

1: Os três fenômenos eletromagnéticos

1º) Uma corrente elétrica, passando por um condutor, produz um campo magnético ao redor do condutor, como se fosse um ímã;

2º) Um condutor, percorrido por corrente elétrica, colocado em um campo magnético, fica sujeito a uma força;

3º) Suponhamos um condutor fechado, colocado em um campo magnético; a superfície determinada pelo condutor é atravessada por um fluxo magnético; se, por uma causa qualquer esse fluxo variar, aparecerá no condutor uma corrente elétrica; esse fenômeno é chamado indução eletromagnética.

2: Experiência de Oersted

Em 1819 o físico dinamarquês Oersted observou que, quando a agulha de uma bússola é colocada próxima de uma corrente elétrica, essa agulha é desviada de sua posição (fig. 264). Ora, uma agulha magnética, suspensa pelo centro de gravidade, só entra em movimento quando está em um campo magnético. O deslocamento da agulha só se explica pela formação de um campo magnético em torno do condutor percorrido por corrente elétrica. Foi essa a primeira vez que se observou o aparecimento de um campo magnético juntamente com uma corrente elétrica.

O leitor pode fazer a seguinte observação: quando um bonde passa a muitos metros de uma agulha imantada, faz a agulha oscilar. Isso porque a corrente que passa no fio "trolley" produz um campo magnético que atinge a agulha ("trolley" é o fio no qual desliza a "alavanca" do bonde).

A figura abaixo mostra como se pode realizar a experiência de Oersted: um condutor retilíneo horizontal é colocado paralelamente a uma agulha imantada. Esse condutor é ligado em série com os seguintes elementos: um acumulador,

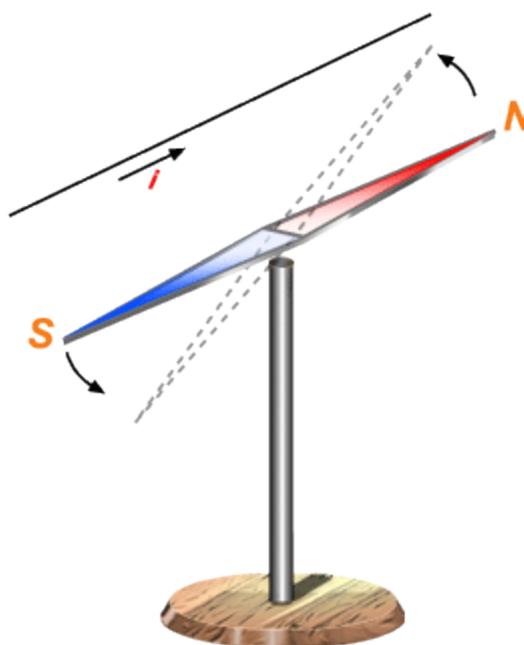


Figura 264

Autor: Roberto A. Salmeron

que fornece corrente; um reostato, que controla a intensidade da corrente; e uma “chave” (interruptor), para abrir e fechar o circuito. Inicialmente, esta chave está aberta, e a agulha se mantém paralela ao condutor (figura a). Quando se fecha a chave, passa corrente, produz-se o campo magnético, e a agulha é desviada (figura b).

