como para o cobre  $\theta_0 = -234,5^\circ\text{C}$

$$\alpha = \frac{1}{234,5 + \theta_1}, \text{ substituindo em (I):}$$

$$R_2 = R_1 \left( 1 + \frac{1}{234,5 + \theta_1} \Delta\theta \right),$$

e como  $\Delta\theta = \theta_2 - \theta_1$ , podemos obter:

$$\frac{R_2}{R_1} = \frac{234,5 + \theta_2}{234,5 + \theta_1}$$

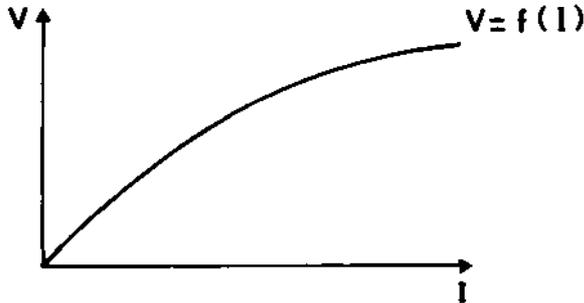
ou ainda:

$$\theta_2 = \frac{R_2 - R_1}{R_1} (234,5 + \theta_1) + \theta_1$$

que é uma expressão bastante utilizada na prática, em ensaios, quando se deseja determinar a variação de temperatura de um condutor (um enrolamento de um transformador ou de um motor, por exemplo) a partir da variação de resistência medida.

Observe que quando um resistor sofre uma variação na sua resistência, por exemplo um acréscimo na

sua resistência devido a elevação de temperatura por efeito Joule, o gráfico de  $V = f(I)$  deste resistor não será linear. Um bom exemplo disto é a lâmpada incandescente, devido a grande variação de temperatura que sofre o filamento.



A seguir, a título de ilustração apresentamos uma tabela com os valores de  $\rho$  e  $\alpha$  de diversos materiais

### ANOTAÇÕES

Em quais aplicações é desejável ter-se uma resistência constante? Em quais isto não é desejável?

MATERIAL		$\rho_{20^\circ}$ ( $\mu \Omega \times \text{cm}$ )	$\alpha$ ( $^\circ\text{C}^{-1}$ )
M E T A I S	Alumínio	2,8	+ 0,0039
	Chumbo	21	+ 0,0042
	Cobre	1,7	+ 0,0040
	Ferro	9 a 15	+ 0,0045 a + 0,0060
	Mercúrio	95,8	+ 0,30092
	Platina	10,8	+ 0,0039
	Prata	1,6	+ 0,0038
	Tungstênio	4,9	+ 0,0048
L I G A S	Constantan	49 a 52	$(-4 \text{ a } +1) \times 10^{-5}$
	Latão	7 a 9	+ 0,0015
	Manganina	43	$0 \text{ a } +3 \times 10^{-5}$
	Nicromo	110	+ 0,00017
	Niquelina	40	+ 0,00023
	Grafite	4000 a 8000	$(-2 \text{ a } -8) \times 10^{-4}$
I S O L A N T E S	Solo	$10^{10}$ a $10^{12}$	
	Água pura	$2,5 \times 10^{11}$	
	Mármore	$10^{15}$ a $10^{17}$	
	Vidro	$10^{18}$ a $10^{21}$	
	Porcelana	3 a $10^{20}$	
	Mica	$10^{21}$ a $10^{23}$	
	Ebonite	$10^{21}$ a $10^{24}$	
	Baquelite	2 x $10^{22}$	
	Borracha	$10^{23}$ a $10^{24}$	
	Parafina	5 x $10^{24}$	
Âmbar	$10^{24}$ a $10^{25}$		

Tab.1: Resistividade e coeficientes de variação com a temperatura

A condutividade, como já foi dito, é o inverso da resistividade, podendo portanto ser obtida da tabela apresentada. Existe um padrão internacionalmente aceito para a condutividade, é o "padrão internacional de cobre recozido" designado por IACS, "international annealed copper standard" que corresponde à condutividade determinada a partir de um fio de cobre com as seguintes características a 20 C:

comprimento: 1m

seção: 1mm

resistividade:  $\frac{1}{58} \frac{\Omega \text{mm}^2}{\text{m}}$

densidade: 8,89kg/m<sup>3</sup>

coef.de temperatura:  $3,93 \cdot 10^{-3} \cdot \text{C}^{-1}$

É comum também exprimir-se a condutividade de um material como uma porcentagem, obtida pela relação entre a condutividade de uma amostra do material a 20°C e o padrão IACS, isto é:

$$\sigma(\%) = \frac{\sigma_{20}}{\sigma_{\text{IACS}}}$$

O ensaio para determinação da resistividade, da condutividade, e da condutividade porcentual deve ser realizado conforme o método definido pela MB-226, Resistividade de metais e suas ligas (anexo 3).

O cobre utilizado na indústria de condutores elétricos é o cobre eletrolítico com no mínimo 99,9% de pureza, conforme especificado nas normas P-EB-347 - Cátodos de cobre eletrolítico e P-EB-356 - Lingotes de cobre eletrolítico. (anexo 4)

Além do cobre utiliza-se também para fabricação de condutores o alumínio com 99,6% de pureza conforme a EB-291, e suas ligas conforme a P-EB-370. (anexo 5)

*Este ensaio é realizado na escola em Eletricidade. ou Medidas Elétrica? Seria importante realizá-lo?*

Para um aprofundamento melhor nesta aplicação dos condutores, bem como para possibilitar uma análise comparativa entre o cobre e o alumínio como condutores de energia elétrica, sugerimos a leitura de catálogos de fabricantes de condutores, (anexo 6)

ANOTAÇÕES

Quando submetemos um condutor a uma diferença de potencial elétrico entre dois pontos, as cargas livres (elétrons) existentes no condutor são aceleradas pelo campo elétrico. Esta aceleração provoca uma certa variação da energia cinética nestas cargas. Este incremento de energia cinética é continuamente transferido para os átomos do condutor devido as colisões entre as cargas livres que estão se deslocando e os átomos da rede cristalina. Isto é, apesar das cargas livres receberem continuamente energia do campo elétrico, esta é imediatamente transferida, provocando uma agitação térmica nos átomos do condutor, com as cargas livres mantendo em média uma velocidade de migração constante.

A agitação térmica se traduz como produção de calor, provocando um aumento da temperatura do corpo. Esta transformação de energia elétrica em calor, irreversível, devido à passagem de corrente elétrica por um condutor que possui uma determinada resistência, denomina-se efeito Joule.

É interessante notar que o efeito Joule é análogo ao atrito mecânico, pois ambos produzem transformações irreversíveis de energia elétrica, ou mecânica, em calor. Também, deve-se observar que quanto maior for a potência a ser dissipada, transformada em calor durante um certo intervalo de tempo, maior terá que ser a área de dissipação, ou a capacidade de dissipação de calor. Para resistores de grande potência às vezes é necessário o uso de ventiladores e trocadores de calor para facilitar esta dissipação de calor.

Devido ao fato de dispormos no Brasil de

grandes fontes de energia elétrica, como as hidroelétricas, o governo tem procurado incentivar a utilização desta energia (eletrotermia) em substituição a combustíveis não renováveis, como os derivados do petróleo, na produção de calor ou processos industriais, (anexo 7)

Como visto na Eletrostática, as cargas elétricas ao passarem de um ponto onde existe um potencial  $V_A$  para outro onde o potencial é  $V_B$  realizam um trabalho dado por:

$$\tau = q (V_A - V_B) = qV \quad (I)$$

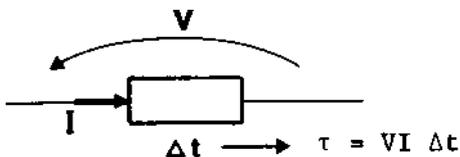
$$V = V_A - V_B$$

Como, pela definição de intensidade de corrente:

$$I = \frac{\Delta q}{\Delta t} \Rightarrow \Delta q = I \Delta t \quad (II)$$

Logo, substituindo (II) em (I)

$\tau = VI\Delta t$  que corresponde à energia elétrica transformada em calor, por efeito Joule em um corpo condutor submetido a uma tensão  $V$ , percorrido por uma intensidade de corrente  $I$ , durante um intervalo de tempo  $\Delta t$ .



Lembrando ainda que, segundo a lei de Ohm, este corpo apresenta uma resistência  $R$  dada por:

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

podemos obter:

$$\tau = \frac{V^2}{R} \Delta t ,$$

ou ainda:

$$\tau = RI^2 \Delta t$$

Como em muitos casos interessa saber a energia transformada por unidade de tempo, e não somente conhecer a energia total transformada, convém lembrar do conceito de potência, normalmente já conhecido da física e mecânica.

Por definição, potência média de um dispositivo que opera a transformação de uma quantidade de energia, realizando um trabalho  $\Delta\zeta$ , num intervalo de tempo  $\Delta t$  é:

$$P = \frac{\Delta\tau}{\Delta t}$$

Nestas condições, é utilizando as expressões deduzidas anteriormente para o trabalho desenvolvido pelo deslocamento de cargas em um condutor, podemos obter:

$$P = VI = \frac{V^2}{R} = RI^2 ,$$

que representa a potência dissipada sob forma de calor por efeito Joule.

São inúmeras e indiscutíveis as aplicações do efeito Joule em aparelhos elétricos, tais como: lâmpadas incandescente, chuveiro, torneira elétrica, fusível, etc. Entretanto, há casos em que a produção de calor é indesejável. Nestes casos, o aquecimento do condutor devido ao efeito Joule representa perda de energia, tal como ocorre nos cabos de transmissão de ener\_

*Além destas poderíamos citar que outras aplicações do efeito Joule.?*

gia, transformadores, motores, geradores, etc... é im ANOTAÇÕES  
portante considerar ainda que o aumento da temperatura  
do condutor limita a intensidade de corrente que pode\_  
mos fazer passar por ele, dependendo essencialmente do  
material isolante que normalmente reveste os conduto-  
res, existindo um critério de dimensionamento de condu-  
tores para instalações elétricas que leva em conta es-  
te fato. Esse é o critério da máxima capacidade de con-  
dução de corrente (ou ampacidade) que será estudado pos-  
teriormente, em Instalações Elétricas. No caso de con-  
dutores isolados com termoplásticos, que constituem a  
maioria dos condutores utilizados em instalações pre-  
diais, a temperatura do condutor não deve ultrapassar  
valores entre 60 e 80°C. (vide anexo 6)

No caso de aparelhos de aquecimento, o condu-  
tor deve ter isolamento elétrico apropriado tal como  
mica e porcelana para altas temperaturas.

Aparelhos elétricos são dispositivos que transformam uma modalidade qualquer de energia em energia elétrica, ou vice-versa.

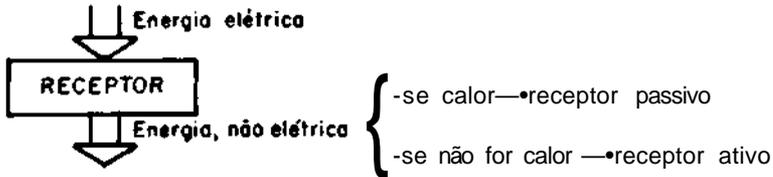
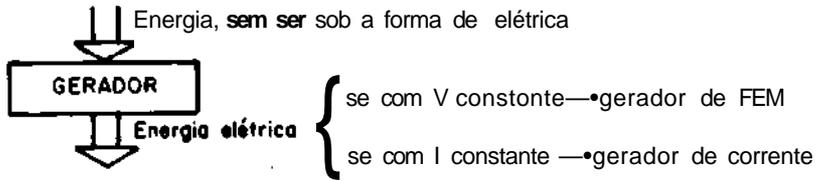
O aparelho elétrico dito gerador é aquele que transforma uma modalidade de energia, que não elétrica, em elétrica. Se, ao fazer esta transformação, este estabelece uma diferença de potencial praticamente constante entre os seus terminais, é denominado gerador de força eletromotriz (FEM). Se estabelecer uma corrente praticamente constante é dito gerador de corrente.

Ao contrario, se o aparelho elétrico transforma energia elétrica numa outra modalidade qualquer de energia, é chamado receptor. Se esta outra modalidade for exclusivamente térmica (calor) então ele é denominado receptor passivo, caso contrário será receptor ativo. Em resumo, temos:

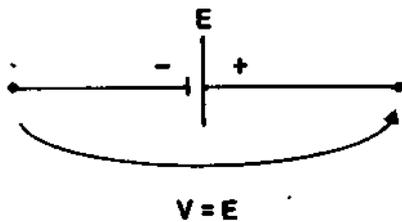
- Gerador ou fonte	- de força eletromotriz (FEM)
Aparelho elétrico	- de corrente
	passivo
- Receptor	- ativo

Ou, ainda, representando como bloco de um sistema:

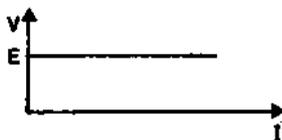
## ANOTAÇÕES



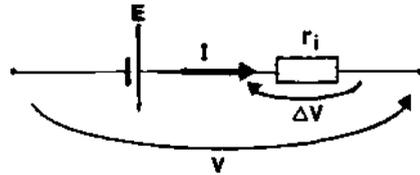
Um gerador de FEM é um bipolo, isto é um aparelho com dois terminais acessíveis, que deve impor uma ddp entre seus terminais. Com os terminais em aberto, isto é, sem estar ligado a qualquer outro componente e portanto sem estar percorrido por corrente, a ddp por ele imposta é denominada força eletromotriz (FEM), indicada geralmente por  $E$



Note que este bipolo não possui nenhuma resistência interna, o que na prática é impossível de se conseguir, posto que os próprios condutores que o constituem apresentam uma resistência intrínseca devido à resistividade do material que os constitui. Nestas condições, o gerador é dito ideal e impõe uma ddp constante entre seus terminais, qualquer que seja a corrente que o percorra quando ligado a um circuito. Assim, se traçarmos o gráfico da tensão em função da corrente ( $V = f(I)$ ) obteremos:



Na prática, a tensão entre seus terminais, quando ele é percorrido por uma corrente, é menor do que a FEM em vazio, devido à queda de tensão na resistência interna. Assim, podemos simbolizar um gerador real de tensão da seguinte forma:

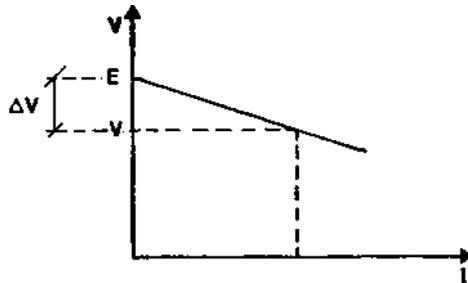


onde,  $V = E - \Delta V$  e  $\Delta V = r_i \cdot I$

$$V = E - r_i \cdot I$$

Note que a tensão tem o mesmo sentido que a corrente.

Nestas condições, o gráfico de  $V = f(I)$  será:



Note que, na prática, a maioria dos geradores se comporta desta maneira, ou seja, segue aproximadamente o comportamento deste modelo. Tal como os geradores eletromecânicos, utilizados em usinas hidroe-létricas, térmicas, nucleares, etc, bem como os geradores utilizados em automóveis, pilhas, bateriais, células fotoelétricas, etc. Todos estes aparelhos podem simplificada-mente ser representados por uma FEM em série com uma resistência. Quando estudarmos circuitos em corrente alternada, veremos que na verdade se trata de

uma impedância no lugar da resistência, e que existem outras perdas além das que ocorrem por efeito Joule.

A potência útil de um gerador de FEM é a potência que ele fornece ao(s) componente(s) ligados aos seus terminais, portanto será:

$$P_u = V \cdot I$$

Como a potência total gerada é:

$$P_t = E \cdot I,$$

a potência dissipada na resistência interna,  $r_i \cdot I^2$  re

*Nestas condições como ficaria a representação como bloco de sistemas?*

$$P_t = P_u + r_i \cdot I^2.$$

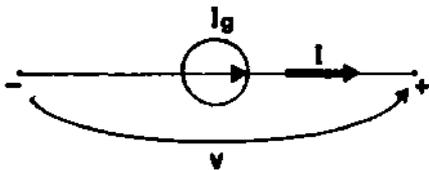
Nestas condições o rendimento do gerador se

rá:

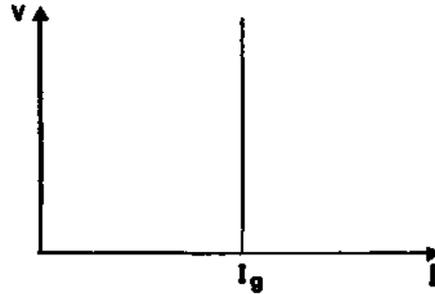
$$\eta = \frac{P_u}{P_t} = \frac{V \cdot I}{V \cdot I + r_i \cdot I^2} = \frac{V}{V + r_i \cdot I}$$

Note que, deste modo, para uma determinada corrente o rendimento do gerador será tanto maior quanto menor for a sua resistência interna.

Um gerador de corrente é também um bipolo gerador, que se aproxima mais de um modelo de um bipolo que impõe uma corrente constante nos seus terminais, e é representado conforme esquema a seguir:

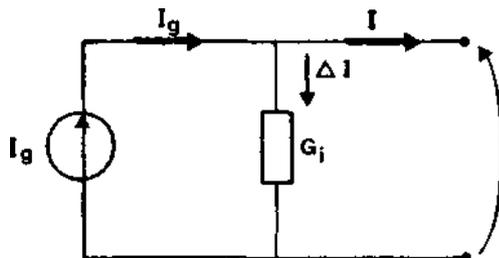


Nestas condições, o gráfico de  $V = f(I)$  será:



Ou seja, a corrente é constante qualquer que seja a tensão entre os seus terminais, obviamente, tal como nos geradores de FEM, este é um caso ideal pois não teríamos nenhuma perda de energia internamente ao gerador.

No caso de um gerador real estas perdas são representadas através da utilização de uma condutância interna, que é devida à resistência intrínseca de equipamento, em paralelo com um gerador ideal de corrente.

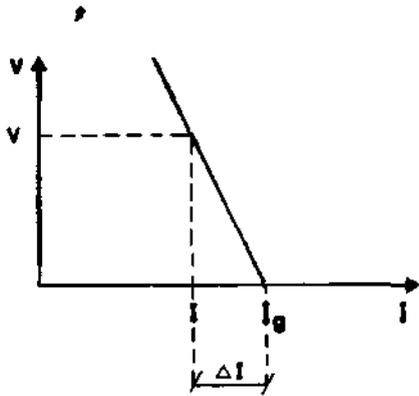


Nestas condições, a parcela da corrente  $I_g$  drenada através de  $G_i$  é:  $\Delta I = G_i \cdot V$

Como, intuitivamente,  $I = I_g - \Delta I$ ,

$$I = I_g - G_i \cdot V$$

Assim, o gráfico de  $V = f(I)$  será:



## ANOTAÇÕES

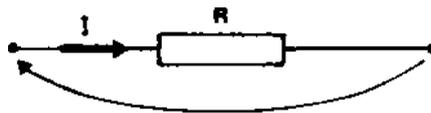
Note que este gráfico se aproxima do gráfico do gerador real de tensão. Na verdade, a única diferença entre os modelos está na relação entre a resistência (ou condutância) interna e a resistência equivalente dos aparelhos que serão ligados aos terminais do gerador. Assim, se analisarmos um gerador de FEM com **uma** resistência interna muito elevada em relação a resistência equivalente dos aparelhos ligados a ele, verificaremos que este gerador terá um comportamento mais próximo do modelo de gerador de corrente, do que o de gerador de FEM. Da mesma forma, se analisarmos um gerador de corrente com condutância interna muito alta (ou seja, resistência interna muito baixa) em relação a condutância externa, ele se comportará mais como gerador de FEM do que de corrente. Portanto o modelo gerador de FEM ou de corrente, a ser utilizado para representar um bipolo gerador, dependerá das características reais deste equipamento, ou seja, de como ele se comporta quando fornecendo energia dentro de seus valores nominais.

*Determine o rendimento de, um gerador de corrente, tal como foi feito com o gerador de FEM.*

Não são comuns geradores que se comportem como geradores de corrente. O exemplo mais usual é o gerador utilizado para solda. Neste caso, a resistência externa, a ser ligada entre os terminais do gerador, é muito baixa em relação a resistência interna, já **que** é constituída pela resistência das chapas a serem **sol**dadas, conseqüentemente, o valor da corrente é limita

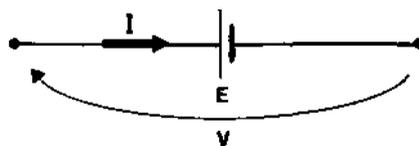
do basicamente pela resistência (condutância) interna do gerador que é praticamente constante, logo a corrente será também praticamente constante, configurando-se assim como gerador de corrente, (anexo 8)

Quanto aos receptores, os passivos, que transformam energia elétrica apenas em calor podem ser representados pelo modelo do resistor. Todos os condutores de corrente elétrica apresentam uma resistência intrínseca e, quando utilizados com o objetivo de transportar a corrente elétrica, são construídos de modo a efetuar o mínimo de produção de calor, ao contrário dos resistores propriamente ditos, que são construídos para oferecerem maior resistência e provocam uma maior produção de calor.



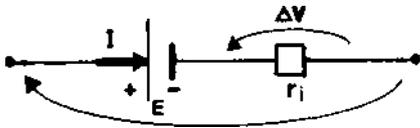
Note que neste caso a corrente tem sentido contrário à tensão.

Os receptores ativos, aqueles que transformam energia elétrica em outra modalidade que não a térmica, podem ser modelados como sendo uma força contra-eletromotriz (FCEM) que a exemplo da FEM também se indica por  $E$ . Assim, como na resistência, a FCEM representa um decréscimo de potencial elétrico das cargas da corrente ao atravessarem o receptor, e portanto, também neste caso a corrente tem sentido contrário a tensão.



A FCEM é a responsável pela energia elétrica cedida pelas cargas da corrente para ser transformada em outra modalidade, exceto em calor. Um caso típico é o motor elétrico, que transforma energia elétrica em mecânica.

Observe que na prática, tal como nos geradores, é impossível conseguir-se transformar uma forma de energia em outra sem também produzir calor. Motivo pelo qual, para obtermos um modelo real do receptor ativo, devemos acrescentar, em série com a FCEM, um resistor que representa a sua resistência interna. Portanto o modelo real de um receptor ativo será:



Nestas condições o rendimento, considerando-se somente as perdas por efeito Joule em um receptor ativo, será:

$$\eta = \frac{P_u}{P_t} = \frac{E \cdot I}{E \cdot I + r_i I^2}$$

## LEI DE OHM GENERALIZADA

Antes de apresentarmos a Lei de Ohm generalizada, vamos apresentar alguns conceitos necessários para o seu entendimento; bem como das leis de Kirchhoff apresentadas a seguir, e utilizados em eletricidade:

No: interligação entre três ou mais bipolos.

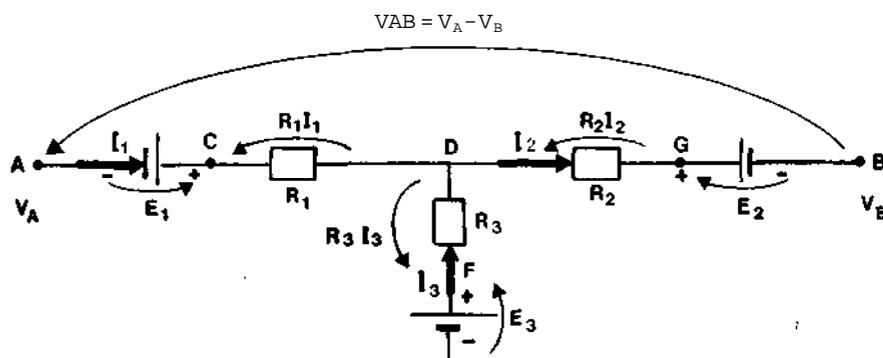
Ponto elétrico: conjunto de pontos materiais a um mesmo potencial

Circuito elétrico: conjunto de bipolos eletricamente interligados

Ramo: caminho possível para a passagem de corrente entre dois nós consecutivos de um circuito elétrico.

Malha: qualquer caminho fechado em um circuito elétrico.

Visto isto, consideremos o trecho de circuito elétrico representado a seguir:



Vamos acompanhar o movimento das cargas da corrente desde o ponto A, onde o potencial elétrico é  $V_A$  até o ponto B, onde o potencial é  $V_B$ .

