UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA MARIA

DEPARTAMENTO DE FÍSICA
Grupo de Ensino de Física GEF-UFSM

ELETROMAGNETISMO

Joecir Palandi

Santa Maria, 2024

PREFÁCIO

No mundo contemporâneo, cada vez mais as decisões políticas de peso tendem a girar em torno de problemas e questões relacionadas direta ou indiretamente com o conhecimento científico e tecnológico. Desse modo, o domínio desse conhecimento constitui componente importante não apenas para a construção de uma visão de mundo apropriada mas também para o exercício da própria cidadania.

Para uma parcela ponderável da população, é na escola de ensino médio que se dá o único contato formal com esse conhecimento. Contudo, os conteúdos científicos de modo geral e os de Física, em particular, como são desenvolvidos nessa escola, estão distantes da verdade de sua construção e pouco ligados aos fenômenos e às aplicações tecnológicas que justamente deveriam procurar descrever. Em outras palavras, a prática que origina e fundamenta o conhecimento científico é apenas parcialmente comunicada à parcela da população que passa pela escola. O ensino de uma ciência não pode se basear unicamente nos livros de texto porque a verdade desse conhecimento só pode ser transmitida integrando-se esqueleto teórico e verificação experimental, procurando vincular essa verdade a elementos concretos da observação.

O Grupo de Ensino de Física da UFSM (GEF-UFSM), constituído pelos professores Antônio V. L. Porto, Dartanhan B. Figueiredo, João C. Denardin, Joecir Palandi e Paulo R. Magnago, vem desenvolvendo desde 1985 atividades de extensão e de pesquisa em ensino, procurando contribuir para a integração entre os profissionais da universidade e das escolas de ensino médio. Dentre as suas atividades de extensão, o GEF-UFSM tem a cedência de material instrucional para atividades experimentais a professores de escolas de ensino médio, a apresentação de cursos, oficinas e palestras e a elaboração de cadernos didáticos em parceria com a COPERVES-UFSM. E em todas as suas atividades, o GEF-UFSM inclui acadêmicos do Curso de Licenciatura em Física para que conheçam, desde os primeiros semestres do seu curso, a realidade do escola de ensino médio, seu futuro campo de atuação.

Por outro lado, o GEF-UFSM tem sempre presente que, no que concerne aos professores que lecionam Física na escola de ensino médio, tanto aqueles com formação específica quanto aqueles sem essa formação, e que constituem a maioria, a necessidade de uma educação continuada não fica satisfeita devido a pouca oferta de material impresso adequado (livros, cadernos didáticos, artigos de divulgação, etc.) e, também, devido à dificuldade de acesso a cursos de atualização e a outros tipos de atividades presenciais, quando esses são oferecidos. Essa situação vem gerando, numa parcela ponderável desses professores, uma carência crônica de conteúdos que, somada à importância atribuída ao livro texto na determinação da sequência dos conteúdos a serem apresentados aos seus alunos e no próprio método de ensino, representa uma importante limitação ao ensino de Física na escola de ensino médio. Por isso, o GEF-UFSM oferece mais esse caderno didático, escrito para o uso dos professores dessa escola, embora possa ser usado também por seus alunos, numa tentativa de clarificar, aprofundar e complementar os conteúdos de Eletromagnetismo e procurando, também, contribuir para reverter a atual tendência da maioria dos professores de simplificar e reduzir tais conteúdos, mesmo sabendo de sua importância capital para o entendimento dos fenômenos naturais e dos produtos tecnológicos eletroeletrônicos, símbolos e orgulho da época atual. O caderno contém muitas atividades experimentais para que os professores possam realizar o planejamento de suas atividades didáticas integrando os conteúdos teóricos às atividades experimentais pertinentes. A experimentação no ensino de Física pode ser um instrumento útil no processo ensino-aprendizagem desde que não seja estranha à sequência lógica dos conteúdos, sendo acompanhada de uma estratégia que motive a introdução de novos temas, detecte problemas e determine relações entre variáveis.

Para o professor, o planejamento das atividades didáticas não deveria ser uma tarefa meramente burocrática, uma simples cópia do sumário do livro texto, sem qualquer vínculo com a importância relativa dos conteúdos da disciplina em questão, com a carga horária disponível, com os conhecimentos que seus alunos já dominam e com a realidade do meio em que a escola está inserida. Um planejamento bem executado e constantemente reavaliado pode ser um instrumento que contribui efetivamente para que o processo ensino-aprendizagem se estabeleça e se realize. O GEF-UFSM espera que este caderno seja útil ao dar mais consistência ao conhecimento que o professor do ensino médio tem dos fenômenos do Eletromagnetismo e de suas aplicações tecnológicas mais imediatas, ajudando-o na elaboração de um planejamento que integre atividades experimentais e teóricas e contemple uma distribuição dos conteúdos da disciplina, ao longo das horas/aula disponíveis, mais condizente com a importância relativa de tais conteúdos.

O GEF-UFSM enfatiza mais uma vez que este caderno nasceu para servir aos professores da escola de ensino médio e é a eles dirigido, não tendo sido preparado para servir de texto para uso direto com seus alunos. Mesmo assim, esperamos estar contribuindo para que os conteúdos de Eletromagnetismo cheguem de modo mais consistente e rigoroso a esses mesmos alunos. De qualquer forma, o GEF-UFSM está aberto a quaisquer críticas e/ou sugestões que possam vir a melhor esse caderno.

SUMÁRIO

I.	Introdução	1
II.	Pólos Magnéticos	1
III.	A Idéia de Campo	2
IV.	Linhas de Campo Magnético	2
V.	Fluxo e Lei de Gauss para o Magnetismo	4
VI.	Campo Magnético	6
VII.	Trajetória de uma Partícula num Campo Magnético Uniforme	7
VIII.	Efeito Hall	8
IX.	A Experiência de Thomson	9
X.	Lei de Biot-Savart	11
XI.	Circulação e Lei de Ampère	13
XII.	Solenoide	15
XIII.	Força sobre um Condutor de Corrente Elétrica	16
XIV.	Torque sobre uma Espira Retangular	18
XV.	Galvanômetro, Amperímetro e Voltímetro	19
XVI.	Força entre Condutores Paralelos	20
XVII.	Definição de Ampère	21
XVIII.	Lei de Faraday	21
XIX.	Lei de Lenz	23
XX.	Geradores	24
XXI.	Tensão Eficaz e Corrente Eficaz	26
XXII.	Transformadores	27
XXIII.	Correntes de Foucault	29
XXIV.	Propriedades Magnéticas da Matéria	29

I. INTRODUÇÃO

O conceito fundamental do Eletromagnetismo é o de campo eletromagnético. O campo eletromagnético independente do tempo se separa em dois, muito diferentes, o campo elétrico e o campo magnético. Na verdade, um campo eletromagnético dependente do tempo não é senão a unidade dos campos elétrico e magnético. Em uma onda eletromagnética, por exemplo, a variação no tempo do campo elétrico origina um campo magnético e a variação no tempo do campo magnético, por sua vez, origina um campo elétrico e assim, sucessivamente. Desse modo, analogamente ao que acontece no caso de um pêndulo, em que a energia cinética aumenta enquanto que a energia potencial diminui e vice-versa enquanto as oscilações se sucedem, na radiação eletromagnética, a energia passa do campo elétrico para o campo magnético e deste para aquele enquanto a onda se propaga pelo espaço. O campo eletromagnético pode ser percebido pelo ser humano somente no caso em que os campos elétricos e magnéticos oscilam com frequências entre 4×10^{14} Hz e $7{,}5 \times 10^{14}$ Hz, quando, então, são percebidos através dos olhos como luz. Os campos estáticos, tanto o elétrico quanto o magnético, não podem ser percebidos pelo homem. Algumas espécies animais percebem esses campos como, por exemplo, as aves migratórias, que traçam suas rotas a partir do campo magnético terrestre.

II. POLOS MAGNÉTICOS

Os efeitos magnéticos externos a uma barra imantada são mais intensos nas regiões próximas às suas extremidades (Fig. 1). Essas regiões são chamadas polo norte magnético (N) e polo sul magnético (S).

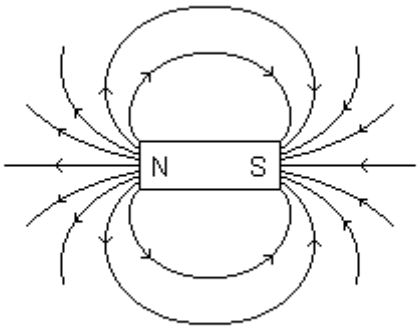


Fig.1

Atividade

Com o objetivo de discutir a existência de apenas dois tipos de polos magnéticos e o tipo de interação (atrativa ou repulsiva) entre eles, pode-se tomar três imãs em forma de barra sem indicação dos seus tipos de polos. Para cada uma das extremidades de um dos imãs determina-se a natureza da interação (se atrativa ou repulsiva) com cada uma das extremidades dos outros dois imãs. Por argumentos lógicos deve-se mostrar, a partir daí, que a natureza da interação entre todos os pares de extremidades consideradas pode ser descrita com apenas dois tipos de polos.

III. A IDEIA DE CAMPO

Sejam duas partículas de massas m_1 e m_2, separadas por uma distância d. Pela lei da gravitação universal de Newton, a forças da partícula 1 sobre a partícula 2 e a força da partícula 2 sobre a partícula 1 atuam na direção da reta que passa pelas partículas com a mesma intensidade, dada por:

$$F = G\left(\frac{m_1 m_2}{d^2}\right)$$

em que G é uma constante universal, isto é, tem o mesmo valor para todos os pares de partículas. Assim, se as partículas se afastam (ou se aproximam) uma da outra por qualquer motivo, a intensidade destas forças diminui (ou aumenta) instantaneamente. Por isso, estritamente falando, esse ponto de vista não tem sentido físico. De qualquer forma, dentro desse ponto de vista, que interpreta a interação entre duas partículas como se uma exercesse força diretamente sobre a outra, se diz que existe ação à distância entre as partículas.

O ponto de vista aceito como mais apropriado é aquele que introduz, como mediador da interação entre as partículas, o campo gravitacional. Dentro desse ponto de vista, considera-se que, como uma partícula tem massa, o espaço não está vazio, mas apresenta uma certa qualidade material, chamada campo gravitacional, de modo que sobre qualquer outra partícula com massa colocada em qualquer ponto do espaço existe uma força gravitacional. Nesse contexto, é usual dizer-se que uma partícula com massa gera um campo gravitacional no espaço e esse campo, interagindo localmente com uma segunda partícula com massa, causa o aparecimento de uma força gravitacional sobre ela. Assim, se a primeira partícula se desloca em relação à segunda, o seu campo gravitacional se modifica e essa modificação se propaga até atingir o ponto do espaço onde se encontra a segunda partícula, quando, então, a força que atua sobre esta partícula muda. A interação entre as partículas deixa de ser instantânea. Além disso, como a força aparece pela interação da partícula com o campo no ponto onde ela se encontra, a interação tem caráter local e não de ação à distância.

O campo gravitacional é um exemplo de campo vetorial. O campo elétrico e o campo magnético são, também, campos vetoriais, e tudo o que se disse acima vale também para eles. Assim, a interação coulombiana (eletrostática) entre duas partículas com carga elétrica é descrita afirmando-se que cada partícula com carga elétrica gera, no espaço, um campo elétrico, e esse campo, interagindo localmente com a outra partícula com carga elétrica, causa o aparecimento de uma força elétrica sobre ela.

O conceito de campo não tem apenas um caráter formal, matemático. Muito pelo contrário, o estudo dos campos elétricos e magnéticos variáveis com o tempo, por exemplo, demonstra que eles podem existir independentemente das cargas elétricas que os originaram (na forma de radiação eletromagnética). Os campos são entes físicos com a mesma realidade que as partículas, possuindo propriedades como massa, quantidade de movimento e energia.