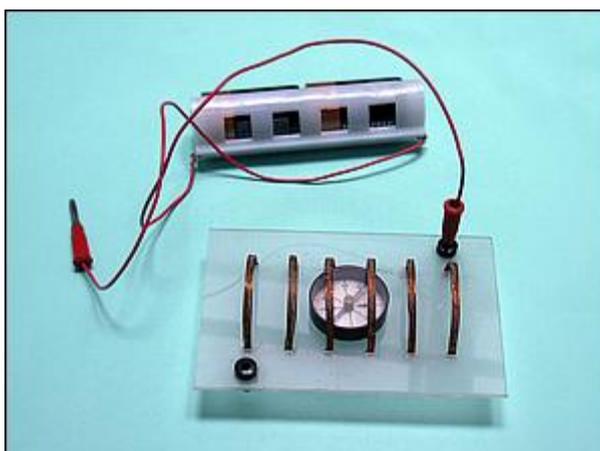


Figura 265-a

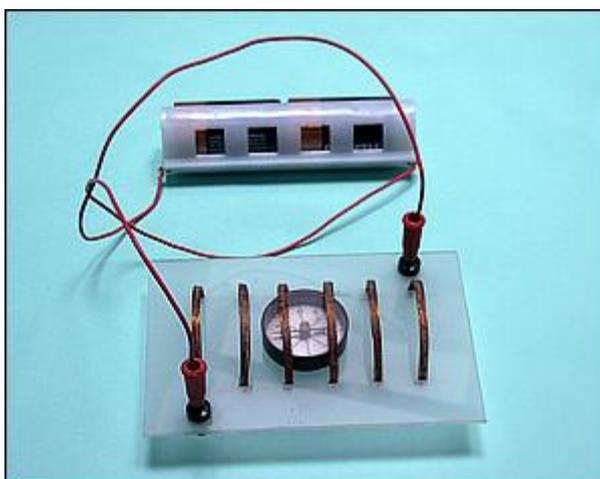


Figura 265-b

3: Sentido do vetor campo magnético

Analogamente ao caso de campo magnético criado por um ímã, quando o campo magnético é criado por corrente elétrica podemos determinar o módulo, a direção e o sentido do vetor campo, \vec{H} , em um ponto. O cálculo do módulo será dado no parágrafo seguinte. Vejamos a direção e o sentido. Sabemos que, quando uma massa magnética norte é colocada em um campo magnético, o sentido da força que atua nessa massa é o próprio sentido do campo (fig. 266-a); e, quando uma massa magnética sul é colocada num campo magnético, o sentido da força que atua é oposto ao sentido do campo (fig. 266-b).

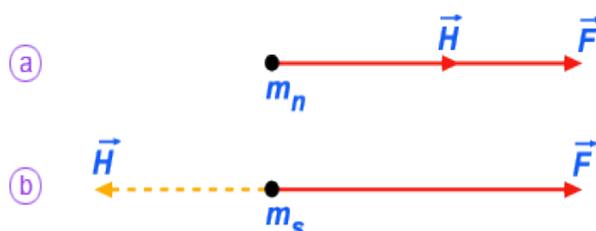


Figura 266

Concluimos que regra prática para sabermos o sentido do campo magnético em um ponto é verificarmos o sentido em que se desloca uma massa magnética **norte** colocada nesse ponto. Entre as diversas regras práticas existentes para assinalar esse sentido, existem a do observador de Ampère, a do saca-rolhas, de Maxwell, e a da mão direita.

a. Regra do observador, de ampère

Imaginemos um observador olhando para um ponto A, colocado paralelamente à corrente, de tal maneira que a corrente entre pelos pés e saia pela cabeça. Um polo norte, colocado nesse ponto A, gira para a esquerda do observador. Esse é o sentido do campo no ponto A (fig. 267).

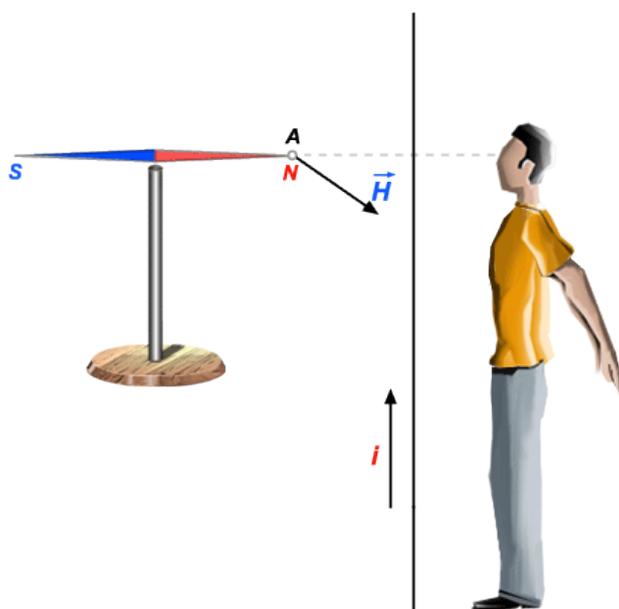


Figura 267

b. Regra do saca-rolhas, de Maxwell

Pode ser aplicada de duas maneiras:

1ª) Se o condutor é retilíneo, imagine o saca-rolhas avançando no sentido da corrente e com a ponta do cabo num ponto A; o sentido de rotação do cabo é o sentido do campo no ponto A (fig. 268-a).