As cargas, ao passarem por  $E_1$  recebem um

acréscimo de potencial; assim, no ponto C, o potencial delas é:

ANOTAÇÕES

$$V_A + E_1$$

Entre C e D sofrem uma queda de potência  $R_1 I_1$ , em D o potencial será:

$$V_A + E_1 - R_1 I_1$$

Entre D e G também sofrem um decréscimo de potencial,  $R_2 I_2$ , e entre G e B um decréscimo de potencial igual à força contra eletromotriz  $E_2$ . Portanto, ao final do percurso entre A e B, o potencial será:

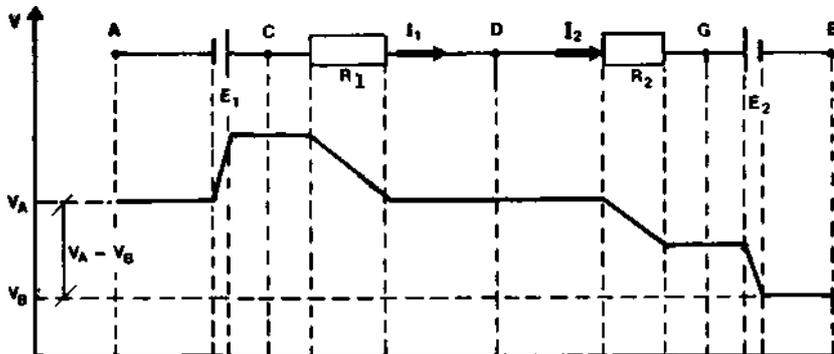
$$V_B = V_A + E_1 - R_1 I_1 - R_2 I_2 - E_2$$

logo:

$$V_{AB} = V_A - V_B = \Sigma E + \Sigma RI$$

Que representa a lei de Ohm generalizada para um trecho de um circuito elétrico, sendo que na parcela  $\Sigma E$  que é uma somatória algébrica, as FEM como  $E_2$  são considerados negativas. Observe que adotamos a tensão, como indicada,  $V_A - V_B$  em sentido contrário ao percurso da corrente, representando portanto a queda de potencial entre os pontos A e B.

Graficamente podemos representar a variação do potencial no trecho AB da seguinte forma:



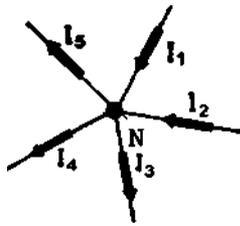
*Não seria interessante representar todas as tensões de um circuito elétrico [simples] desta forma?*

Observe **que isto é muito** intuitivo, pois é **ANOTAÇÕES**  
fácil de se entender que após um certo percurso o potencial será o inicial mais **os** acréscimos de potencial, menos os decréscimos de potencial. Já lançamos mão deste resultado anteriormente, antes da **sua** apresentação formal, no estudo dos geradores.

**PRIMEIRA LEI:**

Aplicando-se o princípio da conservação das cargas, ou seja, como é impossível gerar ou destruir a carga elétrica em um nó qualquer de um circuito elétrico, podemos concluir que a soma das cargas que chegam ao nó é igual à soma das cargas que saem do nó durante o mesmo intervalo de tempo.

Portanto, a soma das cargas  $\Delta q_1 + \Delta q_2$ , trazidas respectivamente pelas correntes  $I_1$  e  $I_2$  no intervalo de tempo  $\Delta t$  é igual à soma



das cargas  $\Delta q_3 + \Delta q_4 + \Delta q_5$  que saem do nó através de  $I_3$ ,  $I_4$  e  $I_5$  respectivamente, no mesmo intervalo  $\Delta t$ . Portanto:

$$\Delta q_1 + \Delta q_2 = \Delta q_3 + \Delta q_4 + \Delta q_5$$

Dividindo esta igualdade membro a membro por  $\Delta t$ , vem:

$$I_1 + I_2 = I_3 + I_4 + I_5$$

Ou, generalizando: "A soma das intensidades das correntes que chegam a um nó é igual à soma das intensidades de corrente que saem deste nó"

$$\sum_{i=1}^n I_i = \sum_{j=1}^m I_j$$

onde:  $I_i$  = correntes que chegam ao nó

$I_j$  = correntes que saem do nó

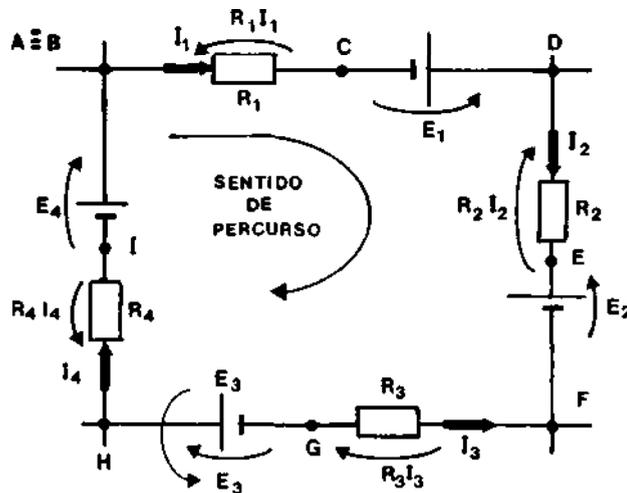
ou ainda, considerando as correntes que chegam ao nó ( $I_i$ ) positivos e as que saem do nó negativos ( $I_j$ ), podemos escrever:

$$\sum_{k=1}^{n+m} I_k = 0 \quad I_k = \text{correntes que chegam ou saem do nó}$$

Observe que como esta lei é bastante intuitiva, ela já foi utilizada anteriormente no estudo dos geradores.

SEGUNDA LEI

A segunda lei de Kirchhoff é decorrente da lei de Ohm generalizada para um trecho do circuito elétrico que constitua uma malha.



Neste caso, o ponto inicial do percurso A, coincide com o ponto final do percurso B, consequentemente:

$$V_A - V_B = 0$$

$$\text{Logo, } 0 = \sum E + \sum RI$$

Porém, note que no exemplo dado acima, a tensão  $R_3 \cdot I_3$  representa um aumento de potencial no sentido de percurso adotado, devido ao fato da corrente ser contrária ao sentido de percurso neste trecho. Portanto, deveria ser considerada como uma FEM neste sentido. Para evitar este tipo de problema sugerimos considerar o seguinte: como o potencial, no ponto inicial, é igual ao potencial no ponto final do percurso, a soma dos acréscimos de potencial (tensões entre dois pontos consecutivos, no mesmo sentido que o percurso adotado) deve ser igual à soma dos decréscimos de potencial (tensões entre dois pontos consecutivos, em sentido contrário ao sentido de percurso adotado).

$$\sum_{i=1}^n V_i = \sum_{j=1}^m V_j$$

onde:  $V_i$  = tensões entre dois pontos consecutivos no mesmo sentido que o percurso adotado

$V_j$  = tensões entre dois pontos consecutivos em sentido contrário ao percurso adotado

ou ainda, considerando as tensões no mesmo sentido que o percurso como positivas e as em sentido contrário negativas:

$$\left| \begin{matrix} n+m \\ \sum_{k=1} V_k = 0 \end{matrix} \right| \quad V_k = \text{tensões na malha}$$

Note ainda que o sentido de percurso é aleatório e não altera o resultado da expressão acima.

Para o caso do exemplo temos:

$$-(V_A - V_C) + (V_C - V_D) - (V_D - V_E) - (V_E - V_F) + (V_F - V_G) + (V_G - V_H) - (V_H - V_I) + (V_A - V_I) = 0,$$

ou seja:

$$-R_1 I_1 + E_1 - R_2 I_2 + E_2 + R_3 I_3 + E_3 - R_4 I_4 + E_4 = 0$$

*Salienta-se que com o conhecimento das Leis de Kirchhoff mais a lei de Ohm é possível a resolução de qualquer circuito, e todas as técnicas de análise de circuitos são baseadas nestas leis simples e intuitivas.*

A seguir da mesma forma que fizemos em *ele\_*trostática, apresentamos um conjunto de experiência sugeridas para o laboratório e trabalhos práticos de *pes\_*quisa que podem acompanhar o desenvolvimento do assunto:

- Verificação da lei de Ohm e medida de resistividade  
. Trabalho:  
Pesquisar as características e aplicações de diversos tipos de resistores comerciais.
- Verificação da variação da resistividade com a temperatura  
. Trabalho:  
Descrever várias aplicações onde ocorra a variação da resistividade com a temperatura.
- Determinação da resistência interna e do rendimento de geradores  
. Trabalho:  
Pesquisar para os diversos tipos de geradores utilizados na prática os seus valores típicos de resistência interna e rendimento.
- Verificação experimental das leis de Kirchhoff  
. Trabalhos:  
Desenvolver analogias que satisfaçam as leis de Kirchhoff, como a hidráulica por exemplo.

## BIBLIOGRAFIA

1. MAYA, Paulo A. Curso básico de eletricidade. São Paulo, Discubra.
2. SENGBERG, Gerhard. Eletrodinamica. São Paulo, Livraria Nobel.
3. HALLIDAY, **David** e RESNICK, Robert. Física. Rio de Janeiro, Livros Técnicos e Científicos Editora.
4. JOHNSON, T.N.O.F- Elementos de corrente elétrica. São Paulo, Livraria Nobel.
5. FERRARA, Arthemio A.P. et alli. Eletricidade básica. São Paulo, L. Ciência e Tecnologia Ed.
6. HAYT JR. William e KEMMERLY, Jack E. Análise de circuitos em engenharia. São Paulo, Mac Graw-Hill do Brasil.
7. MAUAD, Farid C. e NERY, Norberto. Eletricidade básica. São Paulo, P.K.R. ed.
8. ARNOLD, Robert. Fundamentos de eletrotécnica. São Paulo, E.P.U.
9. DITTRICH, Karrye VOLZ. Eugen. Eletricidad práctica. Darmstadt, Ed. Winklers.
10. MARTIGNONI, Alfonso. Eletrotécnica. Porto Alegre, Globo.
11. GUSSOW, Milton. Eletricidade básica. São Paulo, Mc Graw-Hill do Brasil.

ANEXOS

ANOTAÇÕES

Anexo 1 - Catálogos Constanta, Telewatt; Com. Gonçalves  
(pag. 343, 344) e EMH

Anexo 2 - Catálogos Com. Gonçalves (pag. 47 a 52, T06  
a 110, 276 a 301)

Anexo 3 - ABNT, MB-226

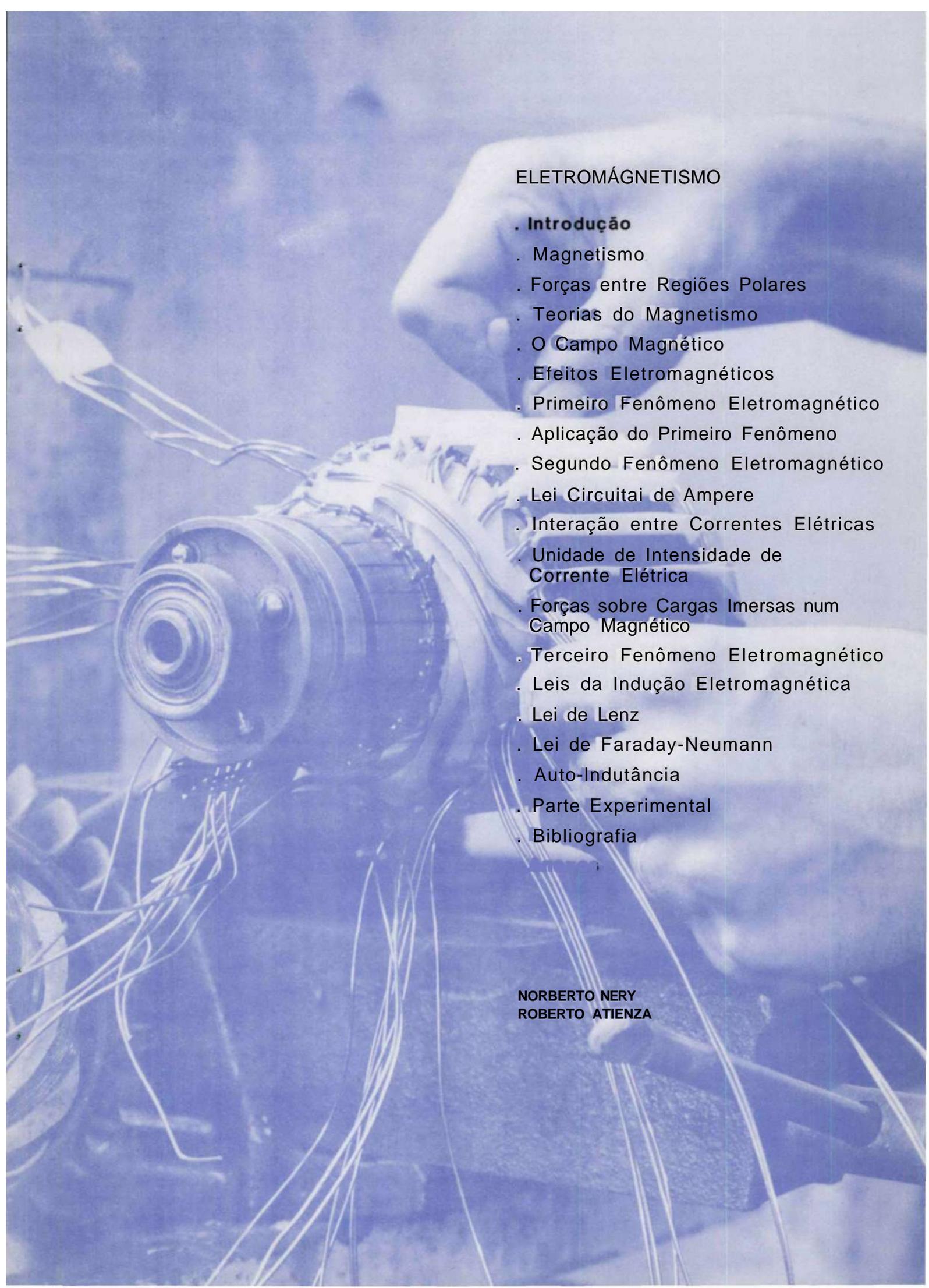
Anexo 4 - ABNT, P-EB-347 e 356

Anexo 5 - ABNT, EB-291 e P.EB.370

Anexo 6 - Catálogos Forest

Anexo 7 - Artigo: Substituição de combustíveis por  
energia elétrica  
Artigo: A demanda energética brasileira no  
ano 2020  
Revista Mundo Elétrico.

Anexo 8 - Catálogos Carmos.



## ELETROMAGNETISMO

### . **Introdução**

- . Magnetismo
- . Forças entre Regiões Polares
- . Teorias do Magnetismo
- . O Campo Magnético
- . Efeitos Eletromagnéticos
- . Primeiro Fenômeno Eletromagnético
- . Aplicação do Primeiro Fenômeno
- . Segundo Fenômeno Eletromagnético
- . Lei Circuitai de Ampere
- . Interação entre Correntes Elétricas
- . Unidade de Intensidade de Corrente Elétrica
- . Forças sobre Cargas Imersas num Campo Magnético
- . Terceiro Fenômeno Eletromagnético
- . Leis da Indução Eletromagnética
- . Lei de Lenz
- . Lei de Faraday-Neumann
- . Auto-Indutância
- . Parte Experimental
- . Bibliografia

NORBERTO NERY  
ROBERTO ATIENZA

## INTRODUÇÃO

Não se pretende nesta proposta fazer um estudo dos fenômenos relativos ao Magnetismo e Eletromagnetismo, mas sim fazer uma apresentação dos fenômenos básicos, dando-se ênfase à sua parte e a suas aplicações práticas.

Assim, abordaremos disjuntores, eletroímãs, geradores, transformadores e instrumentos de medidas. Como início deste estudo, é importante lembrar que na antiguidade já se sabia que nas vizinhanças de uma localidade chamada Magnésia, na Ásia Menor, existia a ocorrência de pedras escuras que exibiam propriedades notáveis de atrair fragmentos de ferro, de exercerem forças mútuas e de se orientarem sempre do mesmo modo em relação à terra quando suspensas de modo a poder girar livremente.

O mineral, que nessas pedras é responsável pelas citadas propriedades, e denominado MAGNETITA (ímãs). Do ponto de vista químico, a magnetita trata-se de óxido de ferro.

Gilbert, na época, realizou várias experiências sobre fenômenos magnéticos e eletrostáticos. De monstrou, irrefutavelmente, que os fenômenos magnéticos são independentes dos eletrostáticos, embora guardam acentuada analogia. Isto mais tarde foi confirmado por Coulomb, que estabeleceu a lei que rege as forças exercidas entre polos magnéticos. Em 1820, Oersted descobriu, casualmente, que uma corrente elétrica também exerce forças em um ímã (bússola), situado em suas vi-

zinhaças, como se fosse um outro ímã; assim nasceu o ELETROMAGNETISMO que evidencia manifestações de correntes elétricas. Estas devem ser entendidas dentro do conceito de cargas em movimento, lembrando da existência de correntes em circuitos elétricos e também dentro dos átomos. O estudo do ELETROMAGNETISMO poderia ser iniciado diretamente através desse conceito, com a vantagem de conduzir rapidamente às aplicações mais importantes, porém exigiria um esforço considerável de imaginação e estudos mediante demonstrações experimentais.

O eletromagnetismo se liga também à teoria da relatividade por intervir na estrutura de núcleos e, à Teoria dos Quanta por intermédio dos aparelhos ciclotrons e betatrons.

Devido a esse fato, esta apresentação se inicia pela MAGNETOSTÁTICA (fenómenos associados à ímãs) que envolve efeitos corriqueiros como os produzidos por ímãs, assegurando-se a continuidade entre esses conhecimentos e aqueles que envolvem o aprendizado do ELETROMAGNETISMO (fenómenos magnéticos causados por correntes elétricas).

## AÇÕES MAGNÉTICAS

Verifica-se que os ímãs apresentam as seguintes características:

- a) são capazes de atrair pedaços de ferro, aço, níquel e mais algumas outras substâncias;
- b) integram-se com forças que podem ser de atração ou de repulsão, dependendo de como eles são aproximados;
- c) não agem sobre cargas elétricas em repouso, que por sua vez não exercem forças sobre ímãs - isto evidencia a natureza distinta das ações magnéticas das elétricas;
- d) se convenientemente suspensos, orientam-se sempre da mesma maneira, num determinado local, em relação à direção Norte-Sul geográfico.

Existe um minério de ferro, a magnetita ( $\text{Fe}_3\text{O}_4$ ), que por natureza já manifesta estas ações magnéticas. Para uso prático, no entanto, a técnica utiliza materiais com características magnéticas mais acentuadas e favoráveis, como, por exemplo, as ligas ALNICO (alumínio, níquel e cobalto). Assim se consegue facilmente, ímãs artificiais de formas diversas: em ferradura, barra, cilindro, anel ou outra qualquer, de acordo com as conveniências da aplicação.

Observando-se a ação de ímãs sobre limalha de ferro, nota-se que qualquer ímã sempre apresenta algumas regiões (no mínimo duas) em que a limalha de ferro é mais intensamente atraída. Essas são chamadas regiões polares. Entre as regiões polares há uma zona de pouca, ou quase nenhuma ação magnética, denominada zona neutra.

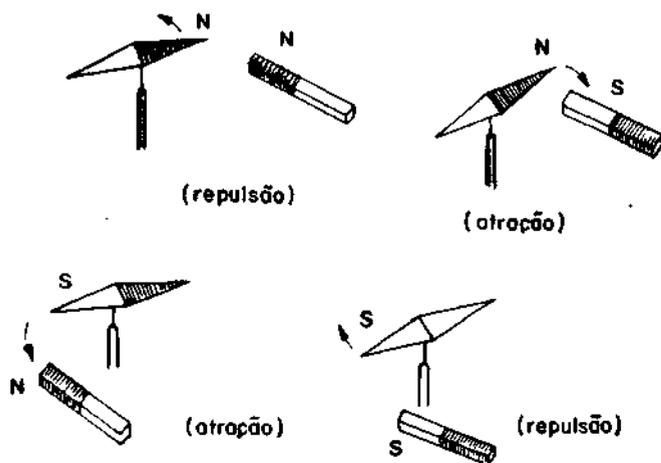
Suspendendo-se um ímã em forma de barra pelo seu centro de gravidade, verifica-se que ele se orienta sempre segundo uma mesma direção, próxima da direção Norte-Sul, apontando sempre a mesma região polar para o Norte. Isto evidencia que as duas regiões polares, em bora ajam da mesma maneira sobre a limalha de ferro, tem comportamento diverso em certas situações. Para distinguí-las denomina-se região polar norte àquela que aponta o norte geográfico, e região polar sul a oposta.

Utilizando-se uma bússola (ímã apoiado ou suspenso pelo centro de gravidade) e outro ímã em forma de barra, podem ser facilmente observados os efeitos a seguir esquematizados.

A conclusão imediata é: "Regiões polares do mesmo tipo se repelem e de tipos contrários se atraem"

Estas forças entre ímãs têm direções que passam por um ponto do qual parecem provir as ações eletrostáticas. Este ponto é chamado polo do ímã.

Todo ímã tem, portanto, no mínimo dois polos: um na região polar norte (Polo Norte) e outro na região polar sul (Polo Sul).



A analogia entre as conclusões anteriores (atração e repulsão entre cargas elétricas) levou os primeiros físicos estudiosos deste fenômeno a admitirem uma causa também semelhante. Supuseram que a causa destas forças magnéticas eram massas magnéticas que estariam colocadas nos polos dos ímãs.

Essas massas magnéticas teriam natureza totalmente diferente daquela das cargas elétricas, pois, como evidencia a experiência, cargas elétricas não agem sobre ímãs e nem ímãs sobre cargas elétricas.

Assim, valeria para as massas magnéticas um princípio totalmente semelhante ao "Princípio de atração e da repulsão" das cargas elétricas.

Experiência descrita adiante (inseparabilidade dos polos de um ímã) evidencia, porém, que o conceito de massa magnética não constitui uma realidade física, como ocorre com o conceito de carga elétrica. No final desta apresentação veremos que a ação magnética dos ímãs é devida a correntes elétricas internas à matéria e, portanto, o Magnetismo deveria ser encarado como um capítulo do Eletromagnetismo.

No entanto, embora o conceito de massa magnética não tenha realidade física, constituindo portanto uma ficção, é conveniente mantê-lo, pois permitirá chegar aos mesmos resultados, através de uma linguagem e de uma visualização mais simples.

Baseado no conceito de massa magnética, pode-se levantar uma estrutura totalmente análoga à Eletrotática para o Magnetismo.

*Devido a artificialidade do conceito de massa magnética, não convém fazer esta analogia em toda à extensão mas só nos pontos mais úteis*

Experiências quantitativas executadas com ímãs mostram que a força de ação mútua entre duas regiões polares, no vácuo, tem as seguintes características:

- a) direção da reta que une os dois polos;
- b) sentido de repulsão para regiões polares de mesmo **tipo** e de atração para regiões polares de tipos opostos;
- c) intensidade susceptível de ser relacionada com a distância entre polos e as características dos polos que interagem por uma fórmula, também denominada de Coulomb, do tipo:

$$|\vec{F}| = \frac{1}{4\pi\mu_0} \frac{|m_1| |m_2|}{d^2} \text{ em que:}$$

$-m_1$  e  $m_2$  são grandezas associadas às regiões polares denominadas **massas magnéticas** ou **intensidades de polo**.

Usam-se os módulos na fórmula, porque se convencionou associar um sinal positivo às massas magnéticas do tipo norte, e um negativo às do tipo sul. Esta convenção mostrou-se ser conveniente na Eletrostática e também o será no Magnetismo. A causa desta conveniência reside no fato de que os dois tipos de massa (ou carga) comportam-se de forma fisicamente oposta e o melhor meio de interpretar isto formalmente é associar-lhes sinais opostos. A intensidade da força, como o módulo de qualquer vetor, é grandeza essencialmente positiva, daí a necessidade de usar os módulos das massas magnéticas.

$d$  é a distância entre os polos que interagem

$\mu_0$  é denominado **permeabilidade magnética do vácuo**

- O fator  $\frac{1}{4\pi}$ , que aparece na fórmula, é usado para efeito de racionalização. A forma de se proceder é semelhante à que ocorre na Eletrostática, isto é, a forma das equações é alterada, aparecendo um fator  $4\pi$  naquelas em que há simetria esférica, como seria de se esperar. Nas equações associadas a situações de geometria plana não aparece o fator  $4\pi$ . O contrário acontecia no modo antigo de se escrever a fórmula de Coulomb, sem o fator  $4\pi$ . Experiências feitas em outros meios, que não o vácuo, evidenciam que neles a força é dividida por um fator  $\mu_r$ , específico de cada meio material, em relação ao valor que se teria no vácuo e os demais fatores são mantidos constantes, ou seja:

$$F_{\text{meio qualquer}} = \frac{F_{\text{vácuo}}}{\mu_r}$$

Pode-se então estabelecer a seguinte fórmula para a força entre polos, num meio qualquer.

$$|\vec{F}| = \frac{1}{4\pi\mu} \cdot \frac{|m_1| |m_2|}{d^2}$$

em que:  $\mu = \mu_0 \cdot \mu_r$

A grandeza  $\mu$  é chamada **permeabilidade magnética** e a grandeza  $\mu_r$  é denominada **permeabilidade magnética relativa**. A primeira possui dimensões físicas, enquanto que a segunda é um número puro, e, portanto, não tem unidades, independentemente do seu valor do sistema (CGSEM, MKSA, etc.) e da forma (racionalizada ou não).