IV. LINHAS DE CAMPO MAGNÉTICO

Para determinar a direção e o sentido do vetor campo magnético em um dado ponto do espaço pode-se usar como indicador a agulha magnética de uma bússola (que, na verdade, é um pequeno imã permanente), colocando o seu eixo de rotação sobre o ponto considerado (Fig. 2). A direção do vetor campo magnético é a direção da reta definida pela agulha e o sentido do vetor campo magnético é do polo S ao polo N da

agulha. Para determinar a configuração do campo numa dada região do espaço deve-se repetir esse procedimento em muitos pontos dessa região, o que pode demandar muito tempo.

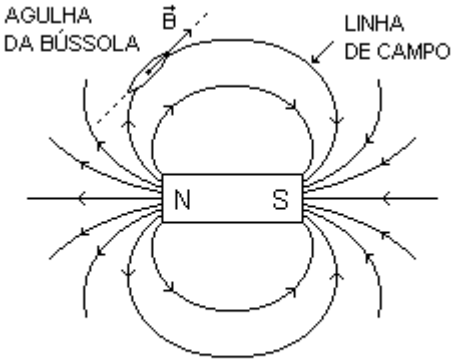


Fig.2

Um modo pictórico de representar a configuração de um campo magnético é através das linhas de campo. As linhas de campo associadas a um dado campo magnético são desenhadas obedecendo às seguintes convenções:

- Toda linha de campo magnético é contínua e fechada, saindo do polo N e chegando ao polo S por fora do imã e saindo do polo S e chegando ao polo N por dentro do imã.
- Apenas uma linha de campo passa por um dado ponto do espaço e essa linha é tangente ao vetor campo magnético nesse ponto.
- O número de linhas de campo que atravessam uma superfície de área unitária e perpendicular a essas linhas é proporcional à intensidade do campo magnético local.

Como um minúsculo fragmento de ferro se magnetiza quando próximo de um imã e se orienta conforme o campo local, pode-se usar limalha de ferro para visualizar as linhas de campo magnético.

Questões para Discussão

1. As linhas de campo não se cruzam.
2. As linhas de campo associadas a um campo uniforme são retas paralelas e equidistantes.

Atividade 1

Com o objetivo de observar diferentes configurações de linhas de campo magnético pode-se tomar limalha de ferro e alguns imãs em forma de barra. Sobre cada arranjo dos imãs se coloca uma folha de papel e sobre essa folha, a limalha de ferro, procurando cobrir uniformemente a região do ímã. Com leves toques na folha de papel, pode-se observar a limalha de ferro se redistribuindo e traçando as linhas de campo correspondentes.

Atividade 2

Para discutir a configuração do campo magnético da Terra (Fig. 3(a)) e a não coincidência dos polos magnéticos e dos polos geográficos, pode-se construir um modelo (maquete) da Terra tomando uma esfera de madeira ou de isopor e introduzindo, ao longo de um dos seus diâmetros, um ímã em forma de barra (Fig. 3(b)). Uma bússola, montada na extremidade de um suporte e livre para girar ao redor de dois eixos perpendiculares, pode, então, ser usada como indicador do campo magnético local ou das linhas de campo.

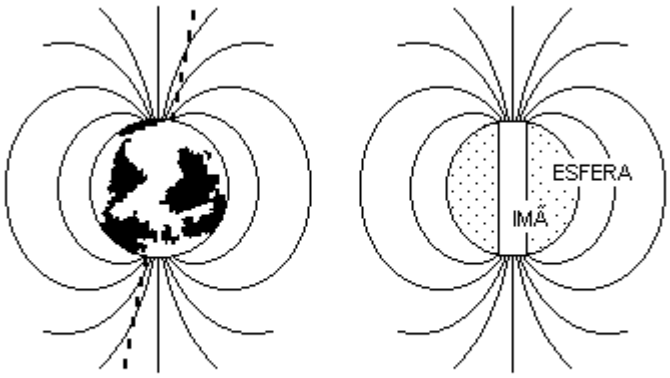


Fig.3(a) (b)

Além disso, é interessante observar que o polo sul da agulha da bússola aponta o polo sul geográfico e, por isso, o polo sul geográfico corresponde ao polo norte magnético da Terra. E o polo norte da agulha da bússola aponta o polo norte geográfico e, por isso, o polo norte geográfico corresponde ao polo sul magnético da Terra.

V. FLUXO E LEI DE GAUSS PARA O MAGNETISMO

Numa região onde existe um campo magnético, seja uma superfície S dividida em um grande número N de elementos de superfície, com áreas ΔA_k $(k = 1, 2, \ldots N)$, pequenos o suficiente para que, sobre cada um deles, o (vetor) campo magnético possa ser considerado constante.

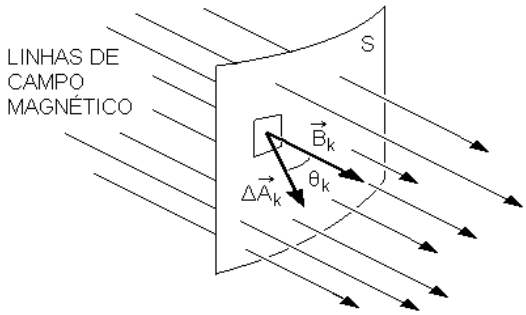


Fig. 4

Ao k-ésimo elemento de superfície associa-se o vetor $\Delta\vec{A}_k$, com módulo ΔA_k e direção perpendicular ao correspondente elemento de superfície (Fig. 4). Chama-se fluxo do campo magnético através da superfície S a grandeza:

$$\phi = \sum_{k=1}^{N} \vec{B}_k \cdot \Delta\vec{A}_k = \sum_{k=1}^{N} B_k(\Delta A_k)\cos\theta$$

Por convenção, se a superfície S é fechada, os vetores associados aos elementos de superfície têm sentidos que apontam de dentro para fora da superfície.

Em termos de linhas de campo, o fluxo magnético é dado pelo número de linhas que atravessam a superfície considerada.

Como as linhas de campo magnético são contínuas e fechadas, se a superfície através da qual se quer calcular o fluxo é fechada, cada linha de campo conta, para o cálculo do fluxo total através desta superfície, uma vez quando entra e outra quando sai do volume definido pela superfície e, devido à convenção dada acima para o sentido dos vetores associados aos elementos de superfície, quando entra sua contribuição é negativa:

$$\vec{B} \cdot \Delta\vec{A} = B(\Delta A)\cos 180^o < 0$$

e quando sai, é positiva:

$$\vec{B} \cdot \Delta\vec{A} = B(\Delta A)\cos 0^o > 0$$

uma anulando a outra. Desse modo, o fluxo magnético através de uma superfície fechada qualquer é sempre nulo. Essa afirmativa constitui a Lei de Gauss para o magnetismo. Matematicamente:

$$\sum_{k=1}^{N} \vec{B}_k \cdot \Delta\vec{A}_k = 0 \qquad [SUPERFÍCIE\ FECHADA]$$

A lei de Gauss para o magnetismo expressa a inseparabilidade dos polos magnéticos ou, em outras palavras, a inexistência de polos magnéticos isolados (monopolos magnéticos).

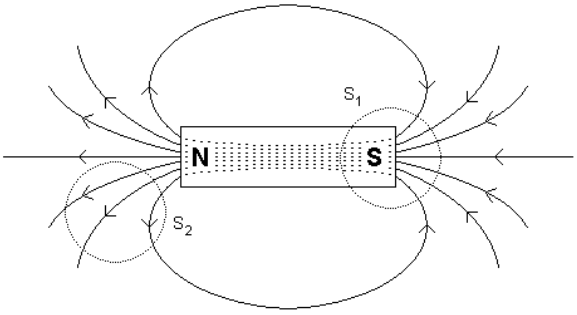


Fig. 5

Desta forma, toda linha de campo é contínua e fechada, ou seja, partindo do polo N vai ao polo S por fora do imã e, daí, por dentro, retorna ao polo N (Fig. 5).

Portanto, é claro que o número de linhas de campo magnético que passam através de qualquer uma das duas superfícies S_1 e S_2 de fora para dentro é igual ao número de linhas de campo que passam de dentro para fora, de modo que o fluxo magnético total, para cada superfície, é nulo. O mesmo vale para qualquer outra superfície fechada que se tome.

VI. CAMPO MAGNÉTICO

O vetor campo magnético $\vec{B}$ em um dado ponto do espaço é definido, a partir da força $\vec{F}$ que age sobre uma partícula de carga q que passa por esse ponto com velocidade $\vec{v}$, pela expressão:

$$\vec{F} = q(\vec{v} \times \vec{B})$$

O símbolo $\vec{v} \times \vec{B}$ (produto vetorial) significa que o vetor $\vec{F}$ é perpendicular ao plano dos vetores $\vec{v}$ e $\vec{B}$ e o seu sentido é dado (se q é positiva) pela regra da mão direita (Fig. 6): se os dedos da mão direita são colocados na direção e no sentido do vetor $\vec{v}$ e girados para que fiquem na direção e sentido do vetor $\vec{B}$, o polegar, que faz o papel de eixo de rotação, aponta o sentido do vetor $\vec{F}$.

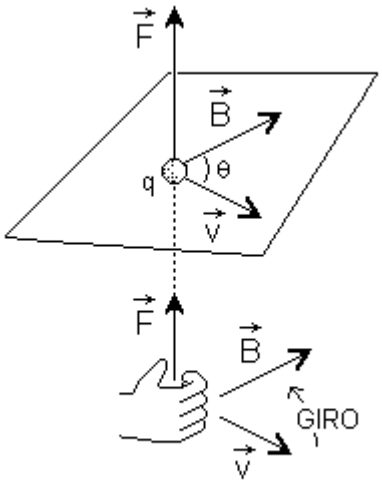


Fig.6

O símbolo $\vec{v} \times \vec{B}$ significa também que o módulo da força $\vec{F}$ é dado por:

$$F = qvB\ sen\ \theta$$

em que θ é o ângulo entre $\vec{v}$ e $\vec{B}$. Assim:

$$B = \frac{F}{qv\ sen\ \theta}$$

No Sistema Internacional de Unidades (SI), as unidades para o módulo da força, da carga elétrica e da velocidade são, respectivamente, o newton (N), o coulomb (C) e o metro por segundo (m/s). Além disso, a unidade de corrente elétrica é o ampère (A),

com A = C/s. Sendo assim, a unidade do módulo do campo magnético, chamada tesla (T), é dada por:

$$T = \frac{N}{mA}$$

A unidade do módulo do campo magnético no Sistema de Unidades CGS é chamada gauss (G) e vale:

$$1\ gauss = 10^{-4}\ T$$

O módulo do campo magnético nas proximidades da superfície da Terra está entre $10^{-4}\ T$ e $10^{-5}\ T$ e nas vizinhanças de um imã permanente poderoso pode chegar a ser da ordem de $10^{-1}\ T$. Um campo com intensidade maior que $10\ T$ é difícil de conseguir em laboratório.

VII. TRAJETÓRIA DE UMA PARTÍCULA NUM CAMPO MAGNÉTICO UNIFORME

As linhas de campo associadas a um campo magnético uniforme são retas paralelas e equidistantes umas das outras. Um campo magnético uniforme perpendicular à página é representado por um conjunto de sinais equidistantes uns dos outros, indicando os lugares onde as linhas de campo atravessam a página. Se o campo aponta para fora da página, os sinais são pontos (Fig. 7(a)), e se o campo aponta para dentro da página, os sinais são cruzes (Fig. 7(b)).