2ª) Se o condutor é curvo, por exemplo, circular, imagine o saca-rolhas girando no sentido da corrente; então ele avança no sentido do campo (fig. 268-b).

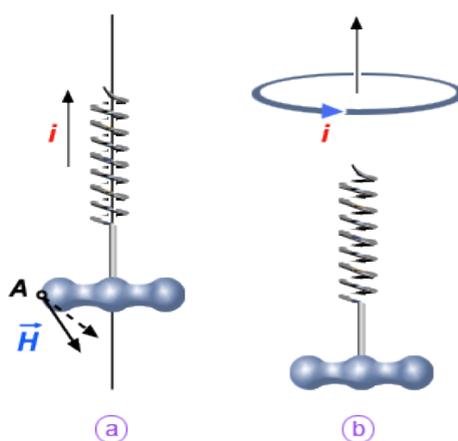


Figura 268

c. Regra da mão direita

Também pode ser aplicada de dois modos:

1ª) Se o condutor é retilíneo, imagine o polegar da mão direita esticado e apontando no sentido da corrente, e os outros quatro dedos fechados sobre o condutor. Então esses quatro dedos acompanham o sentido do campo (fig. 269).

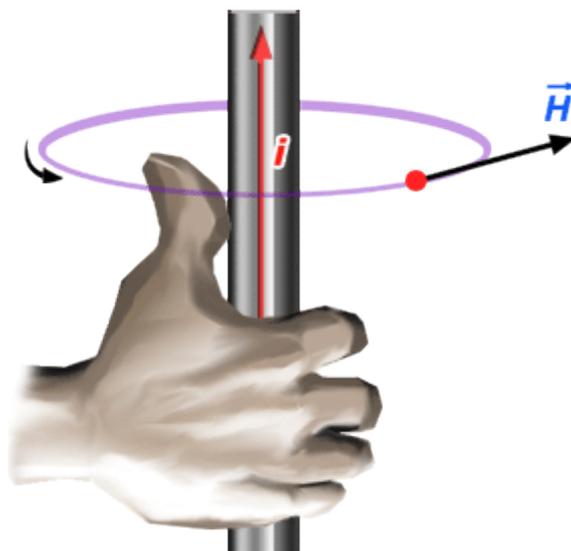


Figura 269

2ª) Se o condutor é curvilíneo, imagine os quatro dedos da mão direita acompanhando o sentido da corrente; então o polegar esticado indica o sentido do campo.

Autor: Roberto A. Salmeron

4: Exemplos de campos magnéticos criados por correntes elétricas

1º - Campo criado por condutor retilíneo

Seja uma corrente elétrica de intensidade i atravessando um condutor retilíneo. Suponhamos que esse condutor seja atravessado por um cartão, colocado perpendicularmente a ele (fig. 270). Colocando limalha de ferro sobre o cartão, essa limalha se orientará no campo magnético segundo as linhas de força do campo. Observamos que a limalha de ferro se distribui segundo circunferências concêntricas, cujo centro está no próprio condutor. Isso mostra que as linhas de força do campo magnético criado pelo condutor retilíneo são circunferências concêntricas, com o centro no próprio condutor.