O valor de  $\mu$  é praticamente igual a  $\mu_0$  para a maioria das substâncias da natureza, exceção feita a

um grupo denominado **materiais ferro magnéticos**, para os quais o valor de  $\mu_r$  pode ser elevadíssimo, chegando à ordem de centenas de milhares. Estes materiais são de suma importância prática, pois é deles que se confeccionam ímãs permanentes, eletroímãs, motores, geradores, transformadores e demais aparelhos que envolvem fenômenos eletromagnéticos. Isto justifica que se dedique, oportunamente, um capítulo ao estudo destes materiais.

## UNIDADE 8

### SISTEMA MKSA

Para este sistema, a unidade fundamental de natureza elétrica é a de intensidade de corrente elétrica, o ampere, já conhecido da Eletrodinâmica.

Na fórmula de Coulomb, do Magnetismo, aparecem duas grandezas de natureza nova: a permeabilidade magnética e a intensidade de polo ou massa magnética. No entanto, não é possível definir, por esta fórmula, as duas unidades. O problema é resolvido pela **equação de concatenação**, cuja demonstração envolve conhecimentos mais avançados de Eletromagnetismo e que, por isto, somente será citada.

Esta equação afirma que, para o vácuo, a constante dielétrica ( $\epsilon_0$ ) e a permeabilidade magnética ( $\mu_0$ ) estão relacionadas pela expressão a seguir:

$$c^2 \cdot \epsilon_0 \cdot \mu_0 = 1$$

em que  $c$  é a velocidade de propagação das ondas eletromagnéticas (p.ex. da luz) no vácuo. Esta unidade, por motivos que se verão adiante, recebe o nome henry/metro = H/m, com o valor  $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7}$  H/m

Uma vez conhecida a unidade de permeabilidade magnética, pode-se, a partir da fórmula de Coulomb, definir a unidade de massa magnética. Vamos supor duas massas magnéticas iguais, no vácuo, distanciadas de  $d$  e repelindo-se com força  $F$ . A fórmula de Coulomb fornece então:

$$|\vec{F}| = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \cdot \frac{|m| |m|}{d^2} \dots |m| = \sqrt{4\pi\mu_0 \cdot |\vec{F}| \cdot d^2}$$

Como  $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \text{ H/m}$ , a massa magnética unitária, no sistema MKSA, será aquela **que diante de um** igual no vácuo, origina uma força de repulsão de  $10^7/16\pi^2 \text{ N}$ . Esta unidade recebe o nome **Weber**.

#### TEORIAS DO MAGNETISMO

Um primeiro fato observado foi o fenômeno da inseparabilidade dos polos de um ímã. A teoria que se tinha na época não era capaz de fornecer uma explicação plausível para o fenômeno, pois postulava a existência de massas magnéticas num ímã, concentradas nos polos N e S. De fato, se existissem as massas magnéticas concentradas nos polos de um ímã, então, seccionando este ímã pelo meio, dever-se-ia obter dois pedaços, um com massa magnética N e outro com massa magnética S. Isto, no entanto, não é observado, mas sim que cada um dos pedaços se comporta como um novo ímã, com um polo N e um polo S.

Para explicar este fenômeno admitiu-se que, em lugar das duas massas magnéticas do ímã, havia uma infinidade de pequenos ímãs. Normalmente, quando a peça está desimantada, estes pequenos ímãs encontram-se dispostos de forma estatisticamente desordenada, conforme sugere a Figura 1, e o seu efeito totalizado e

nulo. Se, por um meio qualquer, se conseguir ordenar os pequenos ímãs, de modo que todos tenham aproximadamente a mesma direção para os eixos SN, conforme indica a Figura 2, então os efeitos dos pequenos ímãs se somam e o conjunto apresenta ação magnética. A peça se diz imantada ou magnetizada. Na face direita ter-se-á uma ação tipicamente N e na face oposta uma nitidamente S.



Fig. 1

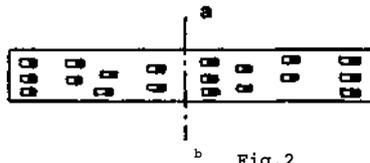


Fig.2

Admitindo-se esta teoria, compreende-se por que seccionando um ímã ao meio se obtém dois novos ímãs, pois as novas faces terão características S e N respectivamente, e cada metade continuará possuindo dois polos.

Hoje, sabemos que não existem esses ímãs interiores, mas que existem elementos equivalentes às partículas constituintes do átomo, dotadas de carga elétrica e em movimento no interior do mesmo, e que se comportam como pequenos ímãs. Por exemplo, um elétron que gira numa órbita constitui uma corrente elétrica, e portanto produz um campo. Num corpo neutro, essas partículas geram campos que se neutralizam. Num ímã, seus campos não se neutralizam, e dão um campo total não nulo.

## O CAMPO MAGNÉTICO

### O VETOR CAMPO MAGNÉTICO

Na eletrostática vimos que em torno de uma

carga elétrica Q existe uma região em que qualquer outra carga q ficava sujeita a uma força originada pela primeira. Ao conjunto dos pontos em que esta ação realmente existia denominou-se **campo elétrico**. A função de ponto deste campo era o **vetor campo elétrico** definido por:

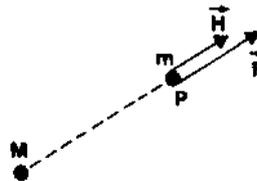
$$\vec{E} = \frac{\vec{F}}{q}$$

A situação do Magnetismo é totalmente analoga. Uma massa magnética M origina ações sobre outra massa magnética m, colocada nas vizinhanças.

Ao conjunto de pontos em que esta ação se manifesta denomina-se **campo magnético** e a função de ponto deste campo é chamada vetor campo magnético.

Dada uma massa magnética M, caso se coloquem num ponto P massas  $m_1, m_2, \dots, m_n$  ob-servam-se sobre elas forças  $F_1, F_2, \dots, F_n$ , respectivamente. É, no entanto, cons-tante a relação

$$\frac{\vec{F}_1}{m_1} = \frac{\vec{F}_2}{m_2} = \dots = \frac{\vec{F}_n}{m_n}$$



Esta relação entre força e massa magnética, constante para um determinado ponto, definiu-se como sendo o vetor campo magnético, no ponto, e representa-se por H.

$$\vec{H} = \frac{\vec{F}}{m}$$

Poderíamos voltar a demonstrar, exatamente da mesma maneira que na Eletrostática, as seguintes pro

priedades:

## ANOTAÇÕES

- a) quando a massa magnética  $M$  for positiva (tipo norte) o vetor campo magnético tem sentido de afastamento e, de aproximação, se  $M$  for negativa;
- b) se a massa magnética que cria o campo for  $M$ , num meio de permeabilidade magnética  $\mu$ , a uma distância  $d$ , o campo magnético tem intensidade dada pela fórmula

$$|\vec{H}| = \frac{1}{4\pi\mu} \cdot \frac{|M|}{d^2}.$$

(esta fórmula é obtida diretamente pela substituição da fórmula de Coulomb na definição de vetor campo magnético; lembre que  $\mathbf{u} = u_o \mathbf{u}_r$ );

- c) quando há várias massas magnéticas produzindo campo, num ponto qualquer, o vetor campo magnético efetivamente existente é a soma vetorial dos vetores campos parciais.

## UNIDADES

No sistema MKSA, campo unitário é aquele que origina uma força de um newton sobre uma massa magnética de um weber.

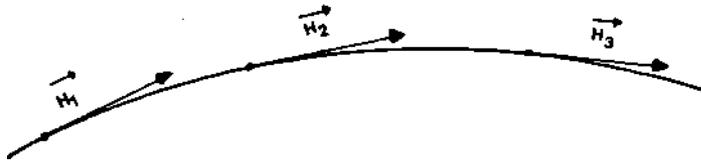
$$\vec{H} = \frac{\vec{F}}{m}$$

$$\left. \begin{array}{l} \text{Se } |\vec{F}| = 1\text{N} \\ \text{e } m = 1 \text{ weber} \end{array} \right\} \vec{H} = 1 \mu\text{MKS}_H = 1\text{A. esp./m}$$

O nome desta unidade, por motivos que veremos adiante, é **ampère-espira por metro**.

A definição de linha de força que se deu em Eletrostática e valida para qualquer campo vetorial, portanto, também para o campo magnético.

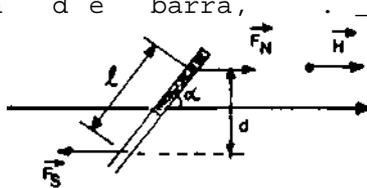
Assim, linha de força de um campo magnético é uma linha que em qualquer de seus pontos é tangente ao vetor campo magnético existente no ponto. A linha é orientada de modo concorde com o vetor campo magnético,



Espectro do campo magnético é uma figura que representa algumas das infinitas linhas de força do campo. O espectro constitui um instrumento gráfico que permite melhor visualização dos fenômenos. Uma vez na posse do espectro de um campo vetorial, uma série de propriedades podem ser previstas por simples inspeção da figura. O espectro do campo magnético pode ser facilmente obtido aproximando-se limalha de ferro sobre uma folha de papel ou vidro do campo. Os grãos da limalha de ferro se orientam segundo as linhas de força.

**AÇÃO DO CAMPO MAGNÉTICO SOBRE UM ÍMÃ EM FORMA DE BARRA**

Seja um ímã em forma de barra, livre de se orientar (p.ex. suspenso pelo seu centro de gravidade), imerso em um campo magnético uniforme,



$$\left. \begin{aligned} \vec{F}_n &= m_n \vec{H} \\ \vec{F}_s &= m_s \vec{H} \end{aligned} \right\} \text{ como } m_n = -m_s \text{ tem-se } \vec{F}_n = -\vec{F}_s$$

chamando  $m = m_n = m_s$  e  $F_1 = F_n = F_s$ , tem-se agindo sobre o ímã um binário de momento.

$$C = |\vec{M}| \cdot |\vec{H}| \operatorname{sen} \alpha$$

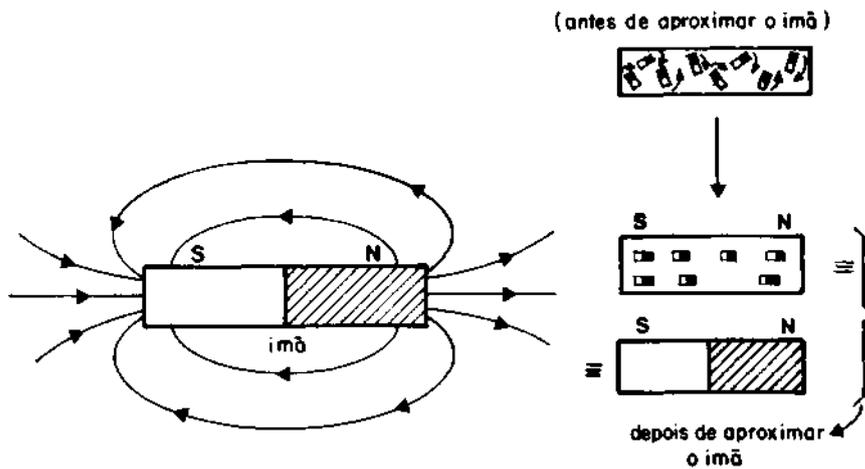
O momento será tanto maior quanto maior o momento magnético do ímã ( $\vec{M} = \vec{m}l$ ), quanto mais intenso o campo magnético (H) e quanto maior o comprimento da barra.

Para  $\alpha = 0$ ,  $C = 0$  e se tem um ponto de equilíbrio. Logo, quando se atingir a situação de equilíbrio, ímãs móveis estarão sempre orientados segundo as linhas de força do campo magnético.

#### IMANTAÇÃO POR INDUÇÃO

Todos os ímãs hoje em dia utilizados são artificiais e, portanto, precisam ser imantados. Usam-se materiais ferromagnéticos (que possuem ímãs microscópicos no seu interior, dispostos normalmente de maneira desordenada) que são sujeitos a campos magnéticos intensos. Os processos para produzir estes campos intensos serão vistos no eletromagnetismo. O campo magnético imposto orienta os ímãs microscópicos e assim imanta a substância. Dessa forma se produz, artificialmente, o fenômeno.

Assim se explica, também, porque um pedaço de ferro não imantado é atraído por um ímã. O pedaço de ferro se imanta por indução. De fato, o campo do ímã primitivo orienta os pequenos ímãs do pedaço de ferro, com o que este passa a possuir uma face tipicamente S e outra nitidamente N. A região Sul está mais próxima do polo norte do ímã original, o que justifica a atração observada entre ambos.



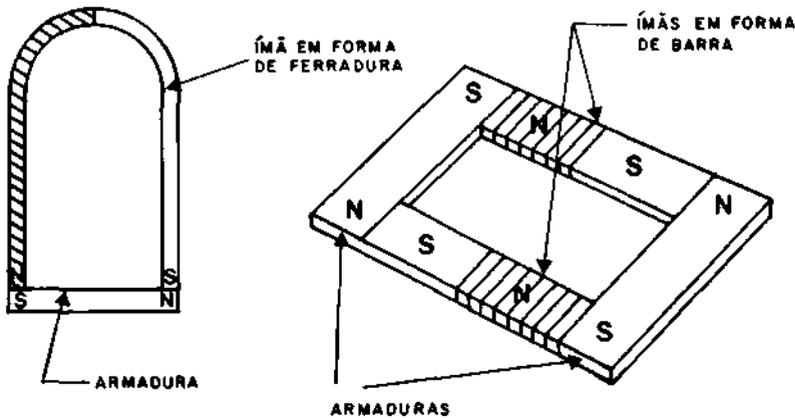
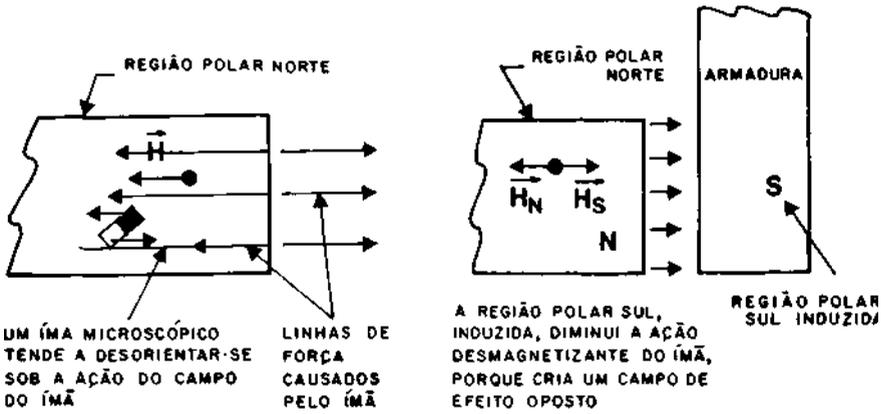
Afastado o ímã, no pedaço de ferro os pequenos ímãs podem permanecer ordenados ou não. Na primeira hipótese, o ímã é dito permanente. Prestam-se à confecção de ímãs permanentes aços temperados e outras ligas como os ALNICOS. O ferro e o aço doce são materiais que não mantêm imantação, uma vez afastada a causa.

#### IMAS PERMANENTES

São, conforme já vimos no paragrafo anterior, os que, uma vez imantados, mantêm a imantação. A constituição interna da matéria é tal que os ímãs microscópicos, orientados no ato da magnetização, mantêm-se neste estado mesmo depois de afastada a causa da imantação. Há certos fatores, no entanto, que tendem a desorientar os ímãs microscópicos e, assim, a desmagnetizar o ímã. Evidentemente estes fatores devem ser evitados nos casos em que se pretende conservar a qualidade do ímã.

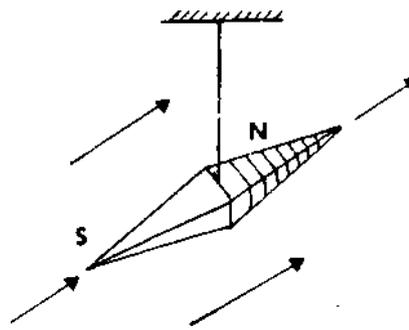
Não se deve aproximar dois polos de mesmo tipo de dois ímãs permanentes. O efeito que se constataria seria exatamente o oposto ao que se verificou na imantação. Esta condição cria alguns problemas quando se tem que armazenar muitos ímãs permanentes numa mesma caixa como, por exemplo, para fins de transporte. Às vezes, a melhor solução é mandar as peças desimantadas, deixando ao usuário a incumbência de imantá-las. Também se deve evitar deixar um ímã permanente sem armadura, por longo tempo. Armadura é uma peça de ferro ou aço doce que se utiliza para fechar o "caminho magnético" dos ímãs permanentes.

Esta peça, bem como sua ação, evidenciam-se nos esquemas abaixo:



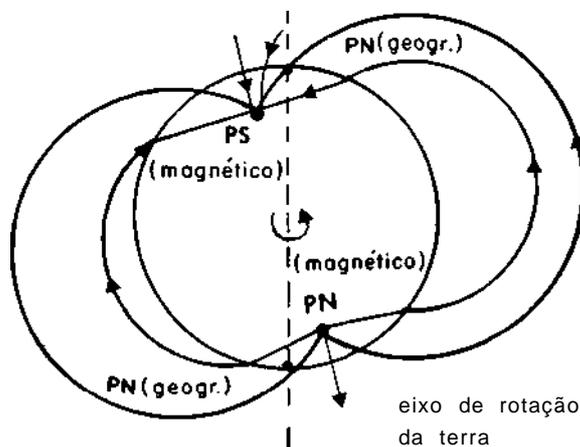
O fato de um ímã em forma de barra, suspenso pelo seu centro de gravidade, se orientar sempre da mesma maneira num determinado lugar, indica a presença de um campo magnético natural, nas vizinhanças da Terra. É exatamente na direção e sentido das linhas de força deste campo que o ímã permanece em equilíbrio. Este efeito encontrou outrora importante aplicação na navegação, através da bússola.

Note que as linhas de força do campo magnético terrestre vão do sul para o norte, o que indica que próximo ao polo geográfico norte existe um polo magnético sul e vice-versa.

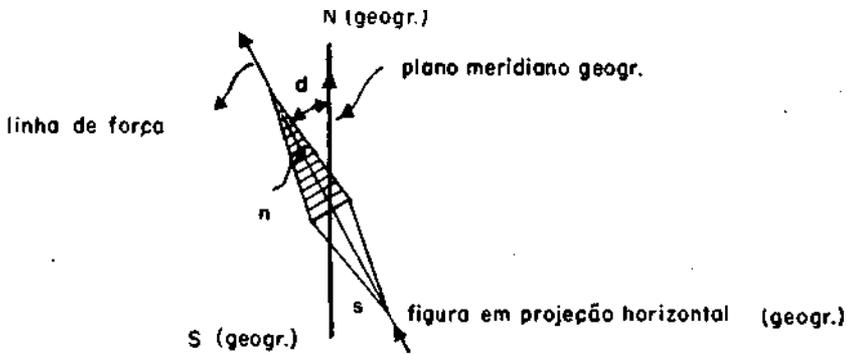


Linhas de força do campo magnético terrestre

A direção das linhas de força num certo local é determinada por dois ângulos: a declinação e a inclinação.

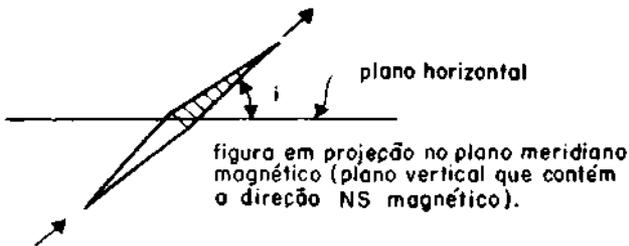


**Declinação** é o ângulo ( $d$ ) formado pelo plano meridiano com o plano vertical que contém o eixo da bússola.



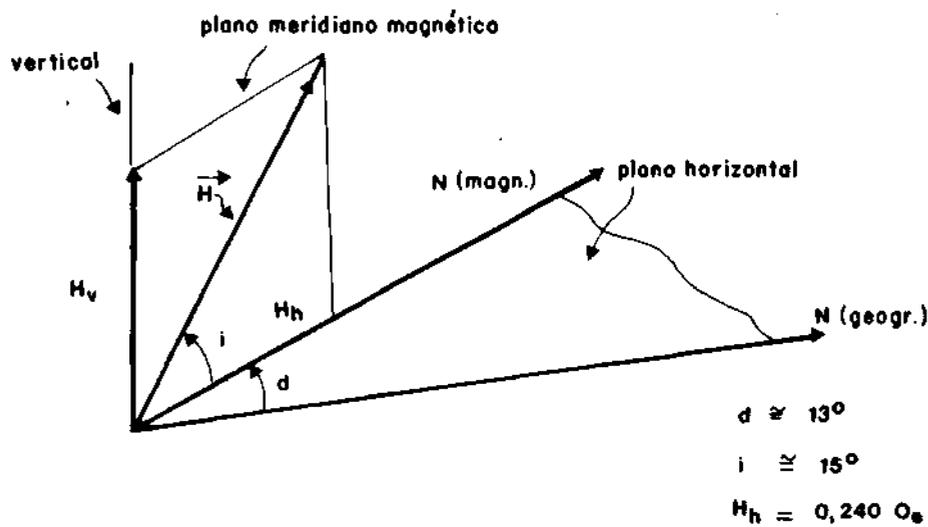
Este é o ângulo que se lê numa bússola com eixo de rotação vertical, de maneira que o movimento da agulha se dá num plano horizontal, se o N da escala (da bússola) for ajustado na direção SN geográfico.

**Inclinação** é o ângulo ( $i$ ) formado pelo eixo da agulha com o plano horizontal do local.



Este ângulo é lido por uma bússola que tem seu eixo de rotação horizontal, de maneira que o movimento da agulha se dá no plano meridiano magnético.

A figura a seguir representa os dois ângulos para o caso de São Paulo.



Para auxiliar a navegação existem mapas nos quais se unem: os pontos de mesma inclinação, dando origem às linhas chamadas isógonas; e os pontos de mesma declinação, originando as linhas isóclinas. Denomina-se equador magnético à isóclina com inclinação nula ( $i=0$ ). Nos polos magnéticos, a inclinação mede  $90^\circ$ .

A configuração do campo magnético terrestre é afetada pelos materiais ferromagnéticos existentes no interior da Terra e pelas características da ionosfera. Esta camada da atmosfera, dotada de carga, acompanhando o movimento da Terra, constitui uma corrente elétrica que, por um fenômeno eletromagnético (que será visto adiante), cria um campo magnético. Assim, o campo magnético terrestre está sujeito a variações, principalmente vinculadas com as da ionosfera. O aparecimento brusco de manchas solares causa alterações profundas da ionosfera e, desta maneira, origina, também, as tempestades magnéticas. Além destas variações bruscas existem variações regulares, como as diurnas, de pequena intensidade, e as seculares, mais acentuadas, porém lentas, só sendo perceptíveis no decorrer de anos.

O eletromagnetismo pode ser considerado como o estudo de certos efeitos nos quais intervêm a corrente elétrica e o campo magnético. Esses efeitos são três e conhecidos como fenômenos eletromagnéticos, a seguir descritos:

- 1) uma corrente elétrica, passando por um condutor, produz um campo magnético ao redor do condutor, como se fosse um ímã;
- 2) um condutor, percorrido por uma corrente elétrica, quando colocado imerso em um campo magnético, fica sujeito a uma força;
- 3) no condutor fechado, colocado imerso em um campo magnético com fluxo variável, aparece uma corrente elétrica.

O segundo fenômeno eletromagnético pode ser mostrado como consequência do primeiro e do princípio da ação e reação.

Ainda, como consequência do segundo fenômeno eletromagnético e do princípio da conservação da energia, chega-se à conclusão que provocada uma variação do fluxo concatenado em um circuito elétrico, nele é induzida uma força eletro-motriz.

Conclui-se, então, que os três fenômenos estão interligados e, admitindo-se um, conclui-se pelos outros.

Nesta apresentação, tal qual encontramos também na maioria dos livros sobre o assunto seguimos a

evolução da história dos três efeitos, anteriormente proposta. ANOTAÇÕES

Atualmente, em cursos avançados, prefere-se estruturar o ELETROMAGNETISMO a partir do terceiro fenômeno.