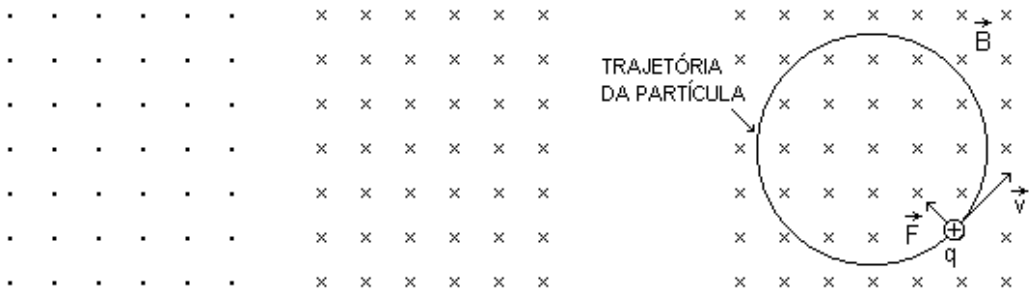


Fig.7(a) (b) Fig.8

Considere uma partícula de carga positiva q se deslocando numa região de campo magnético uniforme $\vec{B}$, com velocidade $\vec{v}$ perpendicular a $\vec{B}$ (Fig. 8). Sobre a partícula atua, em todos os pontos de sua trajetória, uma força de origem magnética $\vec{F}$, perpendicular a $\vec{v}$ e a $\vec{B}$. Nessas condições, o movimento da partícula é circular e uniforme e a força magnética $\vec{F}$ atua como força centrípeta. Então pode-se escrever, em módulo:

$$qvB = \frac{mv^2}{R}$$

e o raio R da trajetória fica dado por:

$$R = \frac{mv}{qB}$$

VIII. EFEITO HALL

Seja uma tira de cobre, de espessura muito pequena, com uma corrente i, numa região de campo magnético uniforme (Fig. 9). De modo geral, a seta indicadora da corrente aponta, por convenção, na direção em que se moveriam os portadores de carga se esta fosse positiva e a corrente é dita corrente convencional.

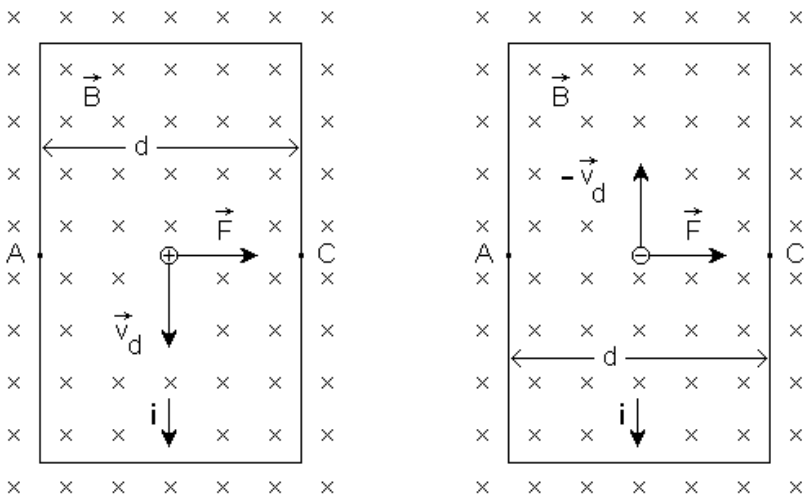


Fig. 9(a) (b)

Assim, a seta de corrente apontando para baixo pode representar ou portadores de carga positiva se movendo para baixo ou portadores de carga negativa se movendo para cima.

No caso em que os portadores têm carga positiva (q = e) e se movem para baixo com velocidade $\vec{v}_d$ (Fig. 9(a)), existe, sobre cada um deles, uma força $\vec{F}$ dada por:

$$\vec{F} = q(\vec{v} \times \vec{B}) = e(\vec{v}_d \times \vec{B})$$

No caso em que os portadores têm carga negativa (q = – e) e se deslocam para cima com velocidade $-\vec{v}_d$ (Fig. 9(b)), existe, sobre cada um deles, a mesma força $\vec{F}$, já que:

$$\vec{F} = q(\vec{v} \times \vec{B}) = (-e)(-\vec{v}_d \times \vec{B}) = e(\vec{v}_d \times \vec{B})$$

Assim, em ambos os casos, existe sobre todos os portadores de carga a mesma força $\vec{F}$ que, segundo a regra da mão direita, está dirigida de A para C e, com isso, enquanto escoam ao longo da tira, para baixo os portadores com carga positiva e para cima os portadores com carga negativa, eles são também desviados para a direita, dando origem a uma diferença de potencial V_{AC}, chamada diferença de potencial Hall transversal, entre pontos tais como A e C.

No caso em que os portadores têm carga positiva, esse tipo de carga se acumula em pontos tais como C e, consequentemente, esses pontos ficam com um potencial elétrico mais alto que os pontos tais como A, onde se acumulam cargas negativas.

No caso em que os portadores têm carga negativa, esse tipo de carga se acumula em pontos tais como C e, consequentemente, esses pontos ficam com um potencial elétrico mais baixo que os pontos tais como A, onde se acumulam cargas positivas. Assim, o tipo de carga dos portadores pode ser determinado medindo-se o sinal (positivo ou negativo) da diferença de potencial Hall transversal.

IX. A EXPERIÊNCIA DE THOMSON

Um tubo de raios catódicos é um tubo de vidro ou quartzo fechado, contendo, no seu interior, um gás a baixa pressão, e com eletrodos em suas extremidades. Com uma diferença de potencial de vários milhares de volts entre o eletrodo positivo (ânodo) e o eletrodo negativo (cátodo) acontece uma descarga elétrica através do gás.

A experiência de Thomson, realizada com um tubo de raios catódicos (Fig. 10), permite medir a razão carga/massa do elétron.

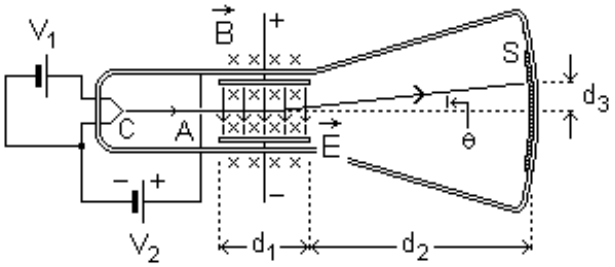


Fig.10

Do filamento C, mantido a alta temperatura pela corrente gerada pela diferença de potencial V_1, são emitidos elétrons (emissão termoiônica). Esses elétrons são acelerados desde o filamento C até a placa colimadora A pela diferença de potencial V_2. Passando pela placa colimadora, os elétrons entram numa região de campo elétrico $\vec{E}$ e campo magnético $\vec{B}$, perpendiculares entre si e à trajetória inicial dos elétrons, e daí vão ao anteparo fluorescente S, onde produzem pontos luminosos visíveis. Para que os elétrons não sejam desviados dessa trajetória por colisões com as moléculas de ar no interior da ampola, este é mantido em alto vácuo.

O campo elétrico $\vec{E}$ tende a desviar os elétrons, cuja carga é negativa, para cima, com uma força de módulo eE, e o campo magnético $\vec{B}$ tende a desviar os elétrons para baixo, com uma força de módulo evB, onde e é o módulo da carga dos elétrons e v é o módulo da sua velocidade. Para uma dada velocidade dos elétrons, os valores de E e B podem ser ajustados de modo que:

$$eE = evB$$

ou seja, com a força elétrica sobre os elétrons balanceando a força magnética. Com isso, os elétrons se deslocam em linha reta com velocidade horizontal de módulo v, desde a sua fonte C até o anteparo S, onde produzem um ponto luminoso. Assim, o

módulo da velocidade horizontal dos elétrons pode ser calculado a partir dos valores conhecidos de E e B:

$$v = \frac{E}{B}$$

Thomson observou, originalmente, a posição do ponto luminoso no anteparo fluorescente com $\vec{E}$ e $\vec{B}$ nulos. Então, com um campo elétrico $\vec{E}$ uniforme, fixo e não nulo, observou a nova posição do ponto luminoso no anteparo e mediu a deflexão resultante d_3. Finalmente, ajustou a intensidade do campo magnético $\vec{B}$ para que o ponto luminoso voltasse a sua posição original, com o que pode determinar o módulo da velocidade horizontal.

Como a força peso dos elétrons pode ser desprezada, na região do campo elétrico $\vec{E}$ uniforme, fixo e não nulo, que origina a deflexão d_3, sobre os elétrons atua apenas a força elétrica, que é vertical, está dirigida de baixo para cima e tem módulo eE constante (porque $\vec{E}$ é uniforme), ou seja, o movimento dos elétrons nessa região é um movimento bidimensional, composto de um MRU horizontal e um MRUV vertical. A tangente trigonométrica do angulo θ de deflexão pode ser calculada por:

$$tg\ \theta = \frac{d_3}{d_2} = \frac{v_y}{v}$$

em que v_y representa o módulo da componente vertical da velocidade dos elétrons, componente essa que eles adquirem ao passar pela região de campo $\vec{E}$. Como o movimento horizontal dos elétrons é um MRU, o tempo que eles levam para percorrer a distância d_1 é $t = d_1/v$. Como o movimento vertical dos elétrons é um MRUV, com aceleração de módulo constante $a = eE/m$, onde m representa a massa, durante o tempo t esses elétrons adquirem uma velocidade vertical de módulo:

$$v_y = at = \left(\frac{eE}{m}\right)\left(\frac{d_1}{v}\right) = \frac{eEd_1}{mv}$$

Então, com essa expressão de v_y na equação anterior, temos:

$$\frac{d_3}{d_2} = \frac{eEd_1}{mv^2}$$

ou

$$\frac{e}{m} = \left(\frac{d_3}{d_1 d_2}\right)\frac{v^2}{E}$$

Assim, com os valores ajustados de E e B, determina-se v. Medindo-se d_1, d_2 e d_3 e usando os valores de E e v, determina-se a razão carga/massa do elétron.

Questão para Discussão

Um tubo de raios catódicos com funcionamento semelhante àquele descrito na Fig. 10 aparece no aparelho de televisão antigo, com o anteparo fluorescente S, onde são produzidos os pontos luminosos visíveis, constituindo a tela do aparelho. A única diferença digna de nota é que, ao contrário do que acontece na experiência de Thomson, onde o desvio do feixe é governado por um campo elétrico e um campo

magnético perpendiculares entre si e à trajetória inicial dos elétrons, no caso do aparelho de televisão antigo, o desvio do feixe é realizado por dois campos magnéticos em ângulo reto entre si e com a direção original do feixe. Estes campos magnéticos são gerados por quatro bobinas colocadas opostas duas a duas.

A onda eletromagnética emitida pela antena transmissora e absorvida pelo aparelho de TV governa, entre outras características, (i) a intensidade de corrente elétrica no filamento C e, com isso, o número de elétrons emitidos por segundo e, portanto, a intensidade da imagem na tela e (ii), a intensidade das correntes nas bobinas magnéticas e, com isso, os desvios horizontal e vertical do feixe necessários para que ele forme as imagens.

X. LEI DE BIOT-SAVART

O campo magnético devido a uma corrente elétrica que passa em um fio de forma arbitrária pode ser calculado diretamente a partir da lei de Biot-Savart. Consideremos o fio dividido em um grande número N de elementos de comprimento, com comprimentos Δs_k $(k = 1, 2, \ldots N)$, pequenos o suficiente para que o campo criado pela corrente em cada um deles possa ser considerado constante (Fig. 11).