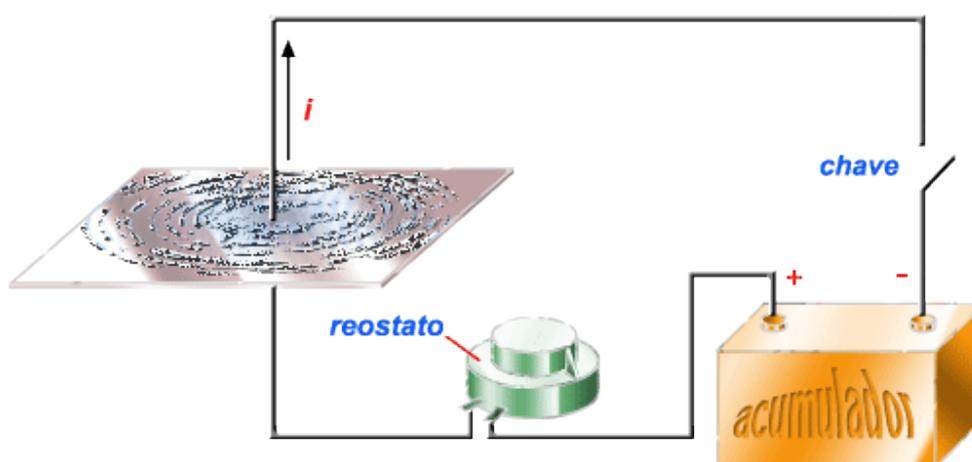


Figura 270

Num ponto A qualquer o vetor campo \vec{H} tem o sentido que concorda com o sentido das linhas de força, e é dado pela regra do saca-rolhas, de Maxwell, ou pela do observador, de Ampère, ou da mão direita. A figura 271 mostra as linhas de força do campo criado por condutor retilíneo, vistas de cima; o sentido assinalado supõe que a corrente saia do papel.

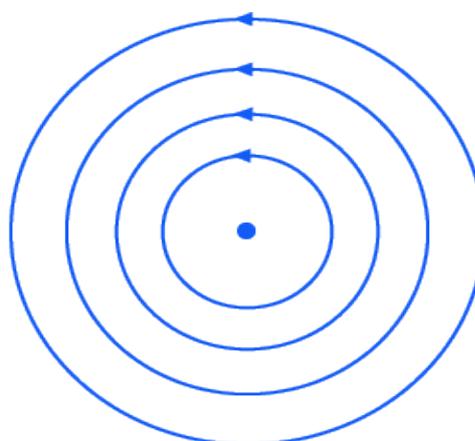


Figura 271

A figura 270 mostra como podem ser obtidos os espectros magnéticos dos campos criados por correntes: o condutor é colocado em série com um

Autor: Roberto A. Salmeron

acumulador, que fornece corrente; um reostatato, que controla a corrente; e uma chave, que abre e fecha o circuito.

2º - Campo criado por condutor circular

Suponhamos um condutor circular com corrente de intensidade i . Essa corrente produz um campo magnético. Para determinar a forma das linhas de força, atravessamos o condutor por um cartão, e sobre o cartão colocamos limalha de ferro. A disposição do pó de ferro dá o aspecto das linhas de força. Observamos que a limalha se distribui por circunferências concêntricas cujos centros são os pontos A e B, onde o condutor fura o cartão (fig. 272).

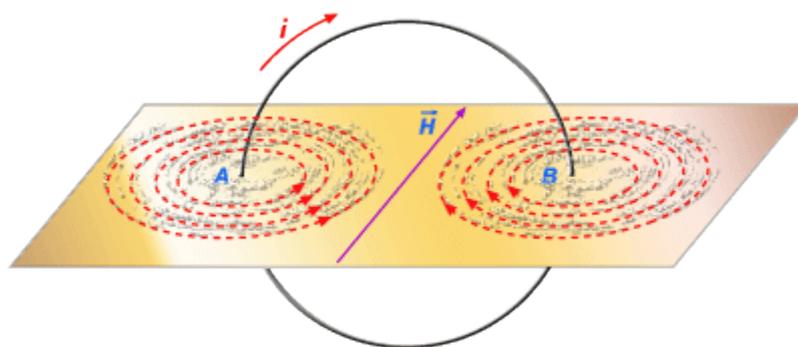


Figura 272

Os sentidos das linhas de força podem ser obtidos pela aplicação da regra do saca-rolhas; observemos que no plano do círculo, todas as linhas de força têm sentidos coincidentes. Como consequência, no centro do círculo há um campo magnético perpendicular ao plano da figura e dirigido para trás.