- \* Representação do vetor que, penetra no plano.
- Quando o vetor sai do plano.

Algumas dificuldades de representação e de convenções para o estudo do eletromagnetismo devem ser destacadas e admitidas para facilitar a compreensão deste conteúdo.

Analogamente ao caso de campo magnético inerte a um ímã, quando o campo magnético é gerado por corrente elétrica, também podemos, da mesma forma, determinar as características do vetor campo. Entre as diversas regras práticas para se assinalar o sentido desse campo, existem a do observador de Ampere, a do saca-rolhas devido a Maxwell, e a da mão direita. Estas se encontram explicadas com detalhes em qualquer dos livros citados na bibliografia.

Outra dificuldade encontrada no estudo do eletromagnetismo é a impossibilidade de representar todos os elementos envolvidos num fenômeno, num mesmo plano. É bem típica a existência de casos de ortogonalidade entre causa e efeito. Para se evitar representações em perspectiva, pode-se estabelecer algumas convenções que facilitem o estudo.

## **PRIMEIRO FENÔMENO ELETROMAGNÉTICO**

### **AÇÃO MAGNÉTICA DAS CORRENTES ELÉTRICAS**

Em 1820, o físico dinamarquês Oersted observou que, quando a agulha de uma bússola é colocada pro\_

xima de uma corrente elétrica, essa agulha é desviada de sua posição. O deslocamento da agulha só se explica pela formação de um campo magnético em torno do condutor percorrido por corrente elétrica, que é a condição para que ela entre em movimento.

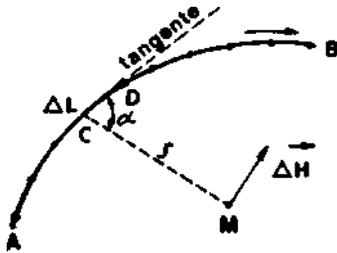
Imaginando um saca-rolhas avançando no sentido da corrente elétrica, o seu sentido de rotação é também o sentido do vetor campo magnético.

Experiências quantitativas evidenciam que o módulo do vetor campo produzido por um elemento  $\Delta l$  de comprimento do condutor é dado por

$$|\Delta \vec{H}| = \frac{i \cdot \Delta l \cdot \sin \alpha}{r^2}$$

Expressão conhecida por primeira lei elementar de Laplace ou lei de Biot-Savart

*Ambos pesquisadores de mostraram experimentalmente independentemente da Laplace*



O campo total no ponto seria a somatória estendida a todo o condutor

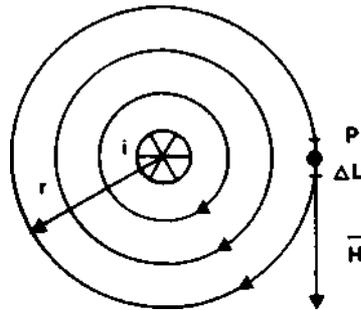
$$\vec{H} = \sum \Delta \vec{H}$$

Analisando agora na linha fechada e, percorrendo-se essa somatória, chega-se à lei circuital de Ampere, que não pode ser demonstrada em um curso elementar de eletromagnetismo.

Exemplos de campos magnéticos gerados por correntes elétricas podem ser analisados em algumas configurações especiais, como por exemplo:

**a) Condutor Retilíneo**

Onde as linhas de forças são circunferências centradas com o centro do eixo do condutor



$$i = \sum |\vec{H}| \Delta l \cos \alpha$$

$$\left. \begin{array}{l} \cos \alpha = 1, \text{ pois } \alpha = 0 \\ |\vec{H}| = \text{cte} \end{array} \right\} i = |\vec{H}| \sum \Delta l \left\{ i = |\vec{H}| \cdot 2\pi r \right.$$

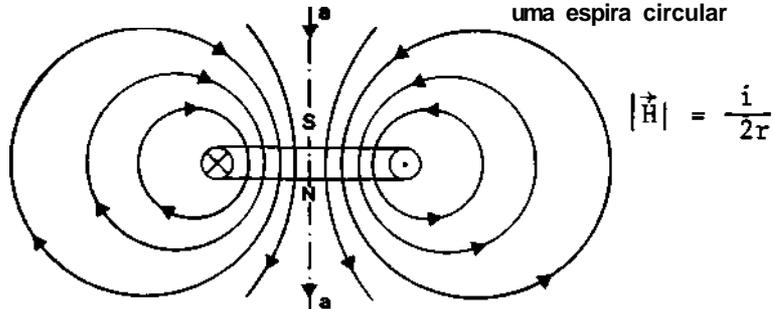
ou, finalmente  $|\vec{H}| = \frac{i}{2\pi r}$

OBS: Esta fórmula é conhecida também pelo nome de Lei de Biot-Savart

**b) Espira Circular**

Onde so é simples o cálculo da intensidade do vetor campo magnético em pontos sobre o eixo da espira.

espectro do campo magnético criado por uma espira circular

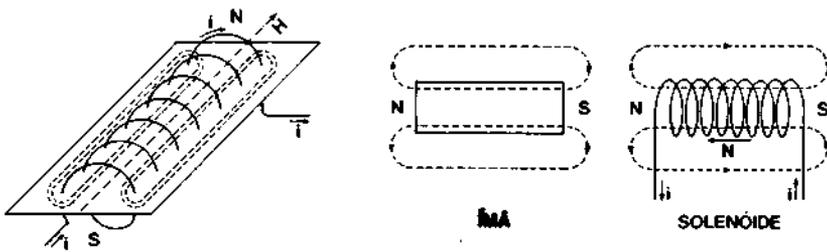


c) **Solenóide**

**ANOTAÇÕES**

É um condutor disposto em forma de espiral. O sentido das linhas de força pode ser dado pela regra do saca-rolhas ou pela regra da mão direita. As linhas de força que se formam são idênticas àsquelas produzidas por um ímã.

Na prática, é indiferente produzir-se um campo magnético por um ímã ou por um solenóide. Por analogia, chama-se pólo norte ou face norte de um solenóide à extremidade do solenóide por onde saem as linhas de força e por onde entram de pólo sul ou face sul.



d) **Bobinas**

É um número, normalmente grande, de espiras justapostas e empilhadas. O formato das espiras não é necessariamente circular, como no solenóide, assumindo usualmente forma quadrada ou retangular.

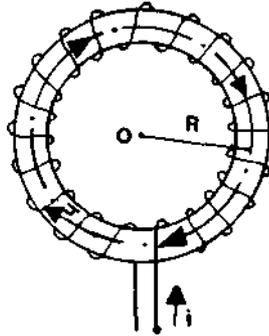
e) **Toróide**

Em um toróide, feito de material qualquer, se enrola um fio em forma de "espiral".

Aplicando-se a lei circuital de ampere à circunferência de raio R tem-se:

$$Ni = 2R \cdot |\vec{H}| \cdot \dots \cdot |\vec{H}| = \frac{N i}{2\pi R}$$

ANOTAÇÕES



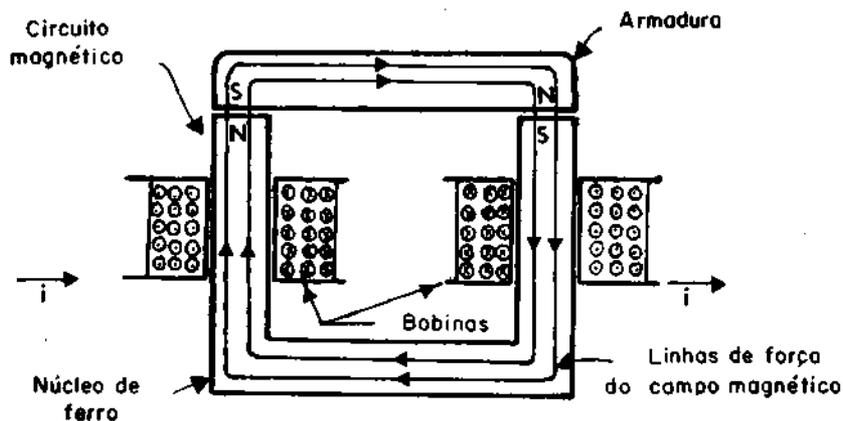
Esta disposição do sistema é particularmente vantajosa na análise das características dos materiais magnéticos.

### APLICAÇÃO DO PRIMEIRO FENÔMENO

#### a) Eletro-ímãs

São feitos de materiais ferro-magnéticos (normalmente aço silício) que não retém a imantação quando cessa a corrente. Formam um "circuito" magnético, em que se podem alojar as linhas de força do campo magnético, que se concatena com bobinas que são percorridas por correntes elétricas.

Pode-se separar o circuito magnético em duas partes: o núcleo e a armadura.



- Princípio de funcionamento :

Já se viu que uma bobina percorrida por corrente elétrica cria um campo magnético. Este, no entanto, não é suficiente para se conseguir forças atrativas intensas.

Este campo é aproveitado para orientar os "ímãs microscópicos" que existem dentro do material ferro magnético do núcleo, que desta maneira se imanta.

O campo magnético resultante em qualquer ponto do espaço será a soma vetorial dos campos criados pela bobina e pelo núcleo, sendo que o segundo supera de muito o primeiro. Numa das "pernas" do núcleo, aquela da qual saem as linhas de força, tem-se aparentemente um polo N; na outra tem-se um polo S.

Aproximando a armadura, esta se imanta por indução, surgindo um polo S, diante do N do núcleo, e outro N, diante do S do núcleo. É evidente que resultará uma força de atração.

- Vantagens dos Eletroímãs

A maior vantagem dos eletroímãs está em serem intermitentes. De fato, cessada a corrente elétrica, escolhido material adequado para o núcleo, os ímãs microscópicos deste se desorientam e se perde a ação magnética. Percebe-se, portanto, que para a confecção de ímãs permanentes e eletro-ímãs, os materiais utilizados devem ser de naturezas diversas. Deve-se garantir, na confecção de ímãs permanentes, que o material apresente imantação permanente, ou seja, que os ímãs microscópicos uma vez orientados, assim permaneçam. Para a confecção dos eletro-ímãs devem ser evitados materiais que apre

sentem esta característica.

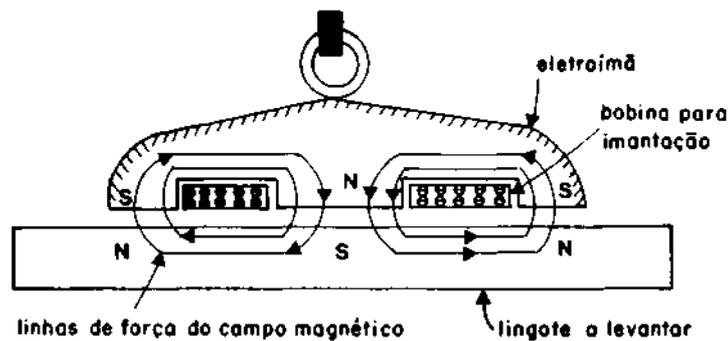
## ANOTAÇÕES

Outra vantagem dos eletro-ímãs está em se conseguir uma menor relação custo "força de atração obtida" principalmente para grandes forças.

Antigamente, conseguia-se com os eletro-ímãs maiores "forças" do que com os ímãs permanentes, mas hoje em dia, com os materiais magnéticos modernos, como por exemplo o alnico, isto não é mais verdade.

### Aplicações

As aplicações dos eletro-ímãs são muito variadas. Com o objetivo específico de causar forças para suspender cargas, o eletro-ímã encontra aplicação em guindastes, nas indústrias que trabalham com materiais ferromagnéticos (siderúrgicas). Neste caso o aspecto do eletro-ímã, preso ao guindaste é externamente circular e, em corte teríamos:

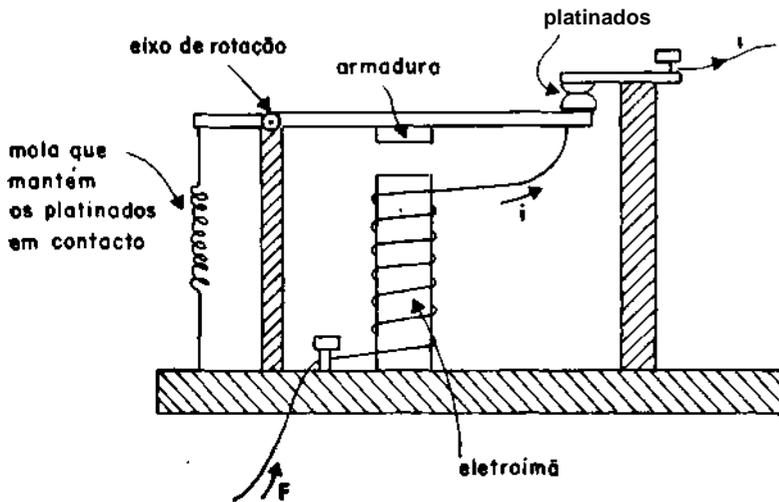


A seguir, analisaremos algumas aplicações dos eletro-ímãs, em que a força interna de atração magnética não é o objetivo principal.

## b) Disjuntores

ANOTAÇÕES

### • De Corrente.



A corrente, passando pela bobina, imanta o núcleo, que atrai a armadura. Para pequenas correntes, a força de atração é menor do que a da mola, e nada acontece. Para uma certa corrente, que é a nominal do disjuntor, as duas forças se igualam. Acima desta corrente, a força magnética supera a da mola e se tem a abertura do circuito. É evidente que se deve pensar num sistema de "engate" para evitar que se volte à situação primitiva, uma vez cessada a corrente elétrica.

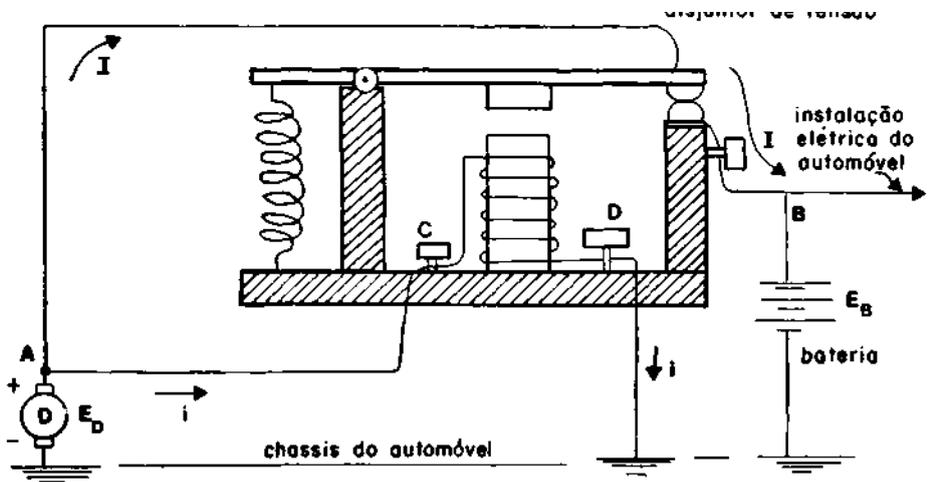
Percebe-se que o disjuntor de corrente funciona como uma chave para um certo valor da corrente, tendo ação semelhante à do fusível comum, mas com trls vantagens em relação a este:

- . tem precisão muito maior na corrente de abertura;
- . uma vez acionado, não há necessidade de reposição. basta averiguar a causa da abertura e, uma vez eliminada esta causa, restabelecer o contacto;
- . pode-se variar a corrente nominal, variando a tensão da mola.

### Disjuntores de tensão

ANOTAÇÕES

Em vez da abertura ou fechamento dos platinados ser comandado pelo valor da corrente que circula num circuito principal, usa-se a tensão entre dois pontos como elemento de comando. Para exemplificar, considere o circuito abaixo, utilizado em automóveis antigos.

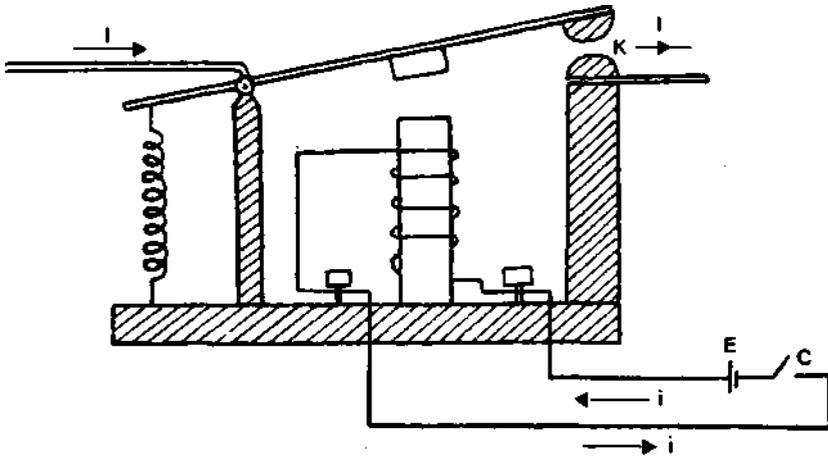


A função do dínamo é recarregar a bateria continuamente. Ligar A a B diretamente seria desastroso, porque, quando o motor está parado, o dínamo não tem f.e.m. e a bateria se descarregaria, em poucos instantes, através da resistência interna do dínamo, normalmente muito pequena. Além disso, ter-se-ia a "queima" do dínamo, por efeito joule excessivo. Instala-se então, entre A e B, um disjuntor de tensão.

Se a f.e.m. da bateria for  $E_B = 6V$ , ajusta-se a tensão da mola de tal forma que os platinados só fechem para uma corrente  $i$ , que corresponde a uma tensão entre C e D  $U_{CD} = 7V$ . Garante-se, desta forma, que a corrente sempre flui de A para B. A corrente  $i$  flui continuamente. No entanto, pode-se fazê-la suficientemente pequena, usando muitas espirais de fio fino.

Uma diferença marcante entre os disjuntores de corrente e os de tensão é que os primeiros têm poucas espiras de fio grosso, enquanto que os segundos têm muitas espiras de fio fino.

c) Relés e chaves magnéticas



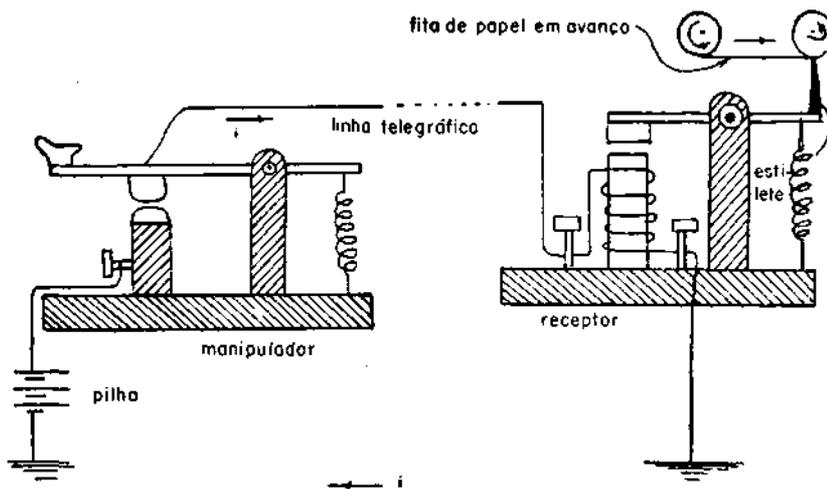
Fechando a chave C, a chave K é fechada, devido à magnetização do núcleo. A corrente  $i$  pode ser muito menor do que a corrente  $I$ , e o comando pode ser feito à grande distância.

Frequentemente este sistema é aconselhável por motivos de segurança. Pode-se ter o circuito principal de "alta tensão", caso em que seria perigoso atuar diretamente na chave K. O circuito de comando será, no entanto, de baixa tensão e não pode haver qualquer perigo agindo em C. Quando a corrente principal  $I$  for grande, a abertura da chave K pode ocasionar faíscas que se tornam perigosas para o operador. Agindo em C, elimina-se este inconveniente. Este sistema é industrialmente aproveitado nas "chaves magnéticas".

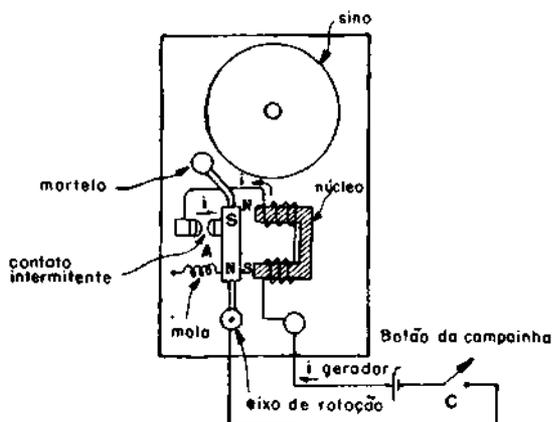
Pode-se ainda colocar várias chapas metálicas, cada uma com vários pares de platinados, comandadas, simultaneamente, pelo mesmo núcleo. Desta forma, com um único comando em C, executam-se várias ligações

simultaneamente. Nos quadros de comando de elevadores usam-se estes artifícios. O mesmo sistema é usado nos automóveis, para comando dos faróis e da buzina.

d) Telégrafo



Toda vez que o operador agir no manipulador, no outro extremo haverá contacto entre o estilete e a fita de papel. Dependendo da duração deste contacto, ter-se-á na fita um traço ou um ponto. Convencionando o código Morse, que representa todo o alfabeto em forma de traços e pontos, pode-se transmitir notícia de um a outro extremo.



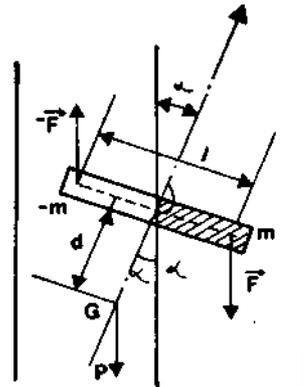
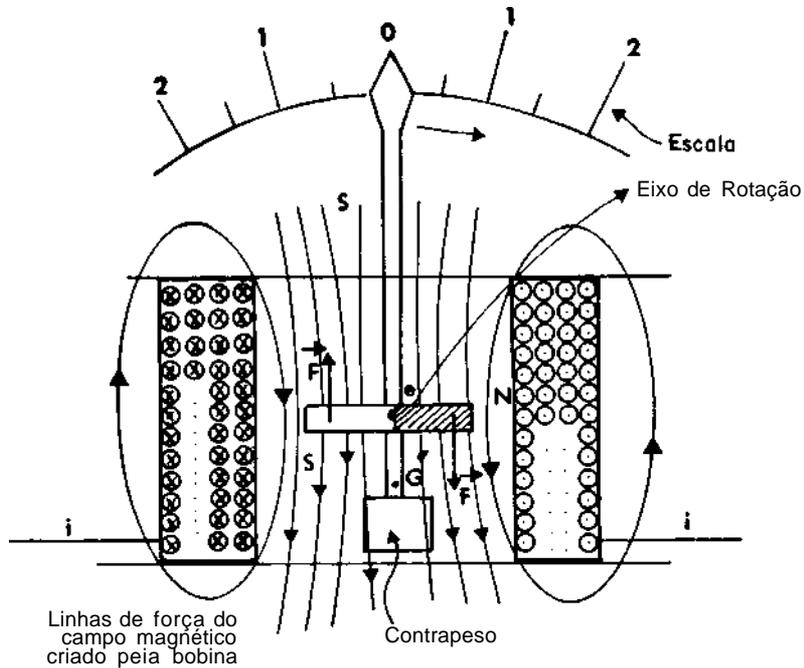
Fechando a chave C, passa corrente no circuito, há magnetização do núcleo, atração do martelo e, portanto, uma batida no sino. Mas, com a atração, em A se abre o circuito e o núcleo se desmagnetiza; a mola leva o sistema, então, à situação primitiva. O fenômeno vai se repetindo.

Observe-se que esta campainha funciona também em corrente alternada, pois não importa em que sentido circula a corrente no circuito.

#### f) Galvanômetro de ímã móvel

O princípio de funcionamento é fácil de entender. Uma bobina cria um campo magnético que age sobre um ímã móvel. Este gira até uma posição de equilíbrio, em que o momento causado pela força magnética é neutralizado pelo momento que tende a retornar o sistema à posição inicial. Este momento de restauração pode ser fornecido por uma mola ou, como no esquema a\_

baixo, pela força peso, ou pelo próprio campo magnético ANOTAÇÕES  
 tico da Terra (ver galvanômetro das tangentes).