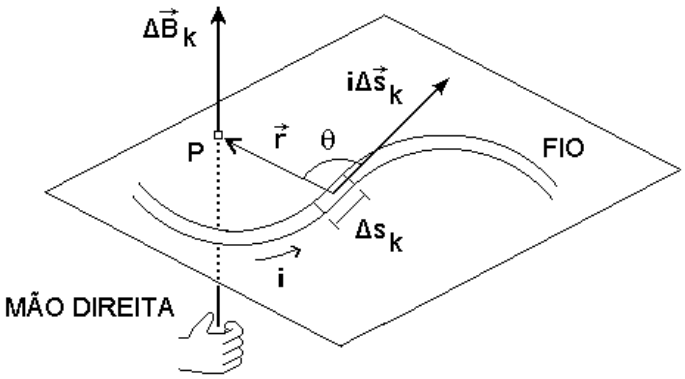


Fig. 11

Ao k-ésimo elemento de comprimento associa-se o vetor elemento de corrente $i\Delta\vec{s}_k$. O campo magnético $\Delta\vec{B}_k$ criado no ponto P do espaço por esse elemento de corrente é dado por:

$$\Delta\vec{B}_k = \left(\frac{\mu_0}{4\pi}\right)\frac{i\Delta\vec{s}_k \times \vec{r}}{r^3}$$

em que $\vec{r}$ é o vetor que vai do elemento de corrente ao ponto P. Essa expressão constitui a lei de Biot-Savart. A direção do vetor $\Delta\vec{B}_k$ é perpendicular ao plano de $i\Delta\vec{s}_k$ e $\vec{r}$ e o sentido é dado pela regra da mão direita.

É interessante observar que o módulo do campo depende do inverso do quadrado da distância:

$$\Delta B_k \sim \frac{1}{r^2}$$

O campo magnético total no ponto P, criado por todos os elementos de corrente, é a soma $\Delta\vec{B}_1 + \Delta\vec{B}_2 + \cdots + \Delta\vec{B}_k + \cdots + \Delta\vec{B}_N$.

Como exemplo de aplicação da lei de Biot-Savart pode-se calcular o campo magnético no centro de uma espira circular com uma corrente i (Fig.12).

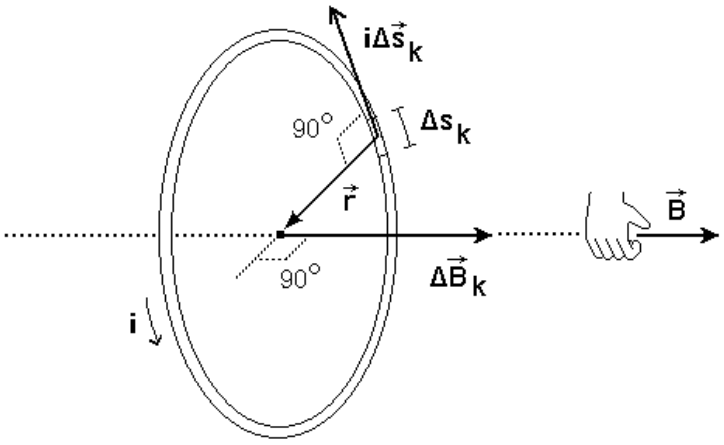


Fig. 12

Para calcular o módulo do campo magnético no ponto considerado, dividimos a espira em um grande número N de partes, cada qual de comprimento $\Delta s = 2\pi r/N$. O módulo do campo magnético produzido pelo elemento de corrente $i\Delta\vec{s}_k$ vale:

$$\Delta B_k = \left(\frac{\mu_0}{4\pi}\right)\frac{i\,(\Delta s_k)\,r\,sen\,90^o}{r^3} = \left(\frac{\mu_0}{4\pi}\right)\frac{i}{r^2}\,\Delta s_k$$

O módulo do campo magnético produzido pela espira inteira é a soma dos módulos dos vetores campo magnético produzidos por todos os N elementos de corrente, já que esses vetores são paralelos e de mesmo sentido. Assim:

$$B = \sum_{k=1}^{N} \Delta B_k = \left(\frac{\mu_0}{4\pi}\right)\frac{i}{r^2}\sum_{k=1}^{N}\Delta s_k$$

e como $\Sigma\,\Delta s_k = 2\pi r$, vem:

$$B = \frac{\mu_0 i}{2r}$$

Atividade

Com o objetivo de mostrar que uma corrente elétrica cria um campo magnético (experiência de Oersted) e que a direção desse campo magnético é perpendicular à direção do fio, pode-se ligar um fio condutor em série com 4 pilhas (fonte de tensão) e usar uma bússola como indicadora da existência ou não de um campo magnético.

Com o circuito aberto (chave S aberta), qualquer porção do fio condutor pode ser orientada segundo a direção da agulha magnética da bússola, isto é, na direção Norte-Sul (Fig. 13(a)), e pode-se observar que isso não perturba a agulha. Ao se fechar o

circuito (chave S fechada), por efeito do campo que então aparece, muda a orientação da agulha, que fica perpendicular ao fio (Fig. 13(b)).

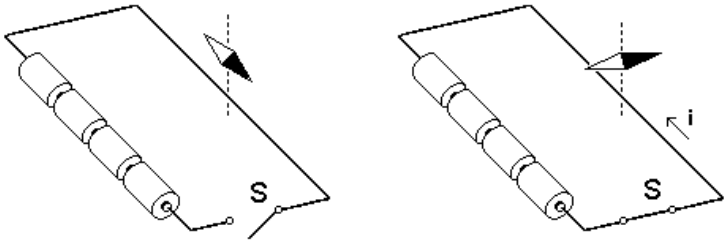


Fig. 13(a) (b)

Deve-se observar que, com a chave S fechada, as quatro pilhas ficam em curto circuito e a temperatura do fio aumenta rapidamente devido à corrente intensa que passa por ele. Assim, deve-se, na verdade, ligar a chave S e desliga-la em seguida, observando apenas a brusca mudança de orientação da agulha da bússola.

Atividade

Com o objetivo de observar que a direção do vetor campo magnético gerado por uma espira de corrente é perpendicular ao plano da espira e o sentido é dado pela regra da mão direita (como na Fig. 12), pode-se tomar um fio condutor em forma de espira em série com 4 pilhas (fonte de tensão) e usar uma bússola como indicadora do campo magnético. Nesse caso, a regra da mão direita pode ser vista como se os dedos da mão direita seguissem a corrente na espira com o polegar dando o sentido do vetor campo resultante. Deve-se observar que é conveniente colocar no circuito uma chave liga-desliga porque as quatro pilhas ficam em curto circuito e a temperatura do fio aumenta rapidamente devido à corrente intensa que passa por ele. Portanto, deve-se ligar a chave S e desliga-la em seguida, observando rapidamente o que se quer observar. De qualquer modo, quanto menor o diâmetro do fio e quanto maior o seu comprimento total, maior será a sua resistência, menor a corrente e menor, consequentemente, o perigo. Assim, no lugar de uma única espira, pode-se ligar às pilhas uma bobina com muitos e muitos enrolamentos, usando um fio de diâmetro muito pequeno.

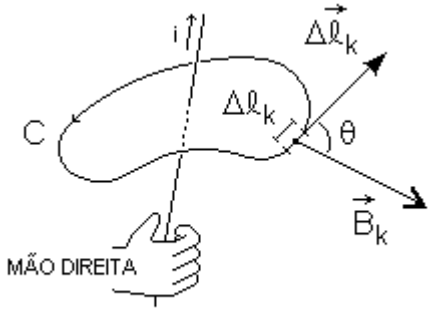


Fig.14

XI. CIRCULAÇÃO E LEI DE AMPÈRE

Numa região de campo magnético, vamos considerar uma linha fechada C dividida em um grande número N de elementos de comprimento, com comprimentos

$\Delta\ell_k$ $(k = 1, 2, 3 \ldots N)$, pequenos o suficiente para que, sobre cada um deles, o campo magnético possa ser considerado constante (Fig. 14). Ao k-ésimo elemento de comprimento associa-se o vetor $\Delta\vec{\ell}_k$, com módulo $\Delta\ell_k$ e tangente à curva C. Chama-se circulação do campo magnético ao longo da linha C a grandeza:

$$\sum_{k=1}^{N} \vec{B}_k \cdot \Delta\vec{\ell}_k = \sum_{k=1}^{N} B_k(\Delta\ell_k)\cos\theta$$

A lei de Ampère afirma que a circulação do campo magnético ao longo de uma linha fechada (chamada amperiana) que envolve as correntes i_1, i_2, ... i_M é:

$$\sum_{k=1}^{N} \vec{B}_k \cdot \Delta\vec{\ell}_k = \mu_0 i \qquad \text{[LINHA FECHADA]}$$

em que $i = i_1 + i_2 + \cdots + i_M$. Na aplicação dessa equação deve-se considerar a linha fechada e, portanto, todos os elementos $\Delta\vec{\ell}_1$, $\Delta\vec{\ell}_2$, ... $\Delta\vec{\ell}_N$, orientados segundo os dedos da mão direita com o polegar na direção da corrente total i.

Como exemplo do uso da lei de Ampère, pode-se calcular o campo magnético ao redor de um fio condutor reto, de comprimento infinito, por onde circula uma corrente i (Fig. 15). Seja uma circunferência C, de raio R, centrada no fio condutor, num plano perpendicular a esse fio.

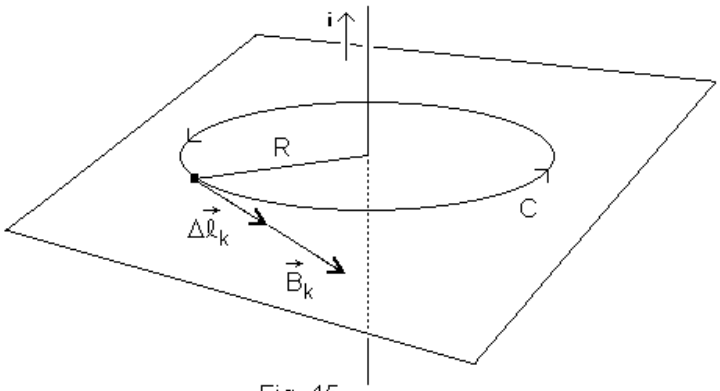


Fig. 15

Sob o ponto de vista físico, todos os pontos da circunferência são equivalentes porque uma rotação qualquer do plano da circunferência ao redor do ponto onde ele corta o fio condutor não altera a relação geométrica do fio com a circunferência. Assim, o campo magnético gerado pela corrente deve ter o mesmo módulo em todos os pontos dessa circunferência e se ele é, num ponto da circunferência, paralelo ao fio condutor ou tangente ou radial à circunferência, ele deve ser paralelo ao fio condutor ou tangente ou radial à circunferência em todos os outros pontos. Mas é nulo o produto escalar do vetor campo magnético pelo vetor elemento de comprimento sobre a circunferência se o campo é, em todos os pontos, radial ou paralelo ao fio condutor, e nula é, também, a circulação do campo sobre essa circunferência. Como uma corrente não nula passa através dessa circunferência, se ela fosse escolhida como amperiana, esse resultado seria contraditório com a lei de Ampère (expressa matematicamente pela última expressão dada acima). Assim, a única possibilidade restante é um campo magnético tangente à circunferência considerada e com mesmo módulo em todos os seus pontos.

Então, escolhendo novamente essa circunferência para o cálculo da circulação do campo, vem:

$$\sum_{k=1}^{N} \vec{B}_k \cdot \Delta\vec{\ell}_k = \sum_{k=1}^{N} B_k(\Delta\ell_k)\cos 0^o = \sum_{k=1}^{N} B_k(\Delta\ell_k) = B\sum_{k=1}^{N} \Delta\ell_k = B(2\pi R)$$

em que foi usado o fato do campo magnético ter o mesmo módulo em todos os pontos da circunferência. Então, pela lei de Ampère:

$$(2\pi R)B = \mu_0 i$$

e daí:

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

Como o número de linhas de campo que atravessam uma superfície de área unitária perpendicular a essas linhas é proporcional à intensidade do campo local, as linhas de campo associadas ao campo magnético de um fio reto infinito são circunferências concêntricas ao fio e cada vez mais espaçadas (Fig. 16).