Pode-se usar a mesma montagem indicada na figura 270, com o acumulador, o reostato e a chave.

3º - Campo criado por um solenoide

Chama-se **solenoide** a um condutor enrolado em espiral.

Se as espiras são bastante próximas, podemos considerar cada espira como um condutor circular. Para determinar as linhas de força do campo criado pelo solenoide, atravessamos o solenoide por um cartão e colocamos limalha de ferro. Como o campo resultante é a soma dos

Autor: Roberto A. Salmeron

campos produzidos pelas espiras, obtemos a disposição indicada na figura 273. A montagem do acumulador, do reostato e da chave é igual à da figura 270.

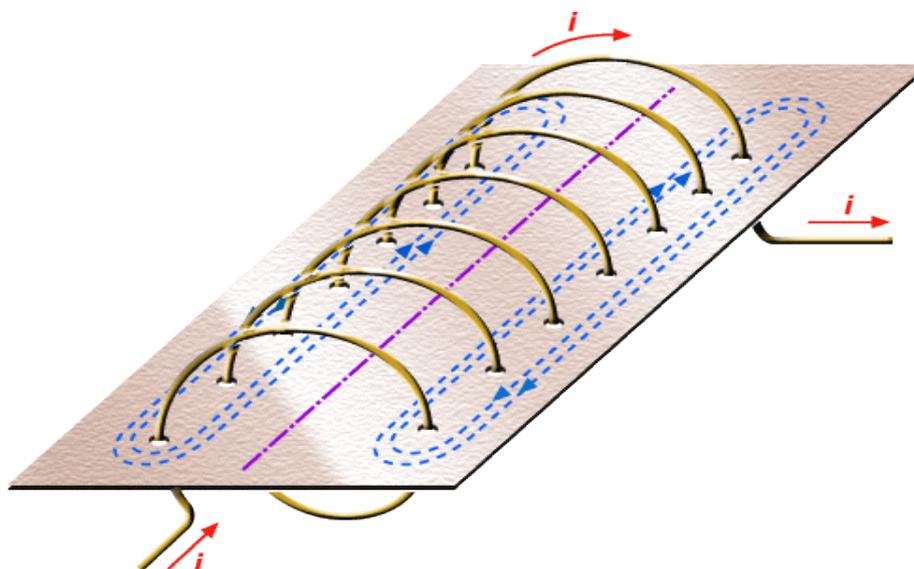


Figura 273

O sentido das linhas de força pode ser dado pela regra do saca-rolhas ou pela regra da mão direita. No centro do solenoide as linhas de força são retas paralelas e, portanto, o campo magnético é uniforme. Por fora do solenoide, as linhas de força se curvam, para se fechar.

Polo do solenoide

As linhas de força do campo magnético produzido por um solenoide são idênticas aos do campo magnético produzido por um ímã. Na prática, é indiferente produzir-se um campo magnético por um ímã ou por um solenoide.

Num ímã, as linhas de força saem do polo norte e entram no polo sul. Por analogia, chama-se polo norte ou face norte de um solenoide à extremidade do solenoide por onde saem as linhas de força. Chama-se polo sul ou face sul de um solenoide a extremidade por onde entram as linhas de força (fig. 274).

Autor: Roberto A. Salmeron

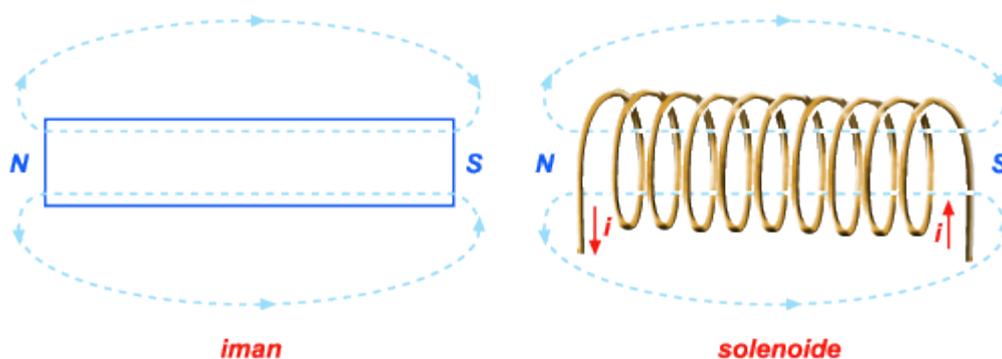


Figura 274

A um simples condutor circular também atribuímos face norte e face sul, pois ele pode ser considerado um solenoide de uma única espira (fig. 275).