Na situação de equilíbrio

$$P \cdot d \cdot \sin \alpha = F \cdot l \cdot \cos \alpha$$

$$\text{mas } \vec{F} = m \cdot \vec{H} \quad \cdot \quad P \cdot d \cdot \operatorname{tg} \alpha = m \cdot K \cdot i \cdot l$$

$$\text{e } \vec{H} = K \cdot i$$

$$\therefore i = \frac{P \cdot d}{m \cdot l \cdot k} \cdot \operatorname{tg} \alpha \quad \therefore i = a \cdot \operatorname{tg} \alpha$$

Mede-se  $\alpha$  e calcula-se  $i$ , uma vez conhecida a constante do aparelho:

$$\underline{a} = \frac{P d}{m l k}$$

A escala já pode vir graduada em amperes.

## ANOTAÇÕES

Quando a corrente muda de sentido, a deflexão também inverte. Este aparelho não pode, portanto, medir correntes alternadas. Um dos inconvenientes deste amperômetro é que  $a$  varia com o tempo, porque  $m$  não é constante (o ímã vai se desimantando).

### g) Galvanômetro das tangentes

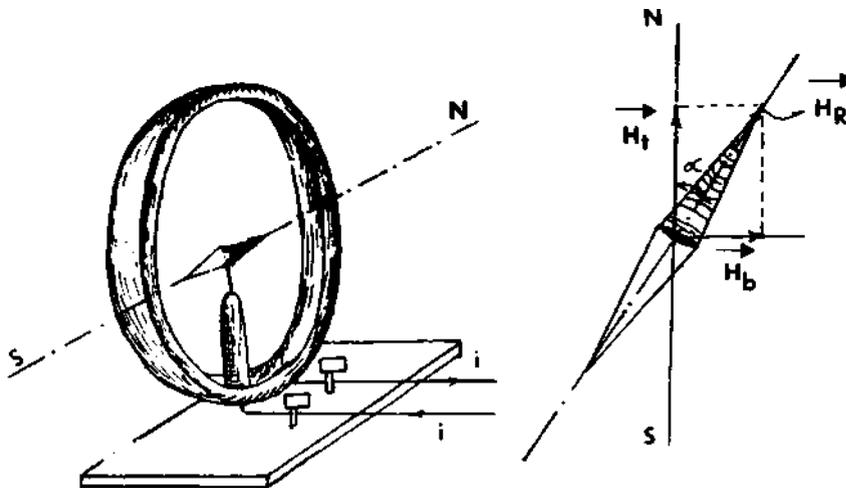
É também um galvanômetro de ímã móvel, só que o momento de restauração é dado pelo campo magnético da Terra.

O plano da bobina é vertical, ajustado, para coincidir com o plano meridiano magnético local. A agulha, na ausência de corrente  $i$ , fica no plano da bobina. Passando uma corrente  $i$  pela bobina, a agulha deflete de um ângulo  $\alpha$

Pode-se escrever:

$$\operatorname{tg} \alpha = \frac{H_b}{H_t} \text{ mas } H_b = k i \cdot i = \frac{H_t}{k} \cdot \operatorname{tg} \alpha$$

$$i = a \operatorname{tg} \alpha$$



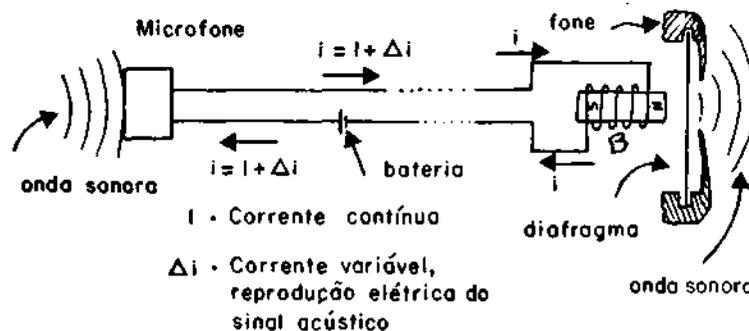
Galvanômetro das tangentes

Este tipo de galvanômetro tem a constante a praticamente inalterada com o tempo. Também não serve para medir correntes alternadas.

h) **Fone**

Tem-se um pequeno núcleo de material ferromagnético, em torno do qual se enrola uma bobina B, diante de uma fina placa de aço (diafragma).

Passa-se pela bobina uma corrente  $i$  que é comandada pela pessoa que fala no outro extremo.



Esta corrente aumenta ou diminui a força de atração sobre o diafragma que, desta forma, entra em vibração. A vibração da lâmina ocasiona a vibração do ar em torno, ou seja, gera um som que é uma reprodução mais ou menos fiel daquele que foi introduzido no microfone, no outro extremo da linha.

i) **Motores, geradores e transformadores**

Nestes três tipos de máquinas, é necessário haver campos magnéticos intensos. Para obtê-los, a não ser em algumas máquinas pequenas, em que ímãs permanentes podem ser vantajosos, recorre-se aos eletro-ímãs. Têm-se, desta forma, as "bobinas de campo" das máquinas elétricas, que permitem obter igual campo que o criado por ímãs permanentes, com um custo muito menor.

Quando apresentamos o vetor campo magnético  $\vec{H}$ , usamos a análise do efeito (força) produzido sobre diferentes massas magnéticas.

Para prosseguir o estudo do eletro-magnetismo é conveniente definir um novo vetor, chamado vetor de indução magnética ( $\vec{B}$ ), cuja intensidade é função do meio em que o mesmo está imerso, quando o campo é causado por corrente elétrica.

$\vec{B} = u\vec{H}$  onde  $u$  é a permeabilidade magnética do meio

#### Característica de B

A direção e o sentido de indução  $\vec{B}$  é a própria direção e sentido do campo magnético  $\vec{H}$ , e significa a maior ou menor possibilidade de ação do campo em função da maior ou menor permitividade do meio para aquela ação.

Sendo  $u$  a permeabilidade magnética do vácuo, e  $u_r$  a permeabilidade do meio em relação ao meio vácuo, chega-se a  $u = u_0 \cdot u_r$

Nesta oportunidade, é necessário lembrar que pela 1ª lei de Laplace  $(\vec{\Delta H}) = \frac{i \cdot \Delta l \cdot \text{sen } \alpha}{r^2}$  observa-se que o campo independe do meio, o que não acontece quando o campo ( $\vec{H}$ ) é gerado por massas magnéticas onde

$$\vec{H} = \frac{\vec{F}}{u}$$

#### SEGUNDO FENÔMENO ELETROMAGNÉTICO

Mostra-se a seguir que um condutor, percorrido por uma corrente elétrica, fica sujeito a uma força quando o mesmo é colocado imerso em um campo magnético.

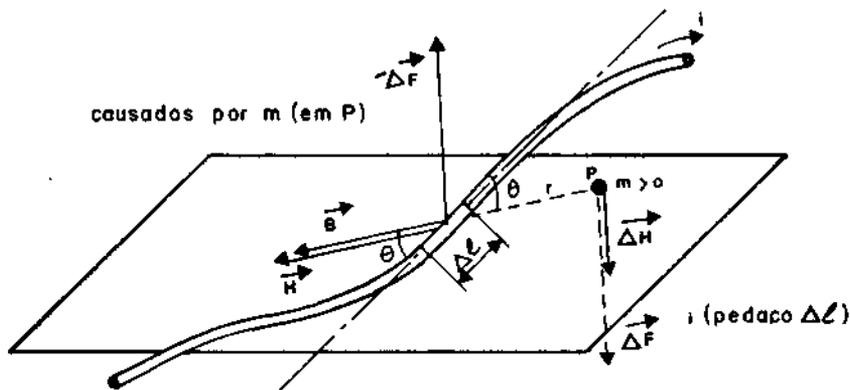
Justifica-se que, como consequência do primeiro fenômeno eletromagnético e do princípio da ação e reação, é de se esperar que um campo magnético origine forças sobre correntes elétricas.

Dado um condutor percorrido por uma corrente elétrica  $i$ , em torno dele surge um campo magnético (primeiro fenômeno eletromagnético). A primeira lei elementar de Laplace permite calcular o módulo do campo parcial  $\Delta H$  provocado por um pedaço  $\Delta \ell$  do fio, num ponto qualquer.

$$|\vec{\Delta H}| = \frac{1}{4\pi} \frac{i \Delta \ell \sin \theta}{r^2}$$

Colocando em P uma massa magnética  $m$ , devido ao campo parcial  $\Delta H$  surge uma força parcial  $\vec{\Delta F}$ , de valor

$$\vec{\Delta F} = m \vec{\Delta H}$$



Em vista do primeiro fenômeno, o elemento  $\Delta \ell$  age sobre a massa magnética  $m$  como uma força  $\vec{\Delta F}$ . Então, pelo **princípio da ação e reação**, é de se esperar que a massa  $m$  reaja sobre  $\Delta \ell$  com uma força  $-\vec{\Delta F}$ , de mesma intensidade e de sentido contrário. No esquema dado anteriormente representam-se todos os elementos citados.

Dessa forma, a intensidade da força que age sobre o pedaço  $\Delta \ell$  do condutor e:

$$|-\Delta \vec{F}| = |\Delta \vec{F}| = |m| |\Delta \vec{H}| = |m| \frac{1}{4\pi} \frac{i \Delta \ell \text{ sen } \theta}{r^2}$$

ou seja:  $|\Delta \vec{F}| = \frac{1}{4\pi} \frac{|m|}{r^2} i \Delta \ell \text{ sen } \theta$

A massa magnética  $m$  ocasiona, no ponto em que se localiza  $\Delta \ell$ , um vetor indução magnética de intensidade:

$$|\vec{B}| = \mu |\vec{H}| = \frac{\mu i}{4\pi r^2} \frac{|m|}{r^2} = \frac{1}{4\pi} \frac{|m|}{r^2}$$

Observando as duas últimas expressões, conclui-se:

$$|\Delta \vec{F}| = |\vec{B}| \cdot i \cdot \Delta \ell \cdot \text{sen } \theta$$

Esta expressão quantitativa referente ao segundo fenômeno eletromagnético e, é conhecida como **segunda lei elementar de Laplace.**

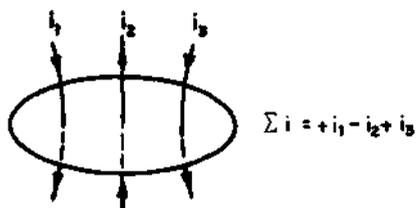
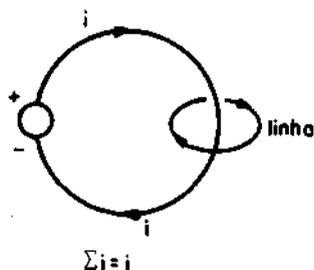
### LEI CIRCUITAI. DE AMPERE

Trata-se de uma proposição essencial a continuidade desta apresentação, que pode ser demonstrada racionalmente em alguns casos particulares a partir da Primeira Lei de Laplace, mas que é admitida como válida em todos os casos.

Limitamo-nos a apresentar a Lei Circuitai de Ampere, sem demonstração:

"A circuitação do vetor H ao longo de qualquer linha fechada é igual à soma das correntes concatenadas nesta circuitação".

$$\Sigma \vec{i} = \pm \Sigma \vec{H} \cdot \Delta l \cdot \cos \alpha$$



Generalizando:  $\Sigma \vec{i} = \pm \vec{n} \cdot \vec{i}$

Esta expressão é conhecida por força-magneto-motriz (f.m.m.)

Neste caso particular, todas as forças AF que agem sobre os diferentes elementos  $\Delta l$  têm a mesma direção e sentido, permitindo facilmente o cálculo da  $\vec{F}$  resultante, que age sobre um pedaço do condutor.

$$\vec{F} = \Sigma \Delta \vec{F} \text{ e, no caso, } |\vec{F}| = \Sigma |\Delta \vec{F}|$$

como  $|\Delta \vec{F}| = |\vec{B}| \cdot i \Delta l \sin \theta$ , resulta

$$|\vec{F}| = |\vec{B}| \cdot i \Delta l \sin \theta = |\vec{B}| \cdot i \sin \theta \Sigma \Delta l$$

portanto,  $|\vec{F}| = |\vec{B}| \cdot i \cdot l \cdot \sin \theta$

Nota-se que, para obter a máxima força sobre o condutor, deve-se dispô-lo perpendicularmente às linhas de força. Quando o condutor é paralelo às linhas de força, a força sobre o condutor é nula.

#### UNIDADES

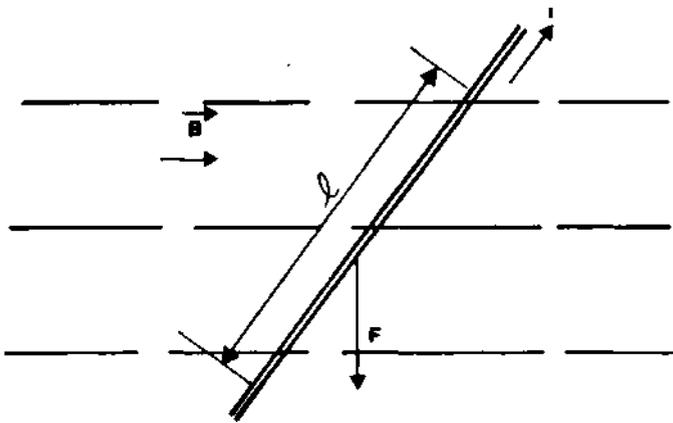
##### Sistema MKSA

Define-se unidade de indução magnética pela fórmula

$$|\vec{F}| = |\vec{B}| \cdot i \cdot l \cdot \sin \theta$$

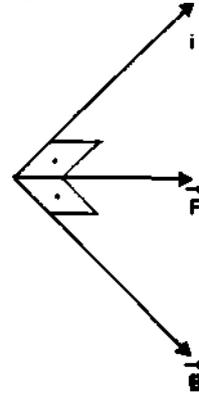
Intensidade de indução magnética unitária é ANOTAÇÕES  
 a de um campo uniforme no qual um condutor retilíneo,  
 de um metro de comprimento, disposto perpendicularmen  
 te às linhas de indução do campo magnético, percorrido  
 por uma corrente de um ampere, fica sujeito a uma for  
 ça de intensidade um newton.

Esta unidade recebe o nome weber/m = wb/m<sup>2</sup>



O sentido de  $\vec{F}$  é dado pela regra da mão esquerda de Fleming, conhecida por regra de "Bit"

$\vec{B}$  - polegar.  
 $i$  - indicador.  
 $\vec{F}$  - medio



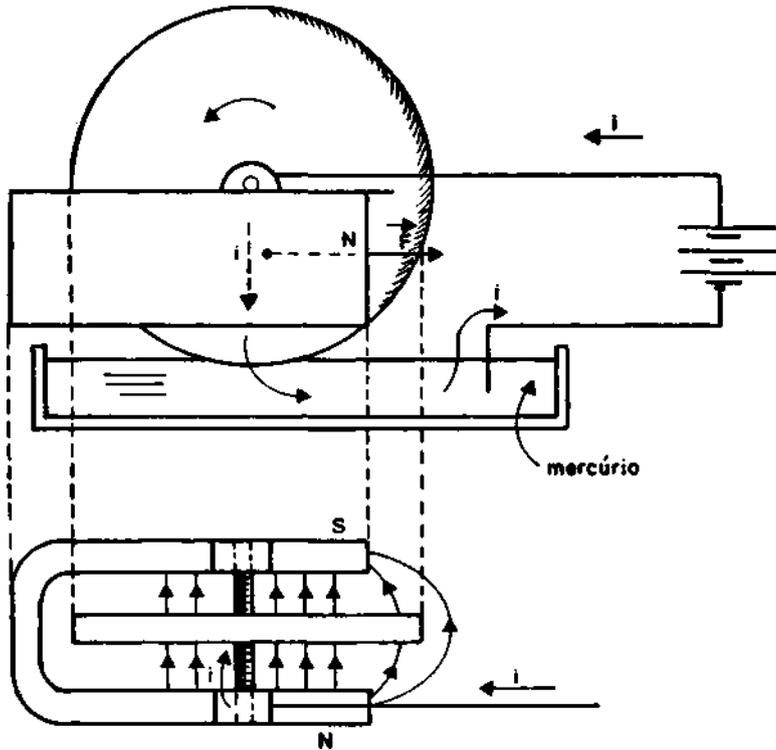
As aplicações praticas do segundo fenômeno se encontram muito bem apresentadas no livro de Gerhard Sengberg citado anteriormente.

#### APLICAÇÕES

##### a) Roda de Barlow

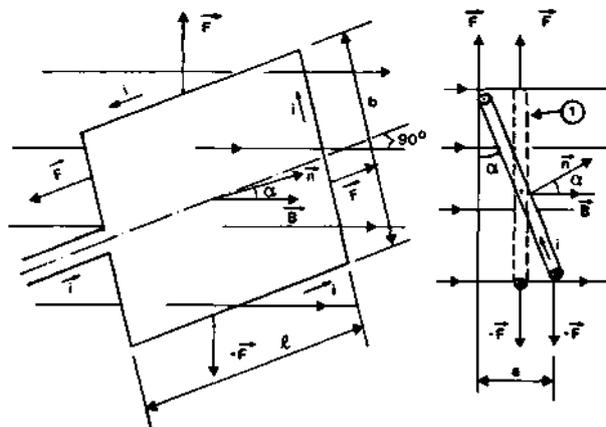
So tem interesse histórico, por ser o precursor do motor elétrico. Nesta aplicação, transforma-se energia elétrica em mecânica.

Analisando o esquema a seguir, percebe-se que sobre as correntes que descem ao longo da roda agem forças para a direita, cuja resultante não passa pelo eixo e cujo momento em relação ao eixo motiva a rotação da roda. O momento que se consegue, normalmente, é muito pequeno, mal dando para vencer os atritos.



b) Quadro móvel em campo magnético uniforme

Seja um fio condutor rígido com forma retangular. Admita-se que o conjunto possa girar em torno de um eixo que passe pelo centro do retângulo e que seja paralelo a um dos lados. A este conjunto denomina-se quadro móvel. Imagine este conjunto dentro de um campo magnético uniforme, cujas linhas de força são perpendiculares ao eixo do quadro.



Os lados do quadro paralelos ao eixo ficam sujeitos a forças de direção constante (perpendicular ao plano determinado pelo eixo e às linhas de força), sentido constante (para baixo, quando se tem  $\odot$ , e para cima quando se tem  $\ominus$ ) e intensidade também constante  $[|F| = |\vec{B}| i \ell, \text{ pois } \sin \theta = 1]$ .

Estas forças provocam um momento

$$C = |\vec{F}| a = |\vec{F}| b \sin \alpha = |\vec{B}| i \ell b \sin \alpha, \text{ portanto}$$

$$C = |\vec{B}| i S \sin \alpha, \text{ em que } S = \ell b \text{ é a área do quadro.}$$

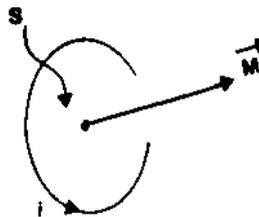
Na situação  $\textcircled{1}$ , atinge-se uma posição de equilíbrio estável, pois qualquer ligeiro deslocamento em relação a esta posição provocará o aparecimento de forças que fazem o quadro voltar à situação primitiva.

Há, ainda, outra posição de equilíbrio, que se obtém girando o quadro de  $180^\circ$  em relação à posição  $\textcircled{1}$ . Mas esta posição é de equilíbrio instável.

As forças que agem sobre os lados perpendiculares ao eixo são paralelas ao eixo e, portanto, não ajudam e nem atrapalham a rotação do quadro. O sentido e intensidade destas forças variam com o ângulo  $\alpha$ ; ora tracionam, ora comprimem o quadro. A intensidade desta força vale, notando que  $\theta = 90 \pm \alpha$ ,

$$|\vec{F}| = |\vec{B}| i b |\sin (90 \pm \alpha)| = |\vec{B}| i b |\cos \alpha|$$

Convém, a esta altura, definir uma grandeza que se relacione com qualquer espira, independentemente de sua forma, (circular, retangular, etc), e que permita o cálculo do conjugado que sobre ela atua. Dada uma espira plana de área  $S$ , percorrida por uma corrente  $i$ , define-se momento magnético desta espira ao vetor com as seguintes características:



- direção: perpendicular ao plano da espira
- **sentido:** associado ao da corrente na espira pela regra do saca-rolhas
- **módulo:**  $|\vec{M}| = \mu i S$ .

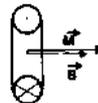
Em função deste vetor, o momento que age no quadro retangular anterior mede

$$C = |\vec{M}| |\vec{H}| \sin \alpha$$

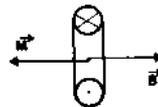
Podemos demonstrar que esta formula vale para qual quer espira. Lembre-se que formula análoga valia para um ímã, em forma de barra, de momento magnético M imerso num campo magnético.

Nota-se que as posições de equilíbrio ( $C = 0$ ) correspondem a  $\alpha = 0$  ou  $\alpha = 180^\circ$ . Analisando o caso do quadro retangular percebe-se que:

$\alpha = 0$  equilíbrio estável



$\alpha = 180^\circ$  equilíbrio instável



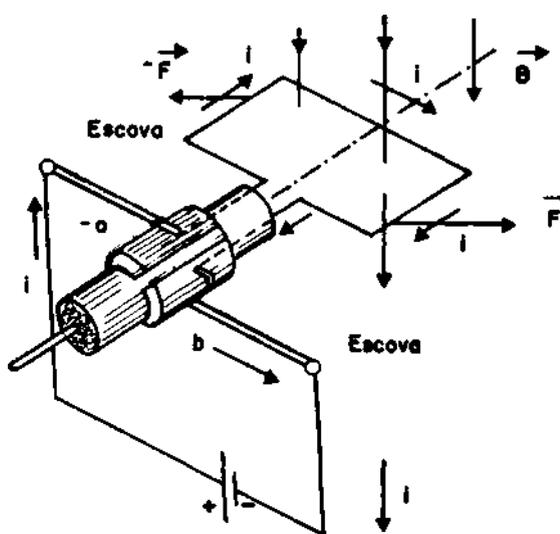
A tendência das espiras é atingir a situação em que  $\alpha = 0$  (equilíbrio estável).

### c) Motor elétrico de corrente contínua

O quadro móvel em campo magnético uniforme, assim como foi apresentado, não funciona como motor, pois admite uma posição final de equilíbrio estável. Pode-se, no entanto, fazer um artifício que o transforme num motor. Se, no instante em que o quadro atinge a posição de equilíbrio estável, se inverte o sentido da corrente elétrica no quadro, a posição passa a ser de equilíbrio instável. Como o quadro vem com certa velocidade, por inércia passa desta situação e, então, é levado a executar mais meia ro

tação para atingir a nova situação de equilíbrio estável. Lá chegando, nova inversão é operada e o fenômeno se repete. O quadro adquire movimento de rotação contínuo e, portanto, funciona como motor. A peça que executa esta comutação no sentido da corrente elétrica é denominada comutador.

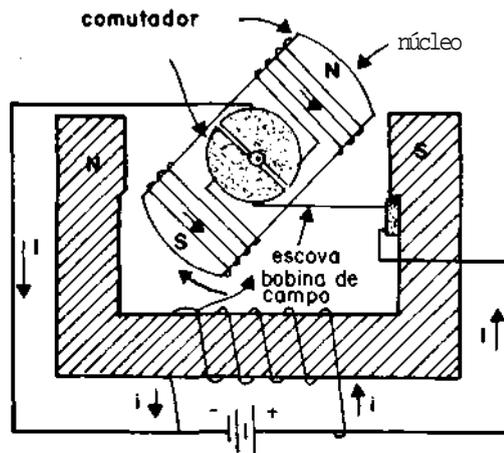
Até a posição de equilíbrio estável a corrente entra pela secção a do comutador. Neste instante se



processa a comutação e, em seguida, a corrente penetra pela secção b, o que implica numa inversão no sentido da corrente elétrica no quadro.

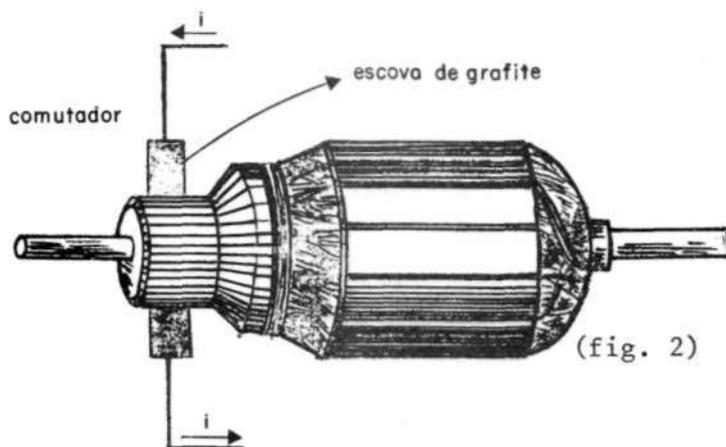
Consegue-se aumentar o conjugado usando-se um quadro com várias espiras e dotando-o de um núcleo de material ferromagnético. Este se magnetiza sob a ação da corrente no quadro e, assim, passam a ser dois os conjugados que agem sobre o quadro; um de origem eletromagnética, sobre os fios do quadro, e outro de origem magnética, sobre o núcleo imantado.