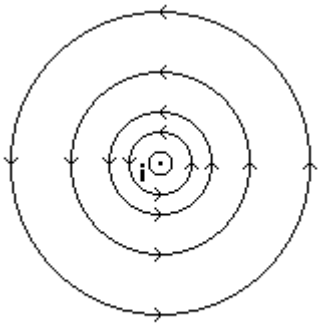


Fig.16

XII. SOLENOIDE

Um enrolamento helicoidal é chamado solenoide. A Fig. 17 representa as linhas do campo magnético de um solenoide. Como outro exemplo para a aplicação da lei de Ampère, consideremos um solenoide com n espiras por unidade de comprimento com uma corrente i. Se as espiras estiverem muito próximas e o solenoide for muito comprido, o campo magnético é uniforme e está confinado completamente ao seu interior (Fig. 18).

Pela simetria do problema, é conveniente escolher, para o cálculo da circulação, a linha ACDEA. A contribuição do segmento DE à circulação é zero porque o campo magnético é nulo fora do solenoide. A contribuição dos segmentos CD e EA também é zero ou porque o campo magnético é nulo fora do solenoide ou porque o campo magnético é perpendicular a esses segmentos na parte interior do solenoide. Assim, a única contribuição à circulação vem do segmento AC.

Agora, dividindo o segmento AC em N partes iguais, cada qual de comprimento L/N, e levando em conta que $\vec{B}_k$ é paralelo a $\Delta\vec{\ell}_k$ $(k = 1, 2, 3 \ldots N)$ vem, para a circulação do campo magnético ao longo da linha escolhida:

$$\sum_{k=1}^{N} \vec{B}_k \cdot \Delta\vec{\ell}_k = \sum_{k=1}^{N} B_k(\Delta\ell_k)\cos 0^o = B\sum_{k=1}^{N} \Delta\ell_k = BL$$

O número de espiras dentro da linha escolhida é nL, de modo que a corrente total que atravessa a espira é inL. A lei de Ampère garante, então, que:

$$B = \mu_0 in$$

Atividade

Com o objetivo de observar a configuração do campo magnético de um solenoide, pode-se tomar um fio condutor em forma helicoidal em série com 4 pilhas (fonte de tensão) e usar limalha de ferro como indicadora do campo magnético. Um arranjo experimental interessante pode ser construído com uma placa de acrílico (ou outro material plástico qualquer) com duas fileiras paralelas, separadas de uns 8 cm, com orifícios a cada meio centímetro, por onde passa o fio em forma helicoidal. A limalha de ferro é, então, colocada sobre a placa de acrílico.

Deve-se observar, novamente e sempre, que é conveniente colocar no circuito uma chave liga-desliga porque as quatro pilhas ficam em curto circuito quando ligadas ao solenoide. Como a temperatura do fio pode aumentar rapidamente devido à corrente que pode passar por ele, pode ser necessário interromper o circuito. De qualquer modo, se o diâmetro do fio for pequeno, com as especificações dadas acima o tempo que o fio leva para se aquecer pode ser suficiente para observar a configuração do campo magnético.

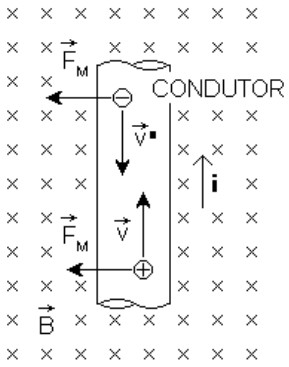


Fig. 19

XIII. FORÇA SOBRE UM CONDUTOR DE CORRENTE ELÉTRICA

Um fio condutor percorrido por corrente elétrica mergulhado numa região de campo magnético fica sob a ação de uma força que resulta da soma das forças magnéticas que atuam sobre as partículas carregadas em movimento que constituem a corrente (Fig. 19). Como $\vec{F} = q(\vec{v} \times \vec{B})$, a força magnética sobre uma partícula de carga negativa que se desloca numa direção tem a mesma direção e o mesmo sentido que a

força magnética sobre uma partícula de carga positiva que se desloca na direção oposta.

Seja o segmento de comprimento L de um fio condutor por onde circulam n_1 partículas de carga negativa por unidade de volume e n_2 partículas de carga positiva por unidade de volume. Assim, nesse segmento de comprimento L existem n_1LA cargas negativas e n_2LA cargas positivas, se A é a área da seção reta do fio condutor. A força resultante sobre o segmento tem módulo:

$$F = (n_1 + n_2)LAqvB$$

Mas, sendo a densidade de corrente:

$$J = \frac{i}{A} = (n_1 + n_2)qv$$

resulta:

$$F = iLB$$

e se $\vec{L}$ for um vetor de módulo L e direção e sentido dados pela corrente i, o vetor força resultante sobre o segmento de comprimento L pode ser escrito:

$$\vec{F} = i\vec{L} \times \vec{B}$$

Atividade

Para observar o efeito da força magnética sobre um segmento de fio condutor por onde passa uma corrente elétrica, pode-se montar um balancinho de fio condutor que oscila entre os polos de um imã (Fig. 20).

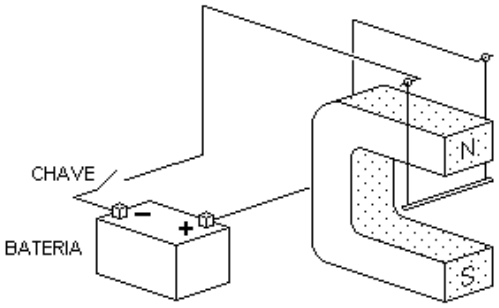


Fig.20

Ao se fechar a chave, aparece, no circuito, uma corrente elétrica que, no balancinho da figura, vem da direita para a esquerda. O campo magnético do imã vai do polo N para o polo S. Assim, a força magnética sobre o balancinho está direcionada no sentido de movê-lo para fora da região entre os polos. Invertendo-se o sentido da corrente elétrica (trocando as ligações do fio condutor nos terminais da bateria) e fechando-se a chave, a força magnética sobre o balancinho estará direcionada no sentido de movê-lo para dentro da região entre os polos do imã. A chave deve ficar fechada por um tempo pequeno porque, nessa situação, a bateria está em curto.

XIV. TORQUE SOBRE UMA ESPIRA RETANGULAR

Seja uma espira retangular ACDEA, percorrida por uma corrente i, mergulhada no campo magnético uniforme $\vec{B}$ de um imã permanente em forma de U (Fig. 21). O plano da espira forma um ângulo θ com a direção do campo. Nessas condições, a espira gira ao redor do seu eixo por efeito do torque resultante associado às forças $\vec{F}$ e $-\vec{F}$.

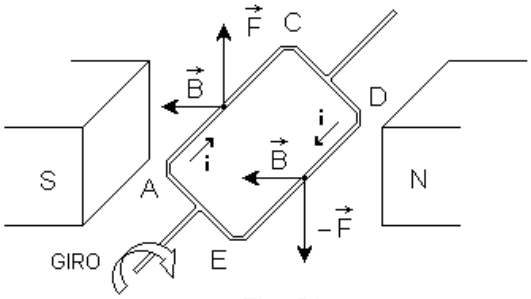


Fig. 21

Sobre cada um dos quatro lados da espira existe uma força magnética dada pela expressão $\vec{F} = i\vec{L} \times \vec{B}$, em que o vetor $\vec{L}$ tem módulo dado pelo comprimento do lado e direção e sentido dados pela corrente. Assim, as forças que atuam sobre os lados CD e EA cancelam-se mutuamente e são as forças sobre os outros dois lados que originam o torque resultante sobre a espira.

Suponhamos que os lados AC e DE têm comprimento d e os lados CD e EA, comprimento h. Como o torque de uma força $\vec{F}$ em relação a um ponto que se encontra a uma distância d do ponto de aplicação da força é dado pela expressão $\vec{\tau} = \vec{d} \times \vec{F}$, e como os torques associados às forças $\vec{F}$ e $-\vec{F}$ têm a mesma direção e o mesmo sentido (que é a direção do eixo da espira, no sentido de A para C), podemos escrever, para o módulo do torque resultante:

$$\tau = 2\left(\frac{h}{2}\right) idB(sen\ 90^o)\ sen\ \theta = ihdB\ sen\ \theta$$

Define-se o vetor momento de dipolo magnético $\vec{\mu}$ da espira percorrida pela corrente i pela expressão:

$$\vec{\mu} = iA\vec{n}$$

em que $A = hd$ é a área plana limitada pela espira e $\vec{n}$ é o vetor de módulo unitário, direção perpendicular ao plano da espira e sentido dado pelo polegar da mão direita quando os dedos desta mão seguem a corrente.

Sendo assim, segue-se, para o torque resultante sobre a espira de corrente:

$$\vec{\tau} = \vec{\mu} \times \vec{B}$$

Atividade

Para discutir o funcionamento de um motor elétrico de corrente contínua pode-se construir um motor bem simples com uma pilha, um imã permanente e fio condutor (Fig. 22).

As partes do fio condutor que são usadas para montar os suportes da bobina devem ter as extremidades desencapadas totalmente para o contato com a pilha e as extremidades da bobina.

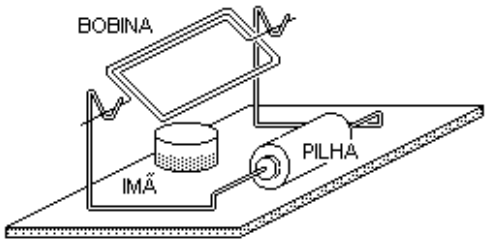


Fig.22

A parte do fio que é usada para construir a bobina deve formar muitas espiras e as extremidades, dobradas de modo que formem o eixo de rotação. Além disso, uma dessas extremidades deve ser completamente desencapada e a outra, apenas pela metade, de modo que passe corrente na bobina apenas durante metade de uma volta. O motor elétrico de corrente contínua funciona, basicamente, aproveitando o torque sobre a bobina na região de campo magnético.

XV. GALVANÔMETRO, AMPERÍMETRO E VOLTÍMETRO

O galvanômetro é um dispositivo utilizado, pela sua sensibilidade, para detectar e medir correntes elétricas (contínuas) de pequena intensidade e entra, como componente, nos amperímetros, usados para medir correntes elétricas mais intensas, e voltímetros, usados para medir diferenças de potencial elétrico.

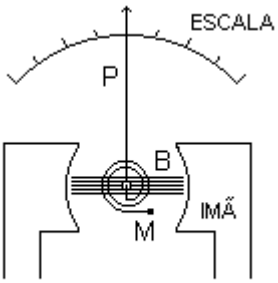


Fig.23

O galvanômetro também funciona aproveitando o torque sobre uma bobina numa região de campo magnético (Fig. 23). Um ponteiro P é montado fixo a uma bobina B que, por sua vez, é montada de modo a poder girar em torno de um eixo horizontal numa região de campo magnético gerado por um imã permanente em forma de U. Uma mola M, em espiral, exerce sobre a bobina um torque que equilibra o torque devido ao campo magnético. O vetor torque devido ao campo magnético é paralelo ao eixo de rotação da bobina e tem módulo e sentido que dependem, respectivamente, da intensidade e do sentido da corrente que circula na bobina, que é a corrente que se procura detectar ou medir.