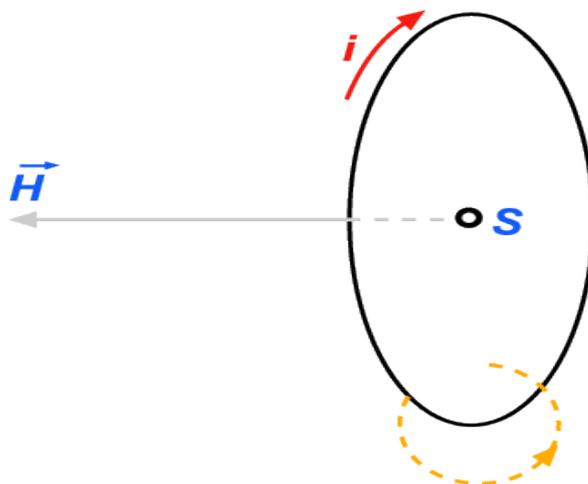


Figura 275

5: Cálculo do campo magnético em um ponto - 1ª Lei elementar de Laplace ou Lei de Biot-Savart

Chamamos lei elementar a uma lei que relaciona uma variação infinitamente pequena da variável independente, (ou das variáveis independentes), com uma variação infinitamente pequena da função (ou das funções). Suponhamos um condutor AB, percorrido por corrente elétrica de intensidade i . Essa corrente elétrica produz um campo magnético. Para calcularmos o vetor campo \vec{H} , em um ponto M qualquer, imaginamos o condutor AB dividido em um número muito grande de partes: essas partes terão comprimentos muito pequenos. Calculamos o campo magnético $\Delta\vec{H}$ que cada uma dessas partes produz em M. Depois efetuamos a soma vetorial de todos esses campos $\Delta\vec{H}$ e obtemos o campo \vec{H} total que o condutor inteiro AB produz em M. A lei que permite o cálculo do campo $\Delta\vec{H}$ (pequeno) produzido por um elemento CD (pequeno) do condutor, é uma lei elementar: é a 1ª lei elementar de Laplace, também chamada lei de Biot-Savart, por muitos autores.

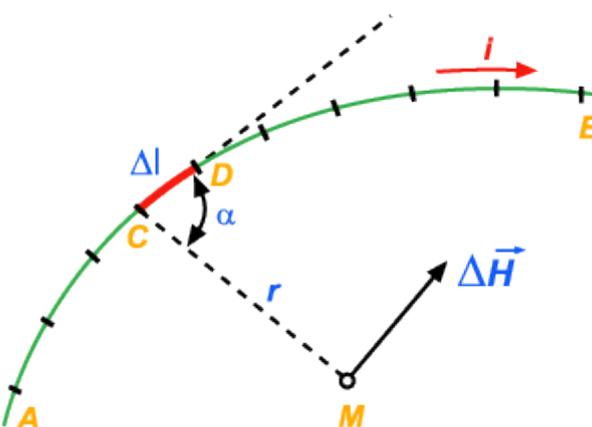


Figura 271

1ª - Lei elementar de Laplace

Suponhamos um elemento qualquer do condutor, por exemplo, CD, de comprimento Δl . Seja r a distância do ponto M a Δl , α o ângulo formado por Δl e r (fig. 276).