O motor ao lado apresentado, não tem um funcionamento satisfatório do ponto de vista técnico, porque:



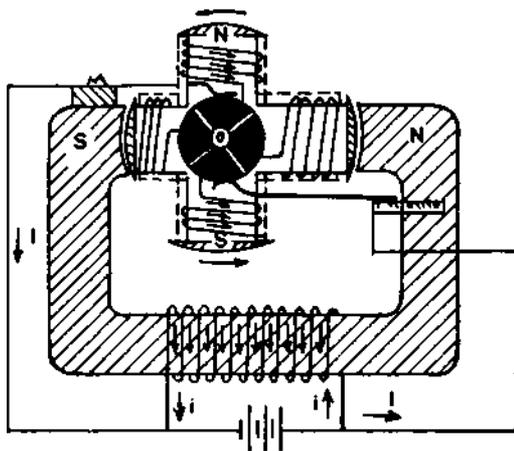
- Há dois "pontos mortos", que são as posições de equilíbrio (estável e instável), em que o motor não parte. Nesta situação, além disso, o gerador é curto - circuitado diretamente pelo comutador.
- O conjunto (binário) do motor varia muito com a posição do quadro, ocasionando muita trepidação do sistema.

Para superar estes inconvenientes pode-se usar o sistema abaixo representando. Ele apresenta um conjunto mais uniforme e não tem pontos "mortos". Dos quatro polos do motor, só dois funcionam por vez. (fig. 1)



(fig. 2)

Maior conjugado e maior uniformidade consegue-se com muitos quadros, alojados em ranhuras feitas em um núcleo cilíndrico de material ferromagnético. O comutador se torna mais complexo, porque existem muito mais secções. A figura da página anterior dá uma ideia do aspecto destes rotores, (fig. 2)



d) Galvanômetro de Quadro Móvel

É um aparelho que permite detectar e medir correntes contínuas de pequena intensidade. Substituir, hoje em dia, o galvanômetro do ímã móvel porque tem melhor precisão e maior sensibilidade. Sua melhor qualidade advém do fato de que o ímã é fixo e, por isto, pode ser maior e aproveitar melhor as vantagens dos ímãs permanentes modernos, num circuito magnético conveniente.

O núcleo cilíndrico de material ferromagnético tem por função completar o circuito magnético, aumentando o valor de B no entre-ferro. Desta maneira, consegue-se aumentar a sensibilidade do aparelho, pois, para uma mesma corrente, tem-se maior força e, portanto, maior rotação do quadro. O núcleo cilíndrico central permite ainda obter no entre-ferro um campo magnético praticamente radial e de intensidade constante.

Se o quadro móvel tiver comprimento  $l$ , largura  $b$ ,  $n$  espiras e for percorrido por corrente  $i$ , e, se o vetor indução magnética no entre-ferro tiver intensidade  $B$ , pode-se escrever:

$$|\vec{F}| = nB \cdot il = \text{força que age num lado do quadro.}$$

$$C = |\vec{F}| \cdot b = \text{conjugado que tende a girar o quadro.}$$

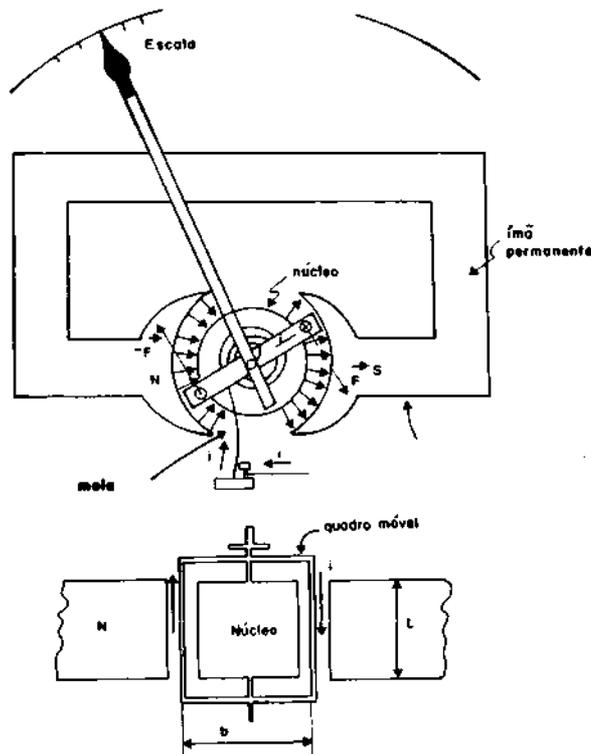
$$C = k\alpha = \text{conjugado de restauração da mola}$$

em que  $k$  = constante de Hooke da mola  
 $\alpha$  = rotação angular.

Na situação de equilíbrio  $C = C$  e, portanto,

$$\alpha = \frac{MB \cdot lb}{k} i \quad \therefore \quad \alpha = \frac{n B S}{k} i$$

ou  $\alpha = C^{te} \cdot i$

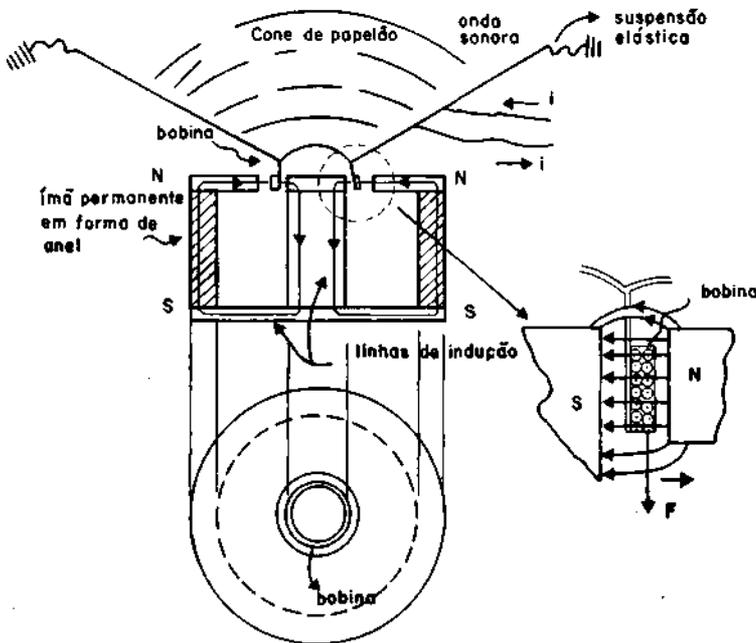


A deflecção do ponteiro é proporcional à corrente. **ANOTAÇÕES**  
 Isto proporciona uma escala linear para as correntes, isto é, com as divisões equiespeçadas.

Este galvanômetro não funciona em corrente alterna da porque o sentido da força muda com a inversão do sentido da corrente elétrica. O quadro e o ponteiro tenderiam a oscilar com frequência igual à da corrente elétrica. Esta, porém, é da ordem de grandeza de 60 C/S e, portanto, muito acima da frequência própria de oscilação do ponteiro. Este não consegue acompanhar o movimento vibratório e permanece indicando o valor médio que, para a corrente alternada é zero.

**e) Alto-falantes**

Constituem mais uma aplicação do segundo fenômeno eletromagnético. Um ímã permanente cria um campo magnético num entre-ferro. Neste encontra-se uma bobina percorrida por uma corrente variável. portadora

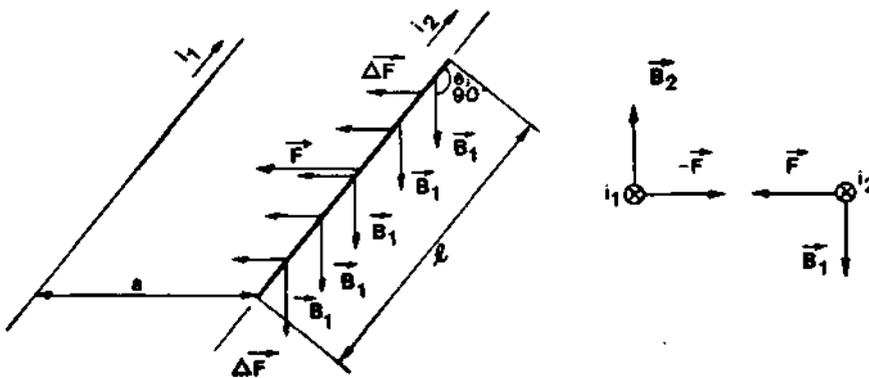


do sinal que se pretende transformar em som. Esta bobina fica sujeita a uma força  $|\vec{F}| = Bil$ , variável com  $i$ . Esta força desloca a bobina e o cone a ela acoplado, gerando assim uma onda sonora diante do cone. Como o movimento do cone é determinado pela força  $\vec{F}$ , e como esta, por sua vez, é proporcional a  $i$ , a onda sonora gerada é uma reprodução da corrente elétrica  $i$ .

### INTERAÇÃO ENTRE CORRENTES ELÉTRICAS

Na eletrostática vimos que cargas elétricas em repouso interagem com forças de atração ou repulsão. No magnetismo notou-se propriedade análoga para as massas magnéticas. No presente parágrafo será evidenciado que correntes elétricas também interagem, como consequência do primeiro e segundo fenômeno eletromagnético.

Seja dois condutores retilíneos, bastante longos, paralelos e percorridos por correntes  $i_1$  e  $i_2$ , de mesmo sentido,



a corrente  $i_1$  produz nos pontos em que está o segundo condutor um campo magnético

$$|\vec{H}_1| = \frac{i_1}{2\pi a} \quad (\text{lei de Biot e Savart})$$

O vetor indução magnética  $\vec{B}_1 = \mu \vec{H}_1$  sobre corrente  $i_2$  originará, num trecho  $t$ , uma força

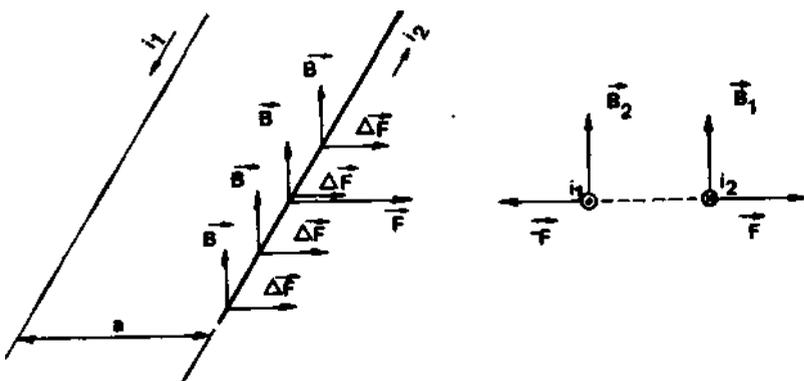
$$|\vec{F}| = |\vec{B}_1| i_2 l \text{ sen } 90^\circ$$

ou seja:

$$|\vec{F}| = \frac{\mu}{2\pi} \frac{i_1 i_2}{a}$$

Repetindo raciocínio análogo para o primeiro condutor, conclui-se que, sobre um trecho do mesmo, age uma força igual em intensidade e de sentido oposto, como permitiria prever o Princípio da Ação e Reação.

Invertendo-se o sentido de qualquer uma das correntes, a força de interação também muda de sentido, como pode ser visto pelo esquema seguinte.



Em resumo, pode-se afirmar:

"Correntes elétricas paralelas **de mesmo sentido** se **atraem** e de sentidos **contrários** se **repelem**".

## UNIDADE DE INTENSIDADE DE CORRENTE ELÉTRICA

A unidade de intensidade de corrente elétrica é fundamental no sistema MKSA. O ampere é definido por uma experiência sugerida pela fórmula

$$|\vec{F}| = \frac{\mu}{2\pi} \frac{i_1 i_2}{a} \quad 1$$

"Corrente de um ampere é aquela que - diante de uma igual, ambas percorrendo, com igual sentido, condutores paralelos de comprimento infinito, afastados de um metro, no vácuo - ocasiona forças de atração de  $2 \times 10^{-7}$  N, para cada metro do condutor".

A dificuldade de realizar a experiência acima descrita levou à definição do ampere por outro método baseado numa experiência de eletrólise de nitrato de prata. Para distinguir os dois, o primeiro é chamado Ampere absoluto e o segundo Ampere internacional. Em princípio eram iguais, mas com a evolução da técnica das medidas foi possível evidenciar diferenças entre as duas unidades. Na engenharia normalmente não é necessário distinguir as duas unidades.

Pela maneira como se definiu a unidade ampere Conclui-se que a permeabilidade magnética do vácuo vale.

$$\mu_0 = \frac{2\pi \times 2 \cdot 10^{-7} \text{ N} \times 1\text{m}}{1 \text{ A} \times 1 \text{ A} \times 1\text{m}}, \text{ portanto,}$$

$$\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7} \text{ N/A}^2$$

como, aliás, já se concluiu anteriormente, a partir da equação de concatenação  $\epsilon_0 \times \mu_0 \times C^2 = 1$

#### FORÇA SOBRE CARGAS IMERSAS NUM CAMPO MAGNÉTICO

Cargas em repouso não sofrem ação nenhuma de um campo magnético. Quando, no entanto, são postas em movimento, elas constituem correntes elétricas e, então, o campo magnético agirá sobre elas.

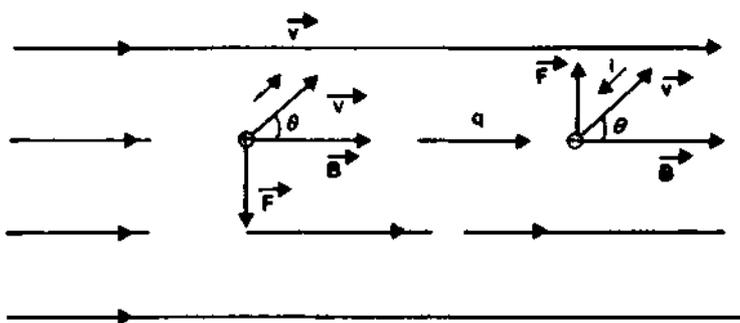
A intensidade da força que atua sobre uma carga  $q$ , dotada de velocidade  $\vec{v}$ , num campo de indução mag

nética B é dada pela fórmula de Lorentz .

## ANOTAÇÕES

$$|\vec{F}| = B v q \cdot \text{sen } \theta$$

- a direção da força é perpendicular ao plano determinado pelos vetores  $\vec{v}$  e  $\vec{B}$ .
- sentido é dado pela regra do "B i" da mão esquerda, lembrando que:
  - a) se a carga q for positiva, o sentido de movimento é o da corrente convencional.
  - b) se a carga q for negativa, o sentido de movimento é oposto ao da corrente convencional.



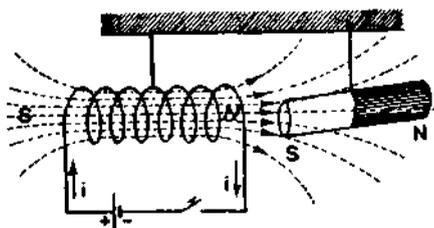
A fórmula de Lorentz é de grande utilidade nos problemas de balística de partículas carregadas. Estes problemas existem nos aceleradores de partículas (Betatron e cicloton), nas válvulas eletrônicas para televisão (orthicon, cinescópio, etc) e em válvulas eletrônicas especiais (magnetron, etc) e ainda em vídeos e terminais de microcomputadores.

Outras interações podem ser apresentadas para tornar evidente o 2º fenômeno do eletromagnetismo e induzir outros exemplos aplicativos tais como:

### AÇÃO MÚTUA ENTRE CORRENTES E ÍMÃS

Uma corrente elétrica produz um campo magnético

tico; então, um ímã, colocado próximo da corrente, fica sujeito a forças (1º fenômeno eletromagnético). Mas o ímã também produz um campo magnético; então uma corrente elétrica, colocada próxima do ímã fica sujeita a forças (2º fenômeno eletromagnético).



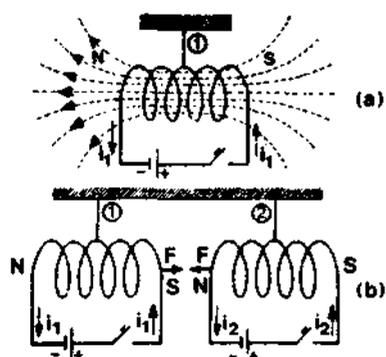
Para demonstrar a ação mútua de correntes e ímãs, podemos realizar a experiência sugerida na figura. Um solenóide, ligado em série com um gerador e um interruptor é suspenso pelo centro de gravidade, para que possa oscilar e transladar-se um pouco. Um ímã, também é suspenso pelo centro de gravidade próximo do solenóide. Mantendo-se o solenóide fixo, e fechando-se o interruptor, forma-se o campo magnético do solenóide, e observa-se nitidamente um deslocamento do ímã. Mantendo-se o ímã fixo, e fechando-se o interruptor, nota-se nitidamente um deslocamento do solenóide. E, deixando-se os dois livres, ao fechar-se o interruptor se observa nitidamente deslocamentos dos dois. Podemos também observar que polos de mesmo nome do solenóide e do ímã se repelem, e os de nomes contrários se atraem, analogamente aos polos de dois ímãs.

#### AÇÃO MÚTUA ENTRE CORRENTES

Duas correntes elétricas próximas exercem forças entre si. Isto porque, cada uma delas produz um campo magnético (1º fenômeno eletromagnético); e a outra, estando colocada nesse campo magnético, fica sujeita a

forças (2º fenômeno eletromagnético).

ANOTAÇÕES



Podemos demonstrar a ação mutua entre correntes com a experiência da figura acima. Dois solenóides são suspensos pelos centros de gravidade, cada um deles ligado a um gerador e um interruptor. Quando fechamos os interruptores, cada uma das correntes produz um campo magnético como o que está indicado na figura a. A corrente  $i_2$ , estando no campo magnético da corrente  $i_1$ , fica sujeita a uma força; a corrente  $i_1$ , estando no campo magnético da corrente  $i_2$ , fica sujeita a uma força. Observamos então o seguinte: mantendo o solenóide (1) fixo, no instante em que fechamos os interruptores o solenóide (2) se desloca; mantendo o solenóide (2) fixo, no instante em que fechamos os interruptores o solenóide (1) se desloca; deixando os dois livres, ambos se deslocam.

Se considerarmos os polos do solenóide, constatamos que eles se comportam do mesmo modo que os polos dos ímãs: os de nomes contrários se atraem, e os de mesmo nome se repelem.

## TERCEIRO FENÔMENO ELETROMAGNÉTICO

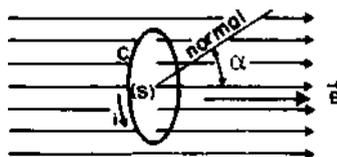
ANOTAÇÕES

(INDUÇÃO ELETROMAGNÉTICA)

Prosseguindo o estudo de eletromagnetismo, analisaremos que em um condutor fechado, colocado imerso em um campo magnético com fluxo variável, aparece uma corrente elétrica.

Para tanto define-se fluxo magnético, totalmente análogo ao fluxo elétrico, como segue, da forma proposta por Salmeron.

Suponhamos um condutor fechado colocado num campo magnético. Para simplicidade, imaginemos o campo uniforme da figura. Seja  $S$  a área da superfície determinada pelo condutor;  $\alpha$  o ângulo formado pela normal a essa superfície com as linhas de força;  $\vec{B}$  a indução magnética. O fluxo magnético através da superfície  $S$  é:



$$\Phi = |\vec{B}| \cdot S \cdot \cos \alpha$$

A experiência nos mostra o seguinte: se por um processo qualquer variar o fluxo  $\Phi$ , como consequência aparecerá no condutor uma corrente elétrica. Esse fenômeno é chamado indução eletromagnética. A corrente  $i$  que aparece é chamada corrente induzida.

Portanto, chama-se indução eletromagnética ao fenômeno pelo qual aparece corrente elétrica num coti

ductor, quando ele é colocado num campo magnético e o fluxo que o atravessa **varia**. **ANOTAÇÕES**

É importante notar que a causa da indução eletromagnética é a **variação** do fluxo. Se o fluxo permanecer constante e não variar, então a corrente elétrica desaparecera.

### **Variação do Fluxo**

- A variação do fluxo pode ser obtida ou por uma variação da indução  $B$ , ou por uma variação da área  $S$ , ou por uma variação de  $\cos \alpha$ . Na prática, o que se faz, quase sempre, é variar o  $\cos \alpha$ , pois para isso basta girar o condutor dentro do campo magnético. Nesse caso a variação do fluxo é igual aquela descrita no capítulo anterior.

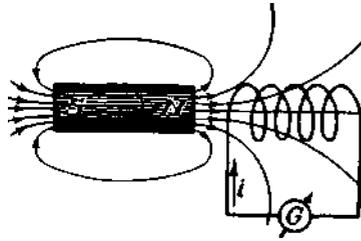
*Recorde este ponto, porque ele é importante para a compreensão deste conteúdo.*

### **EXEMPLOS DE INDUÇÃO ELETROMAGNÉTICA**

A indução eletromagnética existe todas as vezes que varia o fluxo magnético que atravessa um condutor. Na prática essa variação do fluxo é obtida por vários processos. Veremos alguns exemplos.

#### **1. Indução numa bobina com deslocamento de ímã**

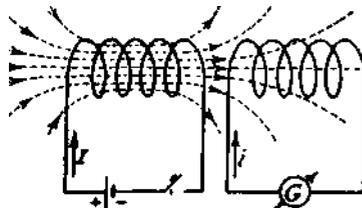
Suponhamos uma bobina cujos extremos sejam ligados a um galvanômetro. Aproximando-se ou introduzindo-se na bobina um ímã, ela estará numa região onde existe um campo magnético. Deslocando-se o ímã, o fluxo magnético que atravessa as espiras da bobina varia. A variação do fluxo provoca o aparecimento de uma corrente elétrica acusada pelo galvanômetro.



A causa da indução é a variação do fluxo magnético. Por isso, o que interessa é um movimento relativo ao ímã em relação à bobina, é indiferente manter-se a bobina fixa e deslocar-se o ímã, ou manter-se o ímã fixo e deslocar-se a bobina.

2. Indução numa bobina produzida por outra bobina

Em vez de se produzir o campo magnético com um ímã, pode-se produzi-lo com uma bobina, como indica a figura abaixo. Liga-se uma bobina a um gerador, que fornece corrente  $I$ . Essa corrente produz o campo magnético. Uma segunda bobina é ligada a um galvanômetro  $G$ . Deslocando-se qualquer das bobinas em relação à outra, haverá variação do fluxo magnético nessa segunda bobina e, conseqüentemente, indução eletromagnética: o galvanômetro acusa a passagem de uma corrente  $i$ .

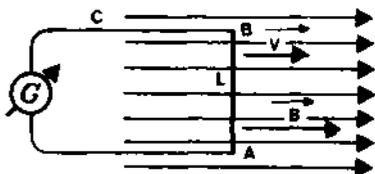


A figura é uma fotografia de um conjunto de duas bobinas especialmente preparadas para demonstrar a existência da indução eletromagnética. Os dois fios ligados à maior vão ter a um gerador. Essa bobina produz o campo magnético. A menor, colocada no inte\_

rior da maior, é ligada a um galvanômetro pelos dois fios que saem dela. Deslocando-se a menor, ela sofre indução eletromagnética, registrada pelo galvanômetro.

### 3. Indução num condutor retilíneo movendo-se em campo uniforme

Quando um condutor retilíneo AB se desloca em um campo magnético uniforme, aparece uma f.e.m. induzida nesse condutor. Para comprovar o aparecimento dessa f.e.m., basta ligar os extremos desse condutor com um galvanômetro. Quando um condutor retilíneo se desloca, o galvanômetro indica a passagem de uma corrente elétrica.



Pode-se demonstrar que a f.e.m. induzida é proporcional ao comprimento  $l$  do condutor, à sua velocidade  $\vec{v}$  e à indução  $\vec{B}$  do campo magnético.