Para que um galvanômetro possa ser utilizado para medir correntes elétricas mais intensas liga-se um resistor em paralelo (R na Fig. 24(a)), com o que ele passa a se chamar amperímetro. A resistência elétrica desse resistor deve ser muito menor do que a resistência interna do galvanômetro para que a corrente sobre este seja pequena e não o danifique.

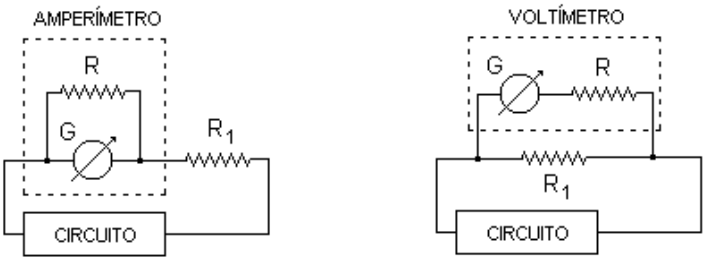


Fig.24(a) (b)

Para medir a corrente através do resistor R_1 de um dado ramo de um circuito, o amperímetro deve ser conectado em série nesse ramo. Para que a perturbação provocada pelo aparelho de medida sobre o ramo em questão seja pequena, ou seja, para que a corrente medida seja o mais próximo possível daquela que o ramo do circuito teria na ausência do amperímetro, a resistência interna desse amperímetro deve ser muito menor do que a resistência do resistor R_1.

Para que um galvanômetro possa ser utilizado para medir diferenças de potencial elétrico liga-se um resistor em série (R na Fig. 24(b)), com o que ele passa a se chamar voltímetro. Para medir a diferença de potencial através do resistor R_1 de um dado ramo de um circuito, o voltímetro deve ser conectado em paralelo nesse ramo. A resistência elétrica do resistor R deve ser muito grande comparada à resistência do resistor R_1 para que a corrente no voltímetro seja muito pequena. Isso garante que o galvanômetro não sofra qualquer dano e, ainda, que o próprio voltímetro não se constitua em elemento importante do circuito, de modo que o valor medido para a diferença de potencial através do resistor R_1 se aproxima do seu valor na ausência do aparelho de medida.

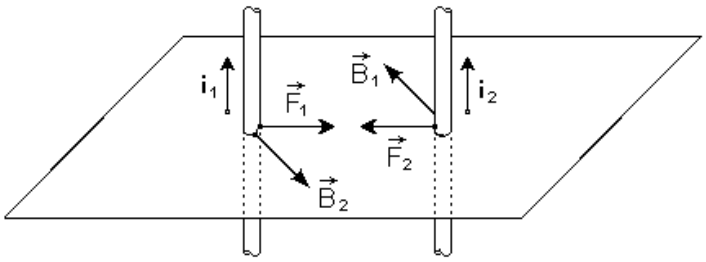


Fig. 25

XVI. FORÇA ENTRE CONDUTORES PARALELOS

Sejam dois fios condutores paralelos retos e infinitos percorridos pelas correntes elétricas i_1 e i_2 (Fig. 25). A corrente i_1 gera um campo $\vec{B}_1$ no fio com a corrente i_2, de modo que sobre um segmento de comprimento L deste fio existe uma força $\vec{F}_2$ e a

corrente i_2 gera um campo $\vec{B}_2$ no fio com a corrente i_1, de modo que sobre um segmento de comprimento L deste fio existe uma força $\vec{F}_1$. Essas duas forças têm a mesma direção, contida no plano dos fios e perpendicular a eles, e também o mesmo módulo:

$$F_1 = i_1 L B_2$$

e

$$F_2 = i_2 L B_1$$

Por outro lado:

$$B_1 = \frac{\mu_0 i_1}{2\pi d}$$

e

$$B_2 = \frac{\mu_0 i_2}{2\pi d}$$

de modo que resulta:

$$F_1 = F_2 = \frac{\mu_0 L}{2\pi d}\, i_1 i_2$$

Assim, essas forças $\vec{F}_1$ e $\vec{F}_2$ constituem um par ação-reação, conforme a terceira lei de Newton. Se as duas correntes elétricas têm o mesmo sentido, as forças atuam no sentido de aproximar os fios, e se as correntes elétricas têm sentidos opostos, as forças atuam no sentido de afastar os fios.

XVII. DEFINIÇÃO DE AMPÈRE

No SI, a unidade de corrente elétrica é o ampère, simbolizada por A. O ampère é a intensidade de uma corrente elétrica constante que, mantida em dois fios condutores paralelos, retilíneos, de comprimento infinito, de seção circular desprezível e situados à uma distância de um metro entre si, no vácuo, faz com que um fio exerça no outro uma força de módulo igual a $2 \times 10^{-7}\ N$ para cada seção de fio de um metro de comprimento.

XVIII. LEI DE FARADAY

Segundo a lei de Faraday, se o fluxo do campo magnético através da superfície limitada por um circuito varia com o tempo, aparece nesse circuito uma força eletromotriz (fem) induzida. Matematicamente:

$$\varepsilon = -\frac{\Delta\phi}{\Delta t}$$

O sinal negativo que aparece nessa expressão representa matematicamente a lei de Lenz. Esta lei está relacionada ao princípio de conservação da energia, conforme se discute adiante.

Deve-se observar que o nome força eletromotriz, dado a essa grandeza, é mantido por questões históricas. Essa grandeza não representa fisicamente uma força, mas uma diferença de potencial elétrico. Assim, tem como unidade no SI, o volt (V).

Atividade

Para estudar a lei de Faraday pode-se mover um imã permanente em forma de barra em relação a uma espira ligada a um amperímetro A (Fig. 26(a)). Conforme o movimento do imã em relação à espira, se de aproximação ou afastamento, o sentido da corrente muda. Além disso, conforme a velocidade relativa, a intensidade da corrente varia: quanto maior a velocidade, maior a intensidade da corrente.

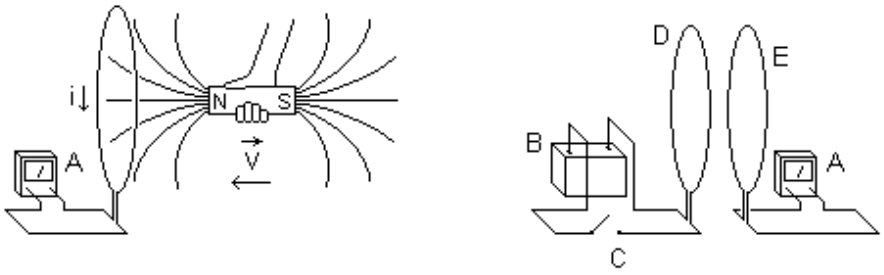


Fig.26(a) (b)

Pode-se também fazer variar a corrente em uma espira D ligada a uma bateria B, ligando e desligando uma chave C colocada em série no circuito e observar a corrente em espira E próxima ligada a um amperímetro A (Fig. 26(b)). A corrente na espira E só aparece nos instantes que se seguem aos atos de ligar e desligar a chave no circuito da espira D e, em cada caso, com um sentido diferente. Enquanto a chave no circuito da espira D permanecer desligada ou ligada, não aparece corrente na espira E.

Exemplo

Como exemplo de aplicação da lei de Faraday pode-se calcular a fem induzida em uma espira retangular que se movimenta entrando ou saindo, com velocidade constante, de uma região de campo magnético uniforme (Fig. 27).

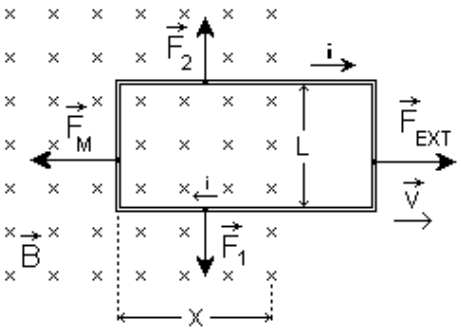


Fig.27

A área da parte da espira que está na região de campo magnético é xL e como o campo é uniforme, o fluxo do campo magnético através da superfície limitada pela espira vale:

$$\phi = xLB$$

Agora, levando em conta que L e B são constantes e que $\Delta x/\Delta t = v$, tem-se, para a variação do fluxo no tempo:

$$\frac{\Delta\phi}{\Delta t} = \frac{\Delta(xLB)}{\Delta t} = \frac{\Delta x}{\Delta t}\, LB = vLB$$

e pela lei de Faraday:

$$\varepsilon = vLB$$

Se a espira tem uma resistência R, a corrente induzida é:

$$i = \frac{\varepsilon}{R} = \frac{vLB}{R}$$

Deve-se observar novamente que esta corrente induzida na espira existe apenas em dois intervalos de tempo: enquanto a espira está entrando na região de campo magnético e enquanto está saindo. Apenas durante estes intervalos de tempo o fluxo magnético através da superfície limitada pela espira varia.

Um condutor percorrido por corrente elétrica mergulhado numa região de campo magnético fica sujeito a uma força dada por $\vec{F} = i\vec{L} \times \vec{B}$. Assim, por efeito da corrente induzida na espira aparecem as forças $\vec{F}_1$, $\vec{F}_2$ e $\vec{F}_M$. As duas primeiras cancelam-se mutuamente e a terceira é cancelada por uma força externa, $\vec{F}_{EXT}$, necessária para manter a espira com velocidade constante. Como a força $\vec{F}_M$ deve se opor à força $\vec{F}_{EXT}$, a corrente induzida na espira pela variação do fluxo magnético tem o sentido indicado na Fig. 27. Esse fato constitui um exemplo particular de aplicação da lei de Lenz.

XIX. LEI DE LENZ

Segundo a lei de Lenz, o sentido de qualquer corrente induzida é tal que o campo magnético que ela gera se opõe à variação do fluxo magnético que a produziu. Matematicamente, a lei de Lenz é expressa pelo sinal negativo na expressão da Lei de Faraday. Para entender o conteúdo físico da lei de Lenz, pode-se considerá-la no contexto da atividade proposta com a lei de Faraday.

Quando um imã se aproxima de uma espira (Fig. 26(a)), a corrente induzida na espira tem o sentido indicado na figura porque, assim, gera um campo magnético cujo polo norte se confronta com o polo norte do imã. Os dois polos se repelem e o campo magnético gerado pela corrente induzida na espira se opõe ao movimento do imã. Quando o imã é afastado da espira, a corrente induzida na espira tem sentido contrário àquele indicado na figura porque, assim, gera um campo magnético cujo polo sul se confronta com o polo norte do imã. Os dois polos se atraem e o campo magnético gerado pela corrente induzida na espira se opõe ao movimento de afastamento do imã.

Se duas espiras são colocadas frente a frente (Fig. 26(b)), não existe corrente em qualquer uma delas. Contudo, no instante em que a chave é fechada, surge uma corrente na espira D e uma corrente induzida na espira E. Ao se fechar a chave, a corrente na espira D cresce de zero até seu valor máximo e, a partir daí, permanece constante. Enquanto esta corrente varia, o campo magnético que ela gera, com polo norte confrontando a espira E, também varia e também varia o fluxo desse campo magnético através da espira E. Por isso, aparece uma corrente induzida na espira E com sentido tal que o campo magnético que ela gera tende a diminuir o fluxo do campo

magnético da espira D, ou seja, apresenta um polo norte confrontando o polo norte do campo magnético gerado pela espira D. A partir do instante em que a corrente na espira D atinge seu valor máximo e fica constante, o campo magnético que ela gera também fica constante e também fica constante o fluxo desse campo magnético através da espira E. Nessas condições, não existe corrente induzida na espira E. Quando a chave é aberta, a corrente na espira D cai a zero, a intensidade do campo magnético gerado por ela diminui e o fluxo desse campo magnético através da espira E também diminui. A corrente induzida na espira E tem, agora, sentido contrário, gerando um campo magnético que se soma ao campo magnético da espira D, ou seja, apresenta um polo sul confrontando o polo norte do campo magnético da espira D.

O fato expresso na lei de Lenz, de que qualquer corrente induzida tem um efeito que se opõe à causa que a produziu, é uma realização, nesse contexto, do princípio de conservação da energia. Se a corrente induzida atuasse no sentido de favorecer a variação do fluxo magnético que a produziu, o campo magnético da espira (Fig. 26(a)) teria um polo sul confrontando o polo norte do imã que se aproxima, com o que o imã seria atraído no sentido da espira. Se o imã fosse, então, abandonado, seria acelerado em direção à espira, aumentando a intensidade da corrente induzida, que geraria um campo cada vez maior que, por sua vez, atrairia o imã com uma força cada vez maior, e assim sucessivamente, com um aumento cada vez maior na energia cinética do imã. Se fosse retirada energia do sistema imã-espira na mesma taxa com que a energia cinética do imã aumenta, haveria um fornecimento infindável de energia às custas do nada. Um dispositivo que operasse desse modo seria um moto-perpétuo. Tal dispositivo não pode existir porque seria violado o princípio da conservação da energia.

XX. GERADORES

Um gerador tem, como elementos básicos, um imã permanente em forma de U, uma espira e um coletor. A espira gira ao redor do seu eixo com velocidade angular constante por alguma causa mecânica, na região de campo magnético entre o polo N e o polo S do imã permanente. O fluxo magnético através da superfície limitada pela espira varia com o tempo. Pela lei de Faraday, essa variação do fluxo magnético faz aparecer, na espira, uma corrente elétrica induzida. A corrente elétrica induzida pode ser alternada (Fig. 28(a)) ou contínua (Fig. 28(b)), conforme o tipo de coletor, ou seja, conforme o modo como a espira é ligada ao circuito externo.

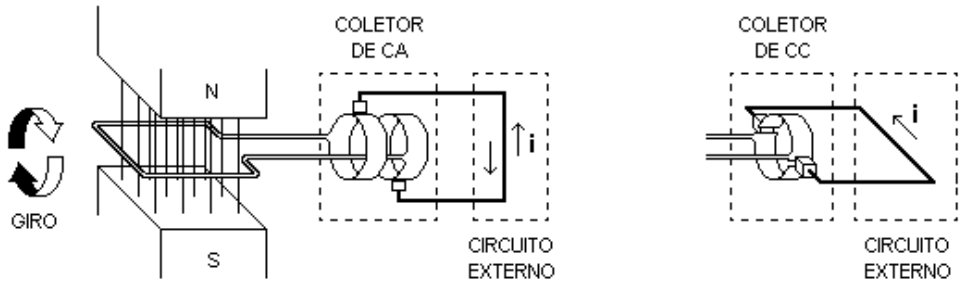


Fig.28(a) (b)

Os geradores industriais, por questões de eficiência, têm, em lugar de uma espira, como no exemplo discutido acima, vários conjuntos de enrolamentos ligados em série e fazendo entre si ângulos constantes, cada enrolamento, por sua vez, sendo constituído por um grande número de espiras. O coletor, nessas condições, deve também ser construído apropriadamente.

Questão para Discussão

A Fig. 29 representa oito posições sucessivas (a, b, c, d, e, f, g e h) da espira que aparece na Fig. 28(a). A Fig. 30(a) representa o correspondente gráfico da corrente induzida na espira.

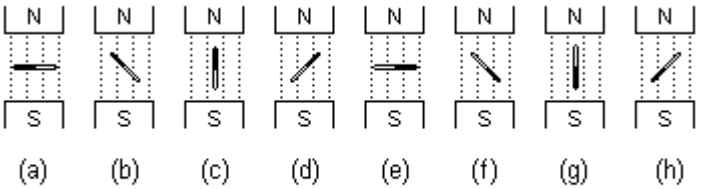


Fig.29

Considerando que a espira gira com velocidade angular constante ao redor do seu eixo, pode-se avaliar a variação do fluxo magnético através da espira e o sentido e a intensidade da corrente induzida para as situações representadas e, então, convencer-se da validade do gráfico da Fig. 30(a).

A corrente elétrica induzida na espira pode ser escrita:

$$i = i_0 \, sen \, \omega t$$

em que i_0 representa a corrente máxima e ω representa a frequência angular da espira, relacionada à sua frequência f, ou seja, ao número de voltas dadas por segundo, pela expressão:

$$f = \frac{\omega}{2\pi}$$

A Fig. 30(b) mostra o gráfico da corrente induzida na espira com o coletor representado na Fig. 28(b) e para as mesmas posições representas na Fig. 29.

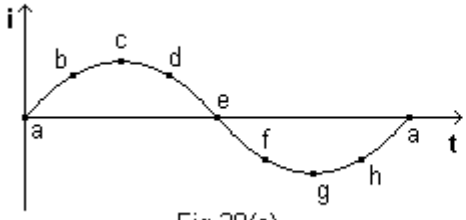
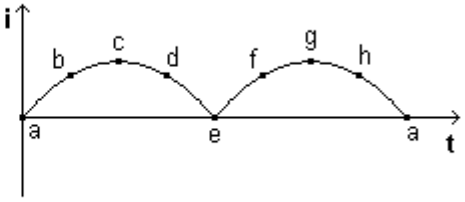


Fig.30(a)



(b)

Esta corrente não é uma corrente contínua porque flutua com o tempo, mas é uma corrente unidirecional. Contudo, pode-se diminuir as flutuações e conseguir uma corrente praticamente contínua se, em lugar de uma espira, forem usadas muitas delas fazendo entre si ângulos constantes, ligadas em série e conectadas convenientemente a um número correspondente de segmentos no coletor. A Fig. 31 representa a corrente induzida em duas espiras ligadas em série e fazendo um ângulo de 90° uma com a outra. A corrente induzida nas espiras pode ser considerada como a soma das correntes induzidas em cada espira individualmente.

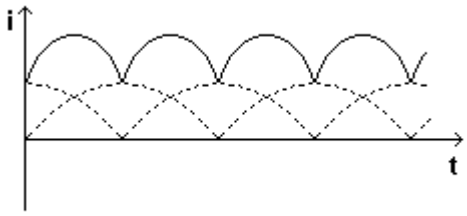


Fig. 31

Nesta figura, as correntes em cada espira estão representadas pelas curvas pontilhadas e a sua soma está representada pela curva contínua. Como as espiras fazem um ângulo reto uma com a outra, quando a corrente induzida numa é máxima, a corrente induzida na outra é nula.

Questão para Discussão

Os geradores têm funcionamento inverso ao dos motores. Enquanto que, nos primeiros, uma certa quantidade de energia mecânica, por exemplo, é transformada em energia elétrica, nos segundos, uma certa quantidade de energia elétrica é transformada em energia mecânica.

XXI. TENSÃO EFICAZ E CORRENTE EFICAZ

Seja uma corrente alternada na forma:

$$i = i_0 \, sen \, \omega t$$

em que i_0 representa a corrente máxima e ω representa a frequência angular, relacionada à frequência f pela expressão:

$$f = \frac{\omega}{2\pi}$$

A potência dissipara num resistor de resistência R, através do qual passa esta corrente, é dada por:

$$P = i^2 R = {i_0}^2 R \, sen^2 \, \omega t$$

Usualmente, o interesse recai sobre o valor médio da potência dissipada calculado para um intervalo de tempo igual a um período. Para um intervalo de tempo igual a um período, o valor médio do quadrado da função seno é igual ao valor médio do quadrado da função cosseno, de modo que a relação trigonométrica:

$$sen^2 \, \theta + cos^2 \, \theta = 1$$

permite escrever que o valor médio do quadrado da função seno é igual a $1/2$. Assim, o valor médio da potência dissipada calculado para um intervalo de tempo igual a um período é:

$$\bar{P} = \frac{{i_0}^2 R}{2}$$

Com o objetivo de expressar essa potência média dissipada por um resistor através do qual passa uma corrente alternada por uma expressão análoga àquela que expressa a potência dissipada por um resistor através do qual passa uma corrente contínua ($P = i^2 R$), define-se uma corrente eficaz i_E por:

$$i_E = \frac{i_0}{\sqrt{2}}$$

A potência média dissipada fica, então:

$$\bar{P} = {i_E}^2 R$$

A corrente elétrica medida nos circuitos de corrente alternada é, usualmente, a corrente eficaz. Assim, por exemplo, quando aparece, em algum aparelho elétrico ou eletrônico, a indicação da corrente de operação que ele suporta, o aviso se refere à corrente eficaz. De modo análogo, quando aparece, em algum aparelho elétrico ou eletrônico, a indicação da tensão (diferença de potencial) de operação que ele suporta ($110\ V$ ou $220\ V$), o aviso se refere à tensão eficaz fornecida pelas tomadas às quais ele pode ser ligado.

XXII. TRANSFORMADORES

Quando, entre dois pontos de um circuito elétrico mantidos a uma diferença de potencial V circula uma corrente i, o dispositivo que sustenta essa diferença de potencial (um gerador, uma bateria, etc.) fornece, às partículas carregadas cujo movimento constitui a corrente, energia elétrica a uma potência P dada por:

$$P = Vi$$

Pelo princípio de conservação da energia, a energia elétrica recebida pelas partículas em questão deve ser transformada em outras formas de energia, conforme o tipo de elemento ligado entre os dois pontos considerados. Se o elemento for um motor elétrico, por exemplo, a quase totalidade da energia elétrica é transformada em energia cinética de rotação das peças que giram, se for um acumulador, como uma bateria de automóvel ou uma bateria de telefone celular que estejam sendo carregadas, a energia elétrica é transformada em energia química e se for um resistor, como num chuveiro ou num aquecedor elétrico, a energia elétrica é transformada totalmente em energia interna do material que o constitui, com o que sua temperatura aumenta. Esse aumento de temperatura num resistor quando, por ele, passa uma corrente elétrica, é chamado efeito Joule. Para um resistor de resistência R, percorrido por uma corrente i, a quantidade de energia potencial elétrica transformada em energia interna por unidade de tempo ou, como se diz, a potência dissipada P, é dada por:

$$P = i^2 R$$

A transmissão da energia elétrica desde a usina geradora até os locais de consumo é realizada por meio de fios condutores, que são elementos resistivos, de modo que parte dessa energia é perdida, dissipada por efeito Joule. Como a potência dissipada por efeito Joule é proporcional ao quadrado da corrente elétrica, para que essas perdas sejam menores é conveniente reduzir a corrente nas linhas de transmissão. Além disso, como a usina geradora fornece energia elétrica às linhas de transmissão a uma potência dada pelo produto da tensão pela corrente, uma redução na corrente que passa pelas linhas de transmissão implica em um aumento proporcional na tensão. Assim, as linhas de transmissão usualmente transportam energia elétrica a altas tensões.