#### UNIDADES

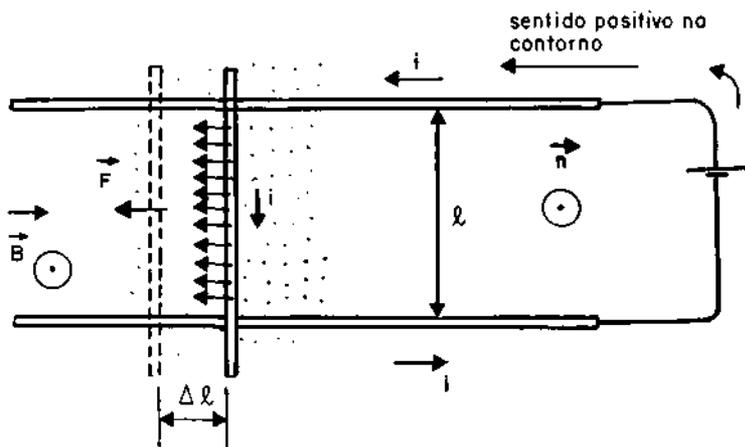
##### Sistema MKSA

Fluxo unitário é o que atravessa sua superfície plana de área  $S = 1\text{m}$  disposta perpendicularmente às linhas de indução de um campo uniforme de indução

$$|\vec{B}| = 1 \text{ Wb/m}^2$$

Esta unidade recebe o nome de **weber (Wb)**.

Seja um sistema constituído por duas barras condutoras paralelas sobre as quais desliza uma terceira, conforme a figura abaixo



este conjunto supõe-se num plano perpendicular às linhas de força de um campo uniforme de indução  $\vec{B}$ . Seja o fluxo total concatenado com o circuito, sobre o condutor deslizante age uma força para a esquerda, de intensidade  $|\vec{F}| = |\vec{B}| i l$ . Num intervalo de tempo  $\Delta t$ , executou-se um trabalho

$$\Delta \zeta = |\vec{F}| \Delta l = |\vec{B}| i l \Delta l = |\vec{B}| \Delta S i$$

$$\Delta \zeta = \Delta \Phi \cdot i$$

O trabalho fornecido pelo sistema é o produto da corrente  $i$ , suposta constante, pelo aumento do fluxo.

O trabalho realizado pela força eletromagnética tem que ser fornecido por "alguém", tendo em vista o princípio da conservação da energia. Este doador de trabalho só pode ser o gerador. Como este fornece energia elétrica ao circuito, Conclui-se que houve uma

conversão de energia da forma elétrica para a mecânica. Toda vez que há conversão eletro-mecânica de energia fala-se em força-eleto-motriz (f.e.m.) ou em força-contra-eleto-motriz, (f.c.e.m.). Define-se, f.e.c.m. pela expressão:

ANOTAÇÕES

$$\frac{\text{potência transf.da forma elét. p/mecânica}}{\text{corrente que atravessa o receptor}} = \frac{P}{i}$$

$$\text{no caso, } P = \frac{\Delta \zeta_{\text{mec}}}{\Delta t} = \frac{\Delta \phi \cdot i}{\Delta t}$$

fazendo-se a passagem ao limite, para  $\Delta t$  tendendo a zero, tem-se:

$$P = i \frac{d\phi}{dt}$$

substituindo-se na definição de f.c.e.m., resulta

$$e = \frac{i \frac{d\phi}{dt}}{i} \therefore e = \frac{d\phi}{dt}$$

Notar que uma f.c.e.m. é uma f.e.m. que se opõe ao sentido da corrente.

#### LEIS DA INDUÇÃO ELETROMAGNÉTICA

Já vimos que o segundo fenômeno eletromagnético é uma Consequência do primeiro fenômeno eletromagnético e do princípio da ação e reação. No parágrafo anterior evidenciou-se que, como Consequência do segundo fenômeno eletromagnético e do princípio da conservação da energia, uma variação de fluxo concatenado com um circuito elétrico nele induz força eletro-motriz (terceiro fenômeno eletromagnético). Conclui-se, então, que os três fenômenos eletromagnéticos estão interliga

dos; admitido qualquer um deles, concluem-se os outros, **ANOTAÇÕES**

Embora o estudo teórico do parágrafo anterior tenha sido feito para um circuito muito particular, a experiência confirma o resultado para qualquer que seja a forma do circuito e para qualquer que seja o método usado para variar o fluxo magnético. Neste sentido, costuma-se separar as f.e.m. induzidas nos circuitos em duas classes:

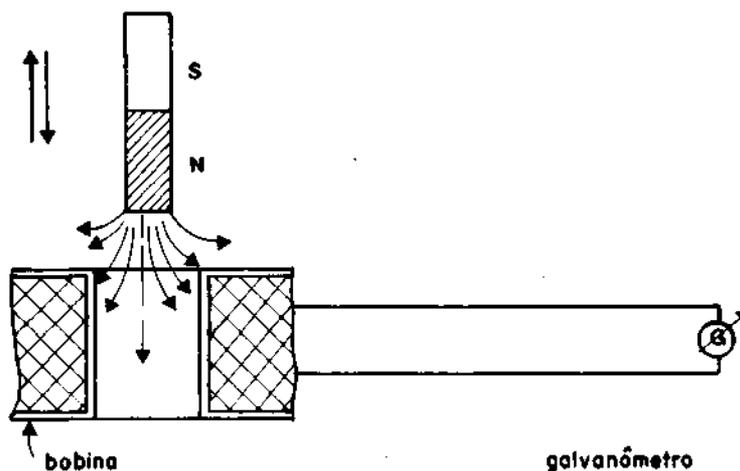
a) **f.e.m. mocional**

Quando a variação de fluxo é causada por movimento ou deformação do circuito. Exemplos: o sistema do parágrafo anterior, quadro móvel em rotação num campo magnético uniforme, dínamos, etc.

b) **f.e.m. variacional**

Quando a variação de fluxo é causada por variação do vetor indução magnética  $\vec{B}$  - Exemplos: experiência descrita a seguir, alteradores grandes, transformadores, etc.

Uma experiência básica que evidencia o fenômeno da indução é a que representa o esquema abaixo.



Um movimento alternativo do ímã permanente ocasiona deflexões no ponteiro do galvanômetro. Isto indica o aparecimento de uma f.e.m. na bobina. Podem ser feitas as seguintes observações experimentais:

- a) So há corrente (e, portanto, f.e.m.) quando varia a posição relativa bobina-ímã. O efeito existe tanto no caso de ser fixa a bobina e o ímã móvel (f.e.m. variacional), como quando o ímã é fixo e a bobina e deslocada (f.e.m. mocional).

Conclusão: a f.e.m. não é causada pelo fluxo, mas pela variação do fluxo magnético concatenado pelo circuito.

- b) Os sentidos das correntes elétricas são opostas quando da aproximação e do afastamento do ímã.

Conclusão: o sentido da f.e.m. está ligado ao modo (aumentar ou diminuir) de variar do fluxo.

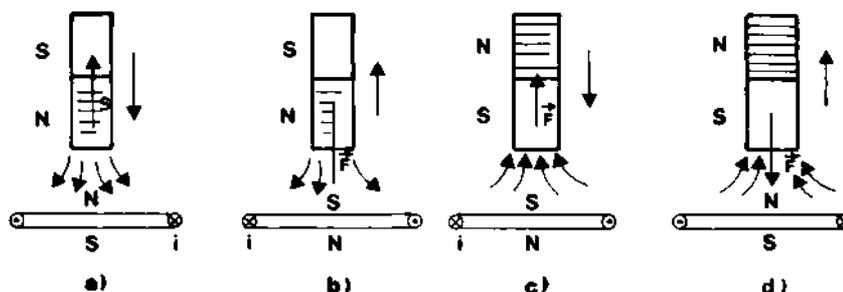
- c) Quando a variação é rápida a deflexão é mais intensa.

Conclusão: a f.e.m. depende da velocidade de variação do fluxo.

- d) Se o ímã for substituído por outra bobina, percorrida por uma corrente, obtém-se os mesmos efeitos, quer aproximando-a ou afastando-a, quer variando a corrente.

Conclusão: Não interessa a origem do campo magnético. Basta haver variação de fluxo magnético, para se ter uma f.e.m. induzida.

Esta lei regulamenta o sentido da f.e.m. induzida. Ela pode ser obtida por análise cuidadosa da experiência anterior. Anotam-se os sentidos das correntes elétricas induzidas para cada movimento do ímã, bem como o sentido de enrolamento do fio na bobina. O resultado pode ser sumarizado nos esquemas abaixo onde se indicam sentido de movimento do ímã e corrente induzida no circuito.



Por estes esquemas percebe-se que a corrente induzida tem sentido tal que origina uma reação que tende a manter o sistema no estado primitivo.

#### LEI DE FARADAY-NEUMANN

Esta lei fornece o valor da f.e.m. induzida. Experiências quantitativas evidenciam que a f.e.m. é dada pela derivada do fluxo em relação ao tempo, ou seja:

$$e = \frac{d\phi}{dt}$$

Esta expressão está de acordo com as conclusões a e c referentes às experiências citadas. De fato, se  $\phi = cte$ , tem-se  $e = 0$  [so há f.e.m, quando há variação de fluxo (a)] e, quanto mais rápida a variação do

fluxo, maior é

ANOTAÇÕES

$$e = \frac{d\phi}{dt} \quad (c)$$

Unindo-se a lei de Lenz, que dá o sentido da f.e.m. induzida com a lei de Faraday e Neumann, que dá o seu módulo, obtém-se a fórmula que traduz a indução eletromagnética:

$$e = - \frac{d\phi}{dt}$$

O sinal - é devido a lei de Lenz e pressupõe que sentido positivo de percurso no circuito e sentido da normal estejam relacionados pela regra do saca-ro-lhas. A justificação do sinal - encontra-se no quadro anterior (lei de Lenz).

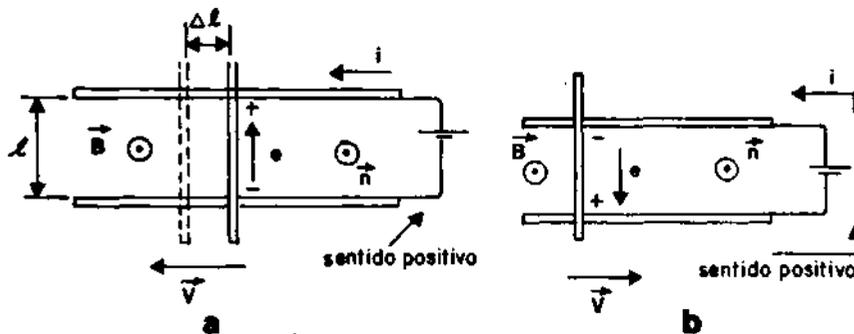
A fórmula acima evidencia que não pode haver variações instantâneas do fluxo concatenado com um circuito, pois isto significa em f.e.m. induzida de valor infinito. Em mecânica, tem-se situação análoga na fórmula

$$\gamma = \frac{dv}{dt}$$

Um corpo não pode variar bruscamente de velocidade, pois representa aceleração infinita e isto requer força infinita ( $\vec{F} = m\vec{\gamma}$ ). Assim, a velocidade é uma função contínua em virtude da inércia (massa) dos sistemas mecânicos. Da mesma maneira, em eletricidade o fluxo magnético é uma função contínua do tempo e, assim, introduz uma inércia elétrica nos circuitos.

Note-se que esta formula coincide integralmente com a que se demonstrou no estudo do trabalho em campo magnético, a partir do principio da conservação da energia para um caso particular.

Retomando-se àquele sistema: com um **Condutor retilíneo num campo magnético uniforme** temos:



Surge no circuito uma f.e.m. induzida, dada pela fórmula

$$e = - \frac{d\phi}{dt}$$

Se o condutor desliza com velocidade  $v$  tem-se para  $\Delta t$  um tempo  $\Delta t$

a)  $\Delta\phi = + \ell \Delta\ell |\vec{B}|$ , portanto

$$e = - \frac{\ell \Delta\ell \cdot |\vec{B}|}{\Delta t} \left[ e = - \ell |\vec{v}| |\vec{B}| \right]$$

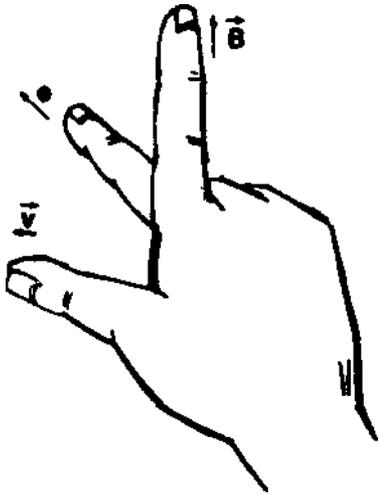
b)  $\Delta\phi = - \ell \Delta\ell |\vec{B}|$ , portanto

$$e = \frac{\ell \Delta\ell |\vec{B}|}{\Delta t} \left[ e = \ell |\vec{v}| |\vec{B}| \right]$$

Pode-se abstrair a polaridade da f.e.m., es crevendo a fórmula

$$e = |\vec{B}| \ell |\vec{v}|$$

O sentido da f.e.m. pode ser dado pela **regra de Fleming**, da mão direita. Dispõe-se o polegar indicador e dedo médio da mão direita formando um triedro tri-retângulo, como indica a figura.

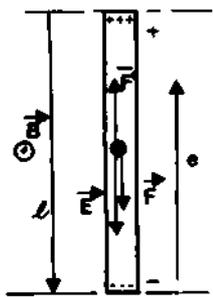


O dedo médio indica o sentido da f.e.m.

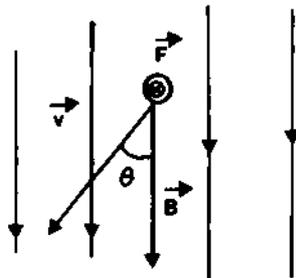
*Convém que os alunos apliquem a regra aos esquemas a e b.*

A fórmula anterior vale mesmo que não exista o circuito representado; basta que o condutor se mova de maneira que corte as linhas de força do campo magnético.

Seja um condutor retilíneo, de comprimento  $l$ , movendo-se com velocidade  $\vec{v}$ , dentro de um campo uniforme de indução  $\vec{B}$ , formando um ângulo  $\theta$  os vetores  $\vec{B}$  e  $\vec{v}$



projeção vertical



projeção horizontal

qualquer elétron livre do fio condutor ficará sujeito à força de Lorentz ( $\vec{F}$ ), para baixo. Como isto surge uma ligeira carga negativa, na extremidade inferior do fio, e uma positiva, na outra extremidade. Se cessa o movimento quando o campo elétrico, que aparece no fio, de cima para baixo, originar sobre os demais elétrons livres uma força  $\vec{F}$  que neutralize a força  $\vec{F}$ . Nesta situação a tensão que existe entre os dois extremos do fio ( $\Delta V$ ), que é a f.e.m. induzida no fio ( $e$ ), vale

$$e = |\vec{E}| \ell \quad (\text{fórmula } |\vec{E}| = \frac{\Delta V}{\Delta \ell})$$

$$|\vec{F}| = |q| |\vec{v}| |\vec{B}| \sin \theta. \quad \text{Fórmula de Lorentz}$$

(q = carga do elétron).

$$|\vec{F}| = |\vec{E}| |q| \quad (\text{da Eletrostática})$$

como se deve ter  $|\vec{F}| = |\vec{F}|$ , Conclui-se

$$|\vec{E}| = |\vec{v}| |\vec{B}| \sin$$

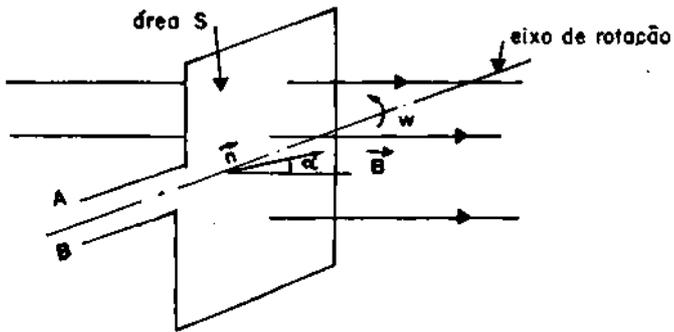
Substituindo na formula da f.e.m, induzida

$$e = |\vec{B}| \ell |\vec{v}| \sin \theta$$

Percebe-se que a f.e.m. induzida varia com  $\theta$ . Para se ter um máximo deve-se ter  $\theta = 90^\circ$ , ou seja, o condutor deve deslocar-se perpendicularmente às linhas de força do campo magnético.

Para a polaridade da f.e.m., usa-se a regra de Fleming da mão direita.

No caso de quadro girando em campo magnético uniforme temos a considerar que evidentemente deve existir uma maquina capaz de fornecer o trabalho mecânico necessário para manter o quadro em rotação. Seja  $S$  a área do quadro e possua ele um movimento de rotação com velocidade angular  $\omega$ , então



$$\phi = |\vec{B}| \cdot S \cos \alpha$$

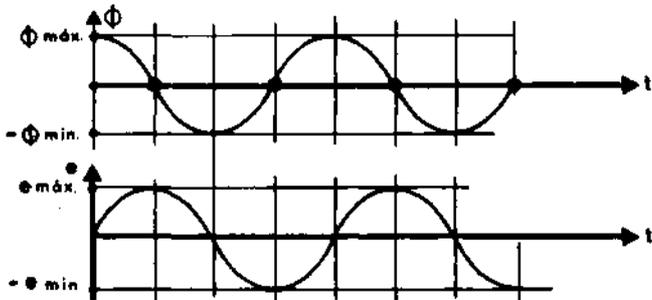
mas  $\alpha = \omega t$

$$\left\{ \begin{aligned} \phi &= |\vec{B}| S \cos \omega t \end{aligned} \right.$$

Surgirá entre os terminais A e B uma tensão que é igual à f.e.m. induzida no quadro e que, portanto, mede:

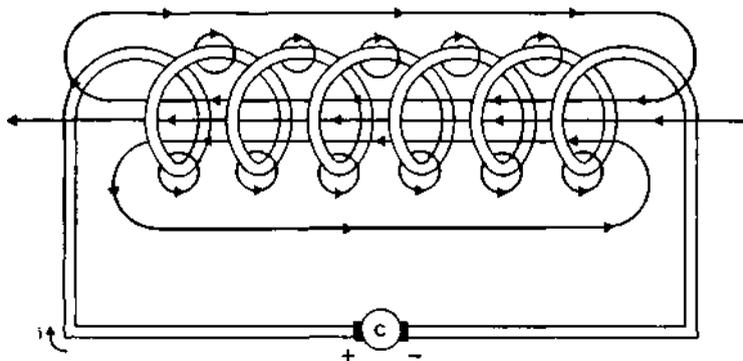
$$e = \frac{d\phi}{dt} = |\vec{B}| S \frac{d \cos \omega t}{dt}$$

$$e = |\vec{B}| \times S \cdot \omega \cdot \sin \omega t$$



Uma tensão como esta é dita tensão alternada. Um quadro retangular em movimento de rotação uniforme imerso num campo magnético uniforme pode funcionar como um gerador de corrente alternada desde que se adaptem terminais convenientes (anéis coletores) que permitam a retirada ou saída da corrente elétrica.

Seja um circuito percorrido por uma corrente



de intensidade  $i$ : esta corrente cria um campo magnético cujas linhas de força são linhas fechadas que se concatenam com o circuito.

Seja  $\Phi$  o fluxo magnético concatenado com o circuito. Este fluxo é diretamente proporcional à corrente  $i$ . De fato, duplicando a corrente  $i$ , o vetor campo magnético  $H$  em qualquer ponto também duplicará, pois  $\vec{H} = \Sigma \Delta \vec{H}$  e

$$|\Delta \vec{H}| = \frac{i \Delta \ell \text{ sen } \theta}{r^2}$$

o mesmo se dando com o vetor  $\vec{B} = \mu \vec{H}$  e com o fluxo  $\Phi = \Sigma \Delta \Phi = \Sigma |\vec{B}| \Delta S \cos \alpha$

Uma outra maneira de se expressar o mesmo fato é constatar que a relação entre o fluxo concatenado com um circuito, causado pela corrente  $i$  que nele circula, e esta corrente é uma constante do circuito. Este parâmetro característico do circuito denomina-se **auto-indutância** ou, simplesmente, indutância do circuito e representa-se por  $L$

$$L = \frac{\Phi}{i}$$

É fácil perceber que a indutância do circuito é alta para circuitos que contêm bobinas, principalmente quando estas têm muitas espiras. Neste caso, tem-se intensos campo magnéticos e grande área (aproximadamente  $n$  vezes a área de uma espira, sendo  $n$  o número de espiras), ambos os fatores favoráveis para se obter um fluxo intenso. Outro modo de se aumentar a indutância é inserindo um núcleo de ferro na bobina. Com isto o campo magnético, para uma determinada corrente  $i$ , não muda mas aumenta bastante o vetor indução magnética, pois  $\vec{H} = \mu\vec{H}$ , e também o fluxo magnético e, portanto, a indutância. Concluindo, têm alta indutância as bobinas de muitas espiras com núcleo de material ferromagnético.

Mesmo que o circuito não tenha bobina alguma, tem-se a ele associado uma indutância, normalmente pequena, pois o próprio circuito constitui uma espira, atravessada por fluxo.

#### UNIDADE

##### Sistema MRSA

Tem uma indutância unitária o circuito que, percorrido por uma corrente de um ampere, é concatenado por um fluxo de um weber. Esta unidade recebe o nome henry.

$$1 \text{ H} = 1 \text{ wb/A}$$

Sejam duas bobinas: quando pela primeira passa uma corrente  $i_1$ , cria-se um campo magnético que ocasiona um fluxo  $\Phi_1$ , através da primeira bobina, e um fluxo  $\Phi_2$ , através da segunda. A relação

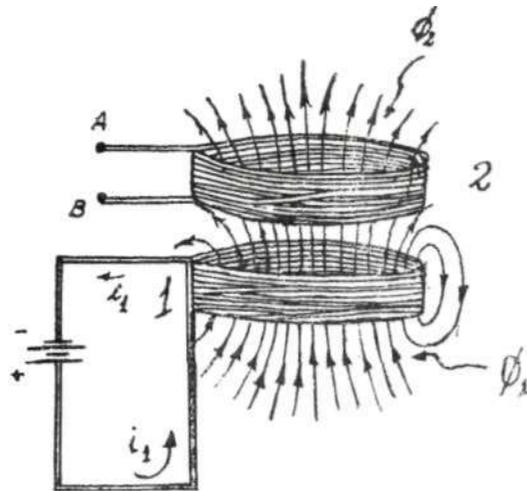
$$L_1 = \frac{\Phi_1}{i_1}$$

definiu-se como sendo a indutância da bobina 1. Com raciocínio semelhante ao utilizado naquela ocasião, para mostrar que  $\Phi_1$  é proporcional a  $i_1$ , pode-se concluir que  $\Phi_2$  é proporcional a  $i_1$ , ou seja, é constante a relação

$$M = \frac{\Phi_2}{i_1}$$

M é denominado **mútua indutância** entre as duas bobinas.

A mútua indutância entre as duas bobinas depende do número de espiras da bobina 2,  $n_2$ , do número de espiras da bobina 1,  $n_1$ , (isto porque o vetor B é tanto mais intenso quanto maior n) e da geometria e



da posição relativa das bobinas. Pode-se aumentar a mútua indutância com um núcleo de ferro que seja comum a ambas as bobinas.

A mútua indutância é uma grandeza que mede o acoplamento magnético existente entre duas bobinas ou entre dois circuitos.

Enquanto a corrente na bobina 1 for constante,  $\Phi_2$  é também constante e não há f.e.m, induzida na

bobina 2. No entanto, se a corrente na bobina 1 for variável, aparecerá uma tensão entre A e B, igual à f.e.m. induzida na bobina 2, de valor

## ANOTAÇÕES

$$U_{AB} = e_2 = - \frac{d \phi_2}{d t} = - M \frac{d i_1}{d t}$$

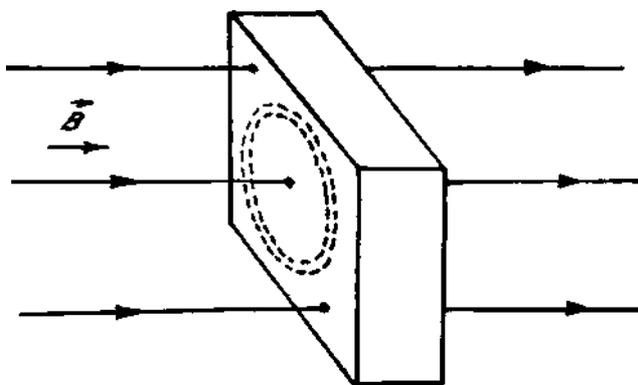
Caso se ligue um circuito entre A e B, este será alimentado pela bobina 2. Note-se que a energia é fornecida pelo gerador que alimenta a bobina 1 e que se tem transferência de energia elétrica de um para outro circuito sem que haja contato elétrico. A transferência de energia se faz graças ao acoplamento magnético entre circuitos.

Da mesma forma que no estudo anterior, várias aplicações a nível de laboratório são propostas concretamente por Gerhard, conforme segue:

## APLICAÇÕES

### a) Correntes de Foucault

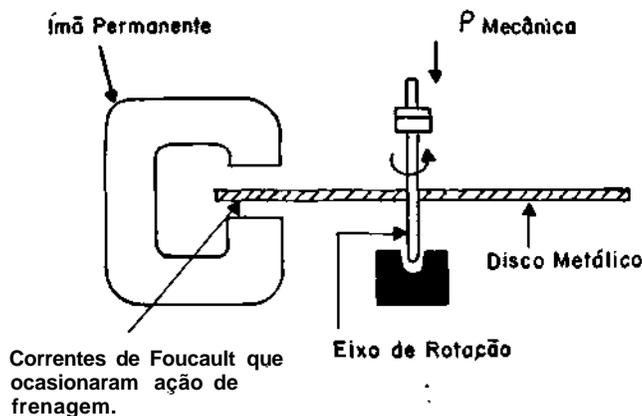
Seja uma peça metálica maciça colocada num campo magnético, conforme indica a figura abaixo.



Se o campo magnético for variável, surgirão no material condutor correntes elétricas turbilhonares denominadas correntes de Foucault. A explicação do aparecimento destas correntes é dada da maneira es^

pecificada a seguir. Podem-se imaginar coroas do material condutor que funcionam como espiras. A variação do fluxo do vetor indução através destas "espiras" nelas induz uma f.e.m. que causa a corrente elétrica turbilhonar. Estas correntes de Foucault podem percorrer trajetórias as mais variadas mas, quaisquer que sejam, sempre implicam numa dissipação de potência elétrica que é transformada em calor, pelo efeito joule.

O mesmo efeito ocorre, evidentemente, quando, em lugar de manter fixa a peça metálica e variar o campo magnético, se mantém o campo magnético constante e a peça metálica é posta em movimento, pois assim também o fluxo magnético, através das fictícias espiras, é variado. A energia elétrica dissipada por efeito Joule requer um fornecimento equivalente de energia mecânica no eixo do disco. Isto equivale a uma ação de frenagem, no disco, a frenagem eletromagnética, por meio das correntes de Foucault, apresenta algumas características interessantes como:



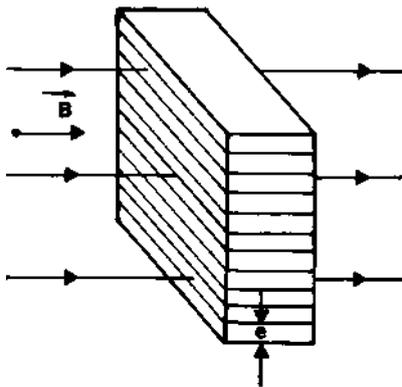
FREIO ELETROMAGNETICO

ação uniforme (não há trepidação), ausência de atritos mecânicos e os consequentes desgastes, força de frenagem proporcional à velocidade, etc. Por estes motivos a frenagem eletromagnética encontra muitas

aplicações práticas (aparelhos elétricos de medida, esticadores de fios, etc).

## ANOTAÇÕES

Em outras ocasiões, as correntes de Foucault são indesejáveis, representando um dispêndio inútil de energia. Para evitar estas perdas de Foucault, deve-se evitar a formação das "fictícias" espiras dentro do material condutor (ver figura anterior). A maneira mais simples de se conseguir este objetivo é **laminar** o metal e dispor as chapas de maneira que as linhas de força do campo lhes sejam paralelas. Evidentemente, as chapas devem ser isoladas entre si. Esta isolação, no entanto, não necessita ser muito boa, conseguindo-se resultados satisfatórios com certos esmaltes ou até mesmo deixando-se a isolação a cargo da oxidação normal das superfícies das chapas.



Se o vetor indução magnética variar senoidalmente no tempo, com frequência  $f$ , admitindo  $B$  para a máxima indução, pode-se demonstrar que a potência perdida, através das correntes de Foucault, por unidade de volume do material condutor, é dada pela fórmula:

$$P = \kappa B_{\max}^2 \cdot f^2 e$$

em que  $\kappa$  é uma constante de proporcionalidade e  $e$  é a espessura das chapas.

Todas as partes de ferro das máquinas elétricas (motores, geradores e transformadores) atravessadas por fluxos variáveis são laminadas, com o objetivo de reduzir as perdas de Foucault a valores toleráveis.

Percebe-se que as perdas são tanto menores quanto mais finas forem as chapas e tanto maiores quanto mais alta a FREQUÊNCIA. Quando a frequência for bastante elevada (centenas de milhares ou mesmo milhões de ciclos por segundo), o problema das perdas de Foucault torna-se bastante sério. Para resolvê-lo recorre-se a um processo de sinterização. O pó de ferro é prensado com um aglomerante isolante conveniente. A peça assim formada apresenta perdas de Foucault muito baixas, porque as correntes de Foucault que ainda restam são só as que circulam nos grãos individuais, já que não há contato elétrico entre grãos. São deste tipo os núcleos de Ferrite, de uso extremamente difundido.

As perdas de Foucault podem ser desejáveis. É o que acontece, por exemplo, nos fornos de indução. Neste caso, como se deseja grandes potências dissipadas, recorre-se frequentemente a frequências elevadas.



Como este sistema não requer combustível químico, pode-se manter melhor controle na composição química do aço.

O aquecimento por indução é também bastante usado

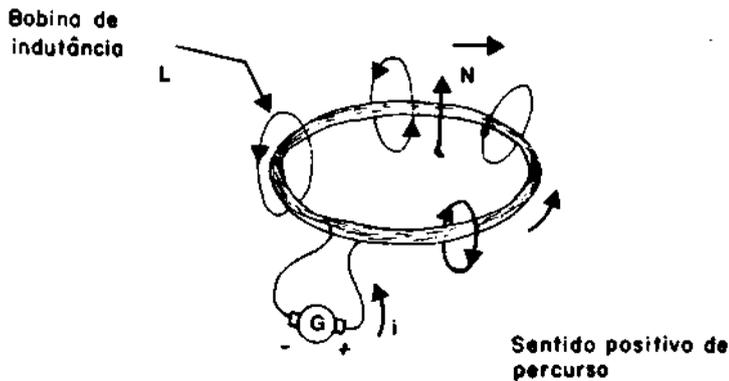
para tratamentos térmicos dos aços. Entre outras vantagens, permite um aquecimento mais uniforme da peça a ser tratada.

b) Variação do fluxo de indução auto-concatenado

Quando se varia a corrente em um circuito, varia também o fluxo auto-concatenado. Surge então uma f.e.m. induzida de valor

$$e = - \frac{d \Phi}{d t} = - \frac{d L i}{d t}$$

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



Tem-se então:

i	di/dt	e
aumenta	> 0	< .'. opõe-se ao aumento de i
diminui	< 0	> .". opõe-se à redução de i

A f.e.m. induzida é sempre de sentido tal que se opõe à variação imposta. Este efeito é particularmente notável quando da abertura de chaves que interrompem repentinamente a corrente do circuito. A corrente não pode cair instantaneamente a zero, pois isto implicaria numa f.e.m. induzida infinita

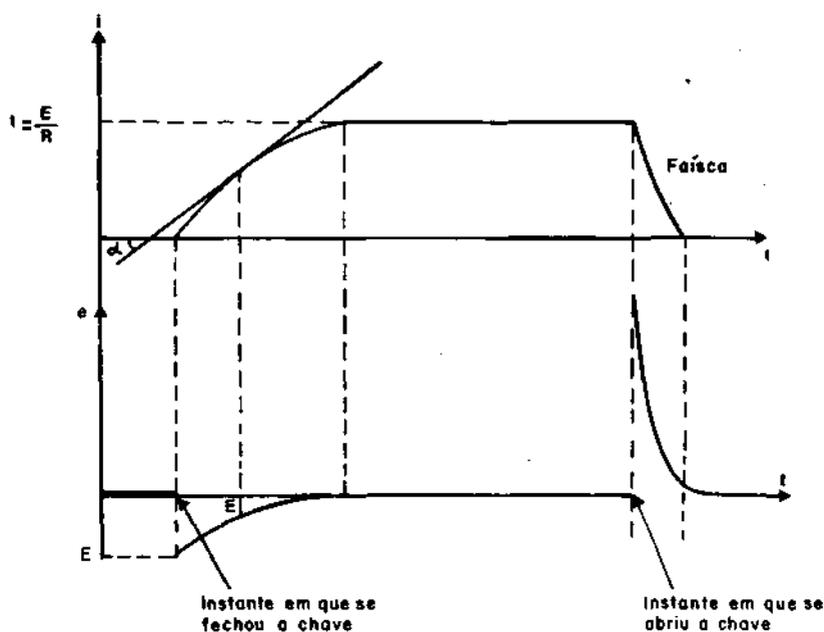
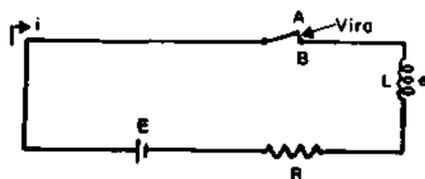
$$( e = - L \frac{d i}{d t} )$$

ANOTAÇÕES

tendendo a manter a corrente. Esta f.e.m. aparece como uma tensão entre os terminais A e B da chave e causa o salto de uma faísca. Em resumo, a corrente não se reduz a zero instantaneamente, mas mantém-se pela faísca. Também, quando se liga a chave, a corrente não assume seu valor contínuo repentinamente, mas leva um certo tempo, função da indutância do circuito.

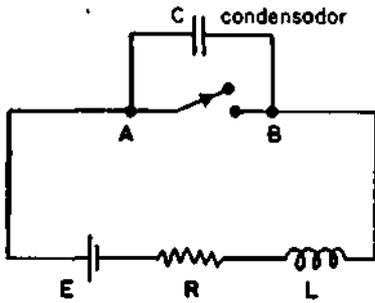
$L$  = auto indutância do circuito

$$e = - L \frac{d i}{d t} = \text{f.e.m. induzida}$$



Como  $e = -L \frac{di}{dt}$ , a f.e.m, induzida é  $e = -L \cdot tg.\alpha$ . Na abertura da chave a corrente varia muito mais de pressa e, portanto, o pico de tensão é muito mais intenso. A faísca que salta na abertura da chave pode assumir dimensões grandes, quando o circuito for de alta indutância e a corrente normal for intensa [motores de grande potência (as faíscas, que saltam do fio trolley dos bondes, é exemplo típico), transformadores, etc.)].

Frequentemente se quer evitar a faísca, porque esta vai oxidando os contatos, podendo chegar mesmo a causar a inutilização dos mesmos. Uma maneira simples de evitar a faísca é colocar em paralelo com o interruptor um condensador.

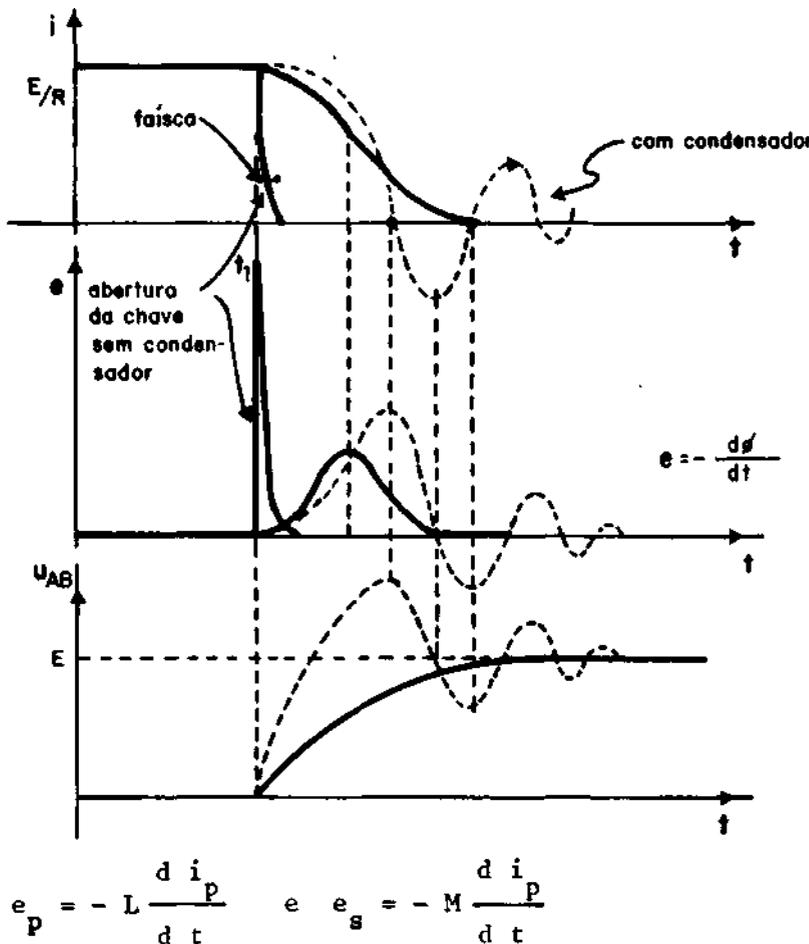


Quando se abre a chave, a corrente não precisa anular-se repentinamente, pois pode carregar o condensador. A corrente cessa quando a tensão adquirida pelo condensador for igual a E. Dependendo dos valores da capacidade C e da indutância L, podem ocorrer oscilações elétricas no circuito. A análise deste caso escapa aos nossos objetivos. Assim, o resultado será somente indicado nos diagramas a seguir, em linha pontilhada.

c) Bobina de Ruhmkorff

ANOTAÇÕES

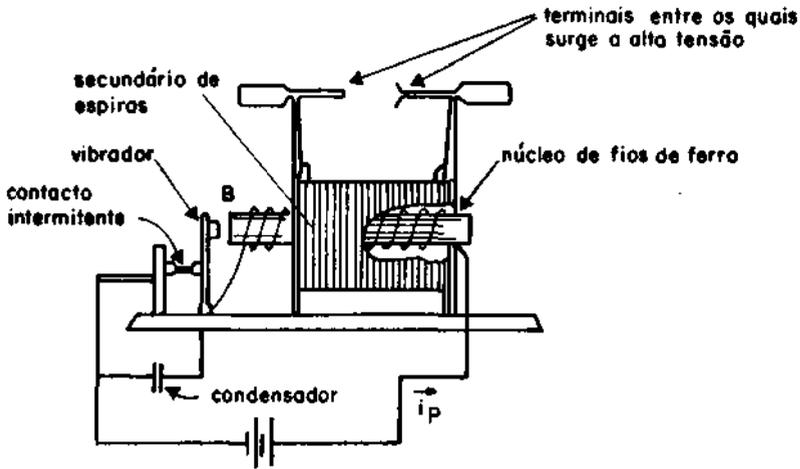
É um dispositivo que fornece pulsos de tensão muito elevados (dezenas e até centenas de milhares de volts). Em essência, é formado por duas bobinas bem acopladas magneticamente por um núcleo de ferro (évidentemente não maciço, para evitar as correntes de Foucault). Uma delas, o do enrolamento primário, tem poucas espiras e a outra, do enrolamento secundário, tem muitas espiras. Os extremos do secundário são ligados a terminais convenientes. Como o secundário tem muito mais espiras do que o primário, tem-se a mútua indutância muito maior que a indutância do primário. Como ainda as f.e.m. induzidas no primário e no secundário são respectivamente.



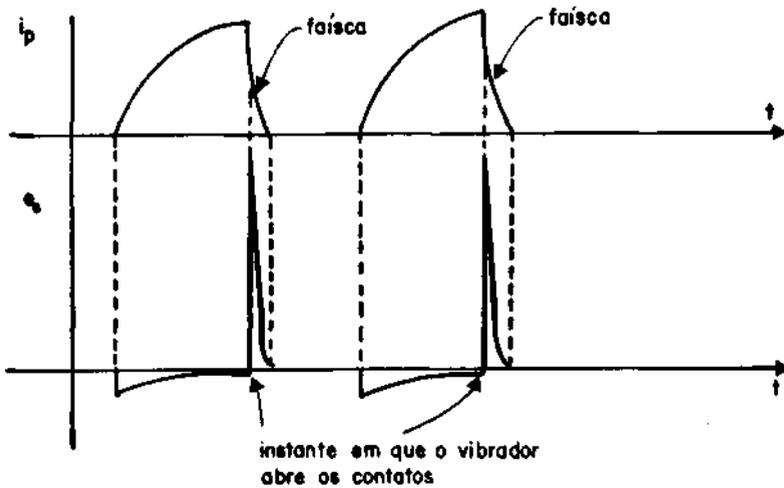
conclui-se que é entre os terminais do secundário que vão surgir os picos de tensão mais elevada.

Contem o sistema ainda um vibrador, que é um dispositivo semelhante ao utilizado na campainha de sino, e que produz, automaticamente, contatos intermitentes. Em paralelo com este, tem-se um condensador para evitar faiscamento excessivo.

ANOTAÇÕES



Se não houvesse o condensador, a corrente e a tensão induzida no secundário, em função do tempo, seriam do tipo abaixo.

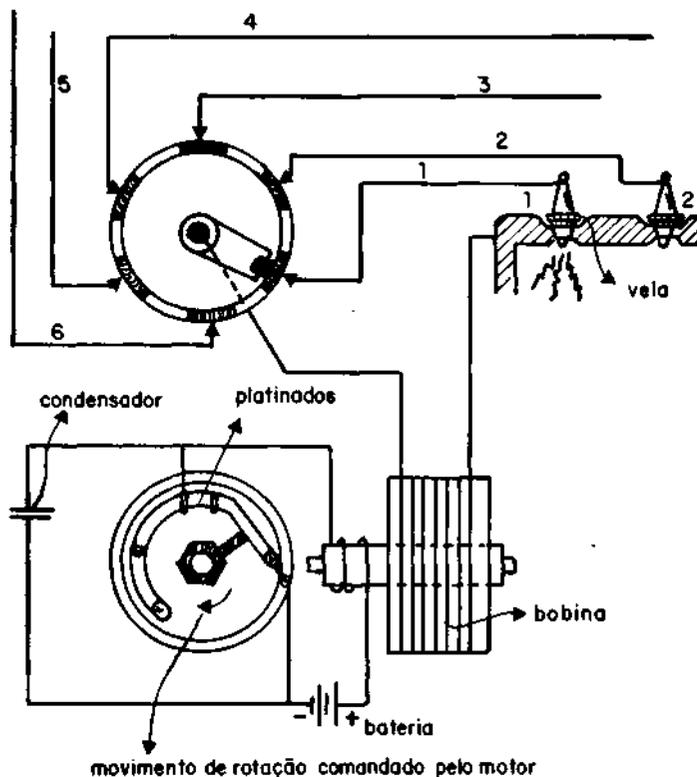


A presença do condensador pode alterar bastante as formas de onda acima, aparecendo inclusive oscilações elétricas.

#### d) Sistema de ignição de Motores à explosão

#### ANOTAÇÕES

É bastante semelhante a bobina de Ruhmkorff. A diferença essencial é que o instante da faísca é comandado pelo motor. Na bobina de Ruhmkorff, a abertura do circuito era automática, devido ao vibrador. Nos motores à explosão (por exemplo, dos automóveis) o próprio movimento do eixo do motor comanda a abertura dos platinados. A bobina fornece o pico de alta tensão e o distribuidor distribui este pico de tensão entre as velas, numa sequência conveniente. Nestas é que salta a faísca que dá início à combustão, nos cilindros. A figura abaixo esclarece o funcionamento.



Várias experiências básicas que evidenciam os fenômenos do eletromagnetismo foram apresentados durante este estudo .

Cabe a cada instituição de ensino, em função da sua capacidade laboratorial, implementar algumas dessas práticas aplicativas.

Os materiais sugeridos nas aplicações práticas são de fácil obtenção e o instrumental de medição é o pertinente a qualquer laboratório de eletricidade.

Outras aplicações mais elaboradas para melhor constatação dos fenômenos ligados ao magnetismo e eletromagnetismo, devem ser desenvolvidas em laboratório.

Para tanto, destacamos as instruções e as especificações constantes na indicação bibliográfica nº 18, onde se observa um trabalho objetivo e prático, inclusive contendo um sistema para acompanhamento da parte experimental.

## BIBLIOGRAFIA

## ANOTAÇÕES

1. SENGBERG, Gerhard. *Eletromagnetismo*
2. SALMERON, Roberto. *introdução à Eletricidade e ao Magnetismo* .
3. ZEMANSKY, Sears. *Física. (Vol. II).*
4. JOHSON, Tore Nils Olof Folmer. *Magnetismo*
5. SHADOWITZ, Albert. *The. Eletromagnetic fields.*
6. PUGLIESI NETTO, Humberto e RODRIGUES, Osny. *Física Geral (Vol. 3)*
7. EISBERG. *Física .. Fundamentos e Aplicações Vols. I a IV.*
8. TRIPLER, Paul A. *Física*
9. WESTPHAL, W.H. *Tratado de Física .*
10. GROMFONE, J.A. *Curso de Eletromagnetismo.*
11. HAYT JR, William H. *Engineering Electromagnetics.*
12. GONÇALVES, Dalton. *Eletricidade e Eletromagnetismo*
13. CARRERA, Rodolfo Romero e VASQUEZ, Ruben Anaya. *Fundamentos de Eletricidad y Magnetismo.*
14. BERKELEY. *Eletricidade e Magnetismo*
15. HALLIDAY, David e RESNICK, Robert. *Física.*

16. SCHAEFER, Hamilton N.R. *Eletricidade e Magnetismo* , **ANOTAÇÕES**
17. SCHAEFER, Hamilton N.R. e VASCONCELOS, Marco A. Sanford. *Laboratorio de Eletricidade e Magnetismo* .
18. VASCONCELOS, Marco A. Sanford e SCHAEFER, Hamilton N.R. *Equipamentos Rotacional. Laboratório de Eletricidade e Magnetismo*
19. SCHAEFER, Hamilton N.R. *Eletricidade e Magnetismo* .

#### **ANEXOS**

- Anexo 1 - Bardella Borriello Eletromecânica S.A. BBE
- Anexo 2 - Constanta - Ferrites
- Anexo 3 - Icotron - Tecnologia Siemens
- Anexo 4 - Schrack do Brasil Equipamentos Elétricos S/A

FUNDAÇÃO CENAFOR

PRODUÇÃO GRÁFICA  
Setor de Multimeios da  
Coordenadoria de Comunicação  
Técnica - COMTEC

IMPRESSÃO  
Gráfica do CENAFOR



MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO

**FUNDAÇÃO CENTRO NACIONAL DE APERFEIÇOAMENTO DE PESSOAL PARA A FORMAÇÃO PROFISSIONAL**

Rua Rodolfo Miranda, 636 • CEP 01121 • São Paulo • SP • Brasil • End. Teleg. "CENAFOR" - Tel.: 228-1922 • Telex (0111 30367 EOUC BR

# Livros Grátis

( <http://www.livrosgratis.com.br> )

Milhares de Livros para Download:

[Baixar livros de Administração](#)

[Baixar livros de Agronomia](#)

[Baixar livros de Arquitetura](#)

[Baixar livros de Artes](#)

[Baixar livros de Astronomia](#)

[Baixar livros de Biologia Geral](#)

[Baixar livros de Ciência da Computação](#)

[Baixar livros de Ciência da Informação](#)

[Baixar livros de Ciência Política](#)

[Baixar livros de Ciências da Saúde](#)

[Baixar livros de Comunicação](#)

[Baixar livros do Conselho Nacional de Educação - CNE](#)

[Baixar livros de Defesa civil](#)

[Baixar livros de Direito](#)

[Baixar livros de Direitos humanos](#)

[Baixar livros de Economia](#)

[Baixar livros de Economia Doméstica](#)

[Baixar livros de Educação](#)

[Baixar livros de Educação - Trânsito](#)

[Baixar livros de Educação Física](#)

[Baixar livros de Engenharia Aeroespacial](#)

[Baixar livros de Farmácia](#)

[Baixar livros de Filosofia](#)

[Baixar livros de Física](#)

[Baixar livros de Geociências](#)

[Baixar livros de Geografia](#)

[Baixar livros de História](#)

[Baixar livros de Línguas](#)

[Baixar livros de Literatura](#)  
[Baixar livros de Literatura de Cordel](#)  
[Baixar livros de Literatura Infantil](#)  
[Baixar livros de Matemática](#)  
[Baixar livros de Medicina](#)  
[Baixar livros de Medicina Veterinária](#)  
[Baixar livros de Meio Ambiente](#)  
[Baixar livros de Meteorologia](#)  
[Baixar Monografias e TCC](#)  
[Baixar livros Multidisciplinar](#)  
[Baixar livros de Música](#)  
[Baixar livros de Psicologia](#)  
[Baixar livros de Química](#)  
[Baixar livros de Saúde Coletiva](#)  
[Baixar livros de Serviço Social](#)  
[Baixar livros de Sociologia](#)  
[Baixar livros de Teologia](#)  
[Baixar livros de Trabalho](#)  
[Baixar livros de Turismo](#)