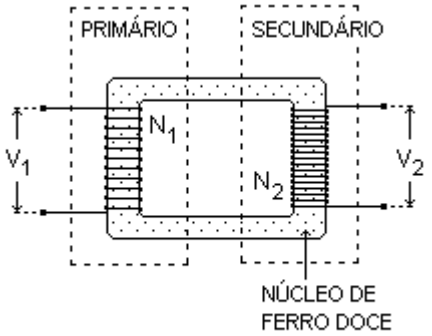


Fig. 32

O transformador (Fig. 32) é o dispositivo que permite transformar uma alta corrente a baixa tensão em uma baixa corrente a alta tensão e vice-versa. O uso de correntes alternadas é quase universal porque o transformador só funciona para correntes que variam no tempo. Um transformador é constituído de dois enrolamentos (bobinas) de fio condutor de eletricidade sobre um mesmo núcleo de ferro doce. A corrente que circula no enrolamento primário, com N_1 voltas, cria um campo magnético cujas linhas de campo percorrem todo o núcleo de ferro. Como esta corrente é alternada, ou seja, varia no tempo, o fluxo do campo magnético criado varia no tempo de modo que, no enrolamento secundário, com N_2 voltas, aparece uma corrente induzida. No primário e no secundário, as correspondentes tensões são:

$$V_1 = N_1 \frac{\Delta\phi}{\Delta t}$$

e

$$V_2 = N_2 \frac{\Delta\phi}{\Delta t}$$

de modo que:

$$V_2 = \left(\frac{N_2}{N_1}\right) V_1$$

Assim, o transformador permite aumentar ou diminuir o valor de uma tensão eficaz até o valor desejado pela escolha apropriada dos números de voltas N_1 e N_2 nos enrolamentos primário e secundário.

Questão para Discussão

O funcionamento de um transformador se baseia na lei de Faraday. Isso significa que o fluxo magnético deve ser variável, ou seja, o transformador só funciona com corrente alternada.

XXIII. CORRENTES DE FOUCAULT

Se o fluxo de campo magnético que atravessa uma chapa metálica varia no tempo, aparecem nesta chapa correntes induzidas, chamadas correntes de Foucault (Fig. 33(a)).

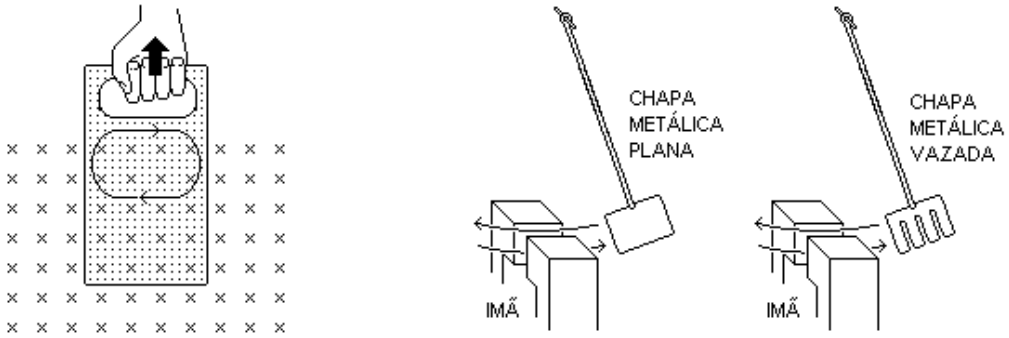


Fig. 33(a) (b)

Pela lei de Lenz, o sentido dessas correntes é tal que o campo magnético gerado por elas tem efeito no sentido de manter constante o fluxo magnético. Se a chapa está entrando na região de campo, aparece uma força que tende a impedi-la de entrar nessa região, e se a chapa está saindo da região de campo, aparece uma força que tende a impedi-la de sair dessa região.

Atividade

Com o objetivo de observar os efeitos das correntes de Foucault, pode-se construir dois pêndulos, um deles fixando uma vareta numa chapa plana e outro, fixando uma vareta numa chapa vazada (Fig. 33(b)). Se o primeiro pêndulo é posto a oscilar de modo que a chapa plana passe entre os polos N e S de um imã permanente em forma de U, pode-se observar um rápido amortecimento das oscilações. Se o segundo pêndulo é posto a oscilar de modo que a chapa vazada passe entre os polos N e S do imã permanente em forma de U, pode-se observar um amortecimento muito mais lento das oscilações.

XXIV. PROPRIEDADES MAGNÉTICAS DA MATÉRIA

Como não existem monopolos magnéticos, isto é, partículas às quais se possa associar apenas um polo magnético, a estrutura com efeitos magnéticos mais simples é uma partícula com um momento de dipolo magnético, ou seja, uma partícula que se comporta como um pequeno imã. Assim, o elétron tem um momento de dipolo magnético intrínseco que se supõe associado ao seu spin. Por outro lado, como uma

espira com uma corrente elétrica (convencional) tem um momento de dipolo magnético com direção perpendicular ao plano da espira e sentido dado pela regra da mão direita (Fig. 34(a)), por analogia, um elétron numa órbita atômica tem um momento de dipolo magnético orbital perpendicular ao plano da órbita mas com sentido contrário àquele dado pela regra da mão direita (Fig. 34(b)).

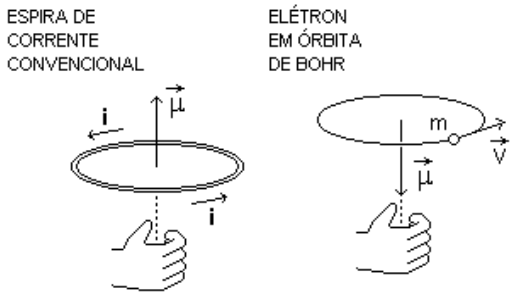


Fig. 34(a) (b)

O momento de dipolo magnético total de uma amostra de uma dada substância por unidade de volume é o que se chama de magnetização dessa substância. As substâncias são classificadas em vários grupos conforme seus comportamentos quando em presença de um campo magnético externo, ou seja, conforme a sua magnetização. Aqui são discutidos apenas os três grupos básicos, ou seja, as substâncias diamagnéticas, paramagnéticas e ferromagnéticas, e isso numa visão semiclássica que dá apenas uma ideia grosseira do que está acontecendo. Os comportamentos das substâncias quando em presença de um campo magnético externo só podem ser plenamente compreendidos no contexto da Mecânica Quântica.

Diamagnetismo

O diamagnetismo está associado aos momentos de dipolo magnéticos orbitais dos elétrons nos átomos ou moléculas que constituem a substância em questão. Por isso, está presente em todas as substâncias, embora, na maioria, com uma intensidade tão pequena que sua presença é mascarada por outros comportamentos. Nos supercondutores, parece que o diamagnetismo é forte o suficiente para que o campo magnético resultante no interior da amostra seja nulo.

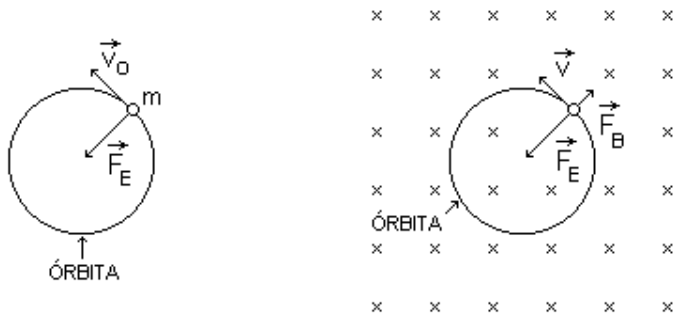


Fig. 35(a) (b)

Ao aplicar um campo magnético a uma substância qualquer, cada elétron que se move nos átomos ou moléculas fica sujeito a uma força adicional que provoca uma

perturbação no seu movimento, equivalente a uma velocidade adicional e, portanto, uma mudança no seu momento de dipolo magnético orbital. Um elétron de massa m e velocidade de módulo v_0 (Fig. 35(a)) numa órbita atômica circular de raio R está sob a ação de uma força centrípeta de origem elétrica de módulo:

$$F_E = m\,\frac{{v_0}^2}{R}$$

No caso da Fig. 35(a), o momento de dipolo magnético orbital é um vetor que aponta para dentro da página, perpendicularmente a ela.

Com um campo magnético externo (Fig. 35(b)), o raio da órbita do elétron não muda, apesar de atuar, sobre ele, uma força magnética sempre perpendicular à sua velocidade, de módulo $F_B = evB$, de modo que agora o elétron se move sob a ação de uma força centrípeta de módulo:

$$m\,\frac{v^2}{R} = m\frac{{v_0}^2}{R} \mp evB$$

O sinal superior vale no caso representado (Fig. 35(b)) e o sinal inferior, no caso em que o elétron se desloca no sentido contrário.

Mesmo um campo magnético externo muito intenso perturba muito pouco a órbita de um elétron. Então, v difere muito pouco de v_0 e pode-se escrever $v = v_0 + \Delta v$ com $\Delta v << v_0$. Substituindo esta expressão na de cima e desprezando os termos da ordem de $(\Delta v)^2$ e $B\Delta v$, vem:

$$\Delta v = \mp\,\frac{eRB}{2m}$$

Portanto, em primeira aproximação:

$$v = v_0 \mp\,\frac{eRB}{2m}$$

Assim, os módulos da velocidade e do momento de dipolo magnético diminuem para um elétron que se move conforme a Fig. 35(b) e aumentam para um elétron que se move em sentido contrário. Além disso, como, no primeiro caso, o momento de dipolo magnético é paralelo ao campo magnético externo e no segundo caso, antiparalelo, a aplicação desse campo numa substância de momento de dipolo magnético resultante nulo induz, na substância, um momento de dipolo magnético de sentido contrário ao do campo. Portanto, a substância é repelida pelo imã que cria o campo.

Paramagnetismo

Átomos ou moléculas com camadas atômicas incompletas, como no caso dos elementos de transição, das terras raras e dos actinídeos, têm momentos de dipolo magnéticos permanentes devido aos momentos de dipolo magnéticos intrínsecos (associados aos spins) dos elétrons dessas camadas. As substâncias compostas de tais átomos ou moléculas são paramagnéticas. A presença de um campo magnético externo produz um torque que tende a alinhar os momentos de dipolo magnéticos na mesma direção do campo, causando o aparecimento de uma certa magnetização. Nos metais, o paramagnetismo é também devido a um alinhamento dos momentos de dipolo

magnéticos associado aos spins dos elétrons de condução. O alinhamento não é perfeito devido às colisões entre os átomos ou moléculas, se a substância está na fase gasosa, ou devido às vibrações microscópicas associadas à energia interna, se está na fase sólida. A substância adquire, então, uma magnetização, quando colocada num campo magnético externo, muito menor do que a máxima possível. Portanto, a substância é atraída pelo imã que cria o campo com uma pequena força.

Ferromagnetismo

As substâncias ferromagnéticas têm uma magnetização permanente que surge da tendência natural de alinhamento dos momentos de dipolo magnéticos permanentes de seus átomos ou moléculas, tendência esta que é fruto de suas interações mútuas. O resultado dessas interações é um alinhamento perfeito dos momentos de dipolo magnéticos em regiões chamadas domínios, cujas dimensões vão de 10 a $0{,}001\ mm^3$.

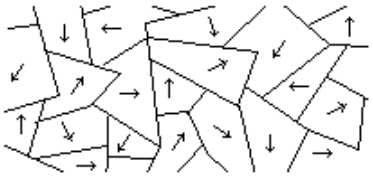


Fig. 36

Como a direção de alinhamento é diferente de um domínio para outro (Fig. 36), a magnetização da substância pode ser nula ou muito pequena. Isso acontece, por exemplo, com um pedaço de ferro não magnetizado. Num campo magnético externo ocorre o aumento de tamanho dos domínios favoravelmente orientados às custas dos demais e o desvio angular dos momentos de dipolo magnéticos de cada domínio, tendendo a um melhor alinhamento com o campo externo. O resultado final é uma grande magnetização e a substância transforma-se num imã.

Por outro lado, devido ao efeito desalinhador das vibrações microscópicas associadas à energia interna, para cada substância ferromagnética existe uma temperatura, chamada temperatura de Curie, acima da qual a substância se torna paramagnética. À temperatura ambiente são ferromagnéticos o ferro, o níquel, o cobalto e o gadolínio, com temperaturas de Curie de 770 °C, 365 °C, 1075 °C e 15 °C, respectivamente.