A 1ª lei elementar de Laplace diz que: “o campo magnético que o elemento de comprimento Δl produz no ponto M:

- 1º) é independente do meio em que se encontram Δl e o ponto M;
- 2º) é independente da ação simultânea de outros corpos magnéticos sobre o ponto A;
- 3º) tem direção perpendicular ao plano determinado por M e Δl ;
- 4º) tem módulo dado por:

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

O sentido do campo é dado pela regra do saca-rolhas, ou regra do observador de Ampère, ou regra da mão direita.

Uma vez conhecidos os campos elementares $\Delta \vec{H}$, o campo total \vec{H} é obtido pela soma vetorial dos $\Delta \vec{H}$.

6: Exemplo - campo criado no centro de um condutor circular

Suponhamos um condutor circular, de raio R, percorrido por corrente elétrica de intensidade i . Um elemento qualquer AB do condutor produz no centro M um campo magnético $\Delta \vec{H}$ (fig. 277). Neste caso, a distância do ponto M aos elementos Δl é o próprio raio R do círculo. A direção de $\Delta \vec{H}$ é perpendicular ao plano determinado por M e Δl , que neste caso é o plano do círculo. Logo, $\Delta \vec{H}$ é perpendicular ao plano do círculo. O sentido $\Delta \vec{H}$ é dado pela regra do saca-rolhas, por exemplo. O módulo $\Delta \vec{H}$ é:

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

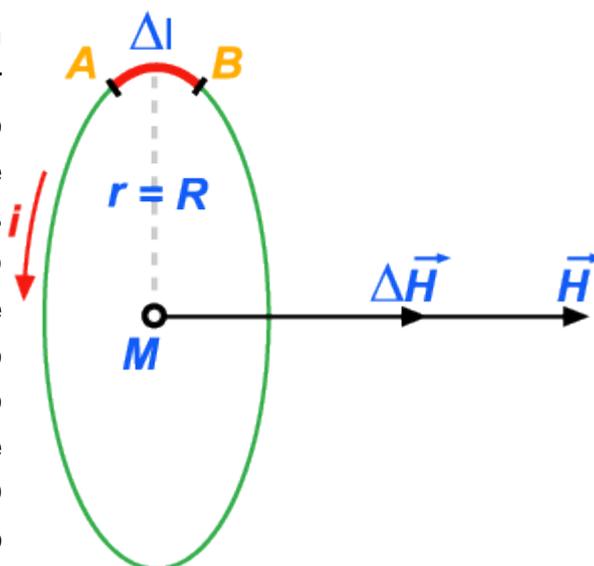


Figura 277

Mas, neste caso:

$$r = R, \alpha = 90^\circ \quad \therefore \operatorname{sen} \alpha = 1$$

Fica:

$$|\Delta \vec{H}| = \frac{i \cdot \Delta l}{R^2}$$

É fácil ver que os outros elementos do condutor produzem no ponto M, campos de mesma direção e mesmo sentido que esse $\Delta \vec{H}$. O campo resultante terá então a mesma direção, (isto é, será perpendicular ao plano do círculo), o mesmo sentido, e terá por módulo a soma dos módulos:

$$|\vec{H}| = \sum |\Delta \vec{H}| = \sum \frac{i \cdot \Delta l}{R^2}$$

Podemos por em evidência $\frac{i}{R^2}$, por ser constante. Fica:

$$|\vec{H}| = \frac{i}{R^2} \sum \Delta l$$

Mas, neste caso, $\sum \Delta l$ é o comprimento da circunferência:

$$\sum \Delta l = 2\pi R$$

Fica:

$$|\vec{H}| = \frac{i}{R^2} 2\pi R$$

ou

$$|\vec{H}| = \frac{2\pi i}{R}$$

7: Campo magnético criado por um condutor retilíneo - Lei de Biot e Savart

Suponhamos um condutor retilíneo infinitamente comprido, percorrido por corrente elétrica de intensidade i . Em um ponto A, situado à distância a do condutor, o campo magnético \vec{H} tem (fig. 278):

1ª - Direção

Perpendicular ao plano determinado por A e o condutor; no caso da figura ao lado é perpendicular ao plano do papel;

2º - Sentido

Dado pela regra do saca-rolhas, ou pela regra do boneco, de Ampère, ou pela da mão direita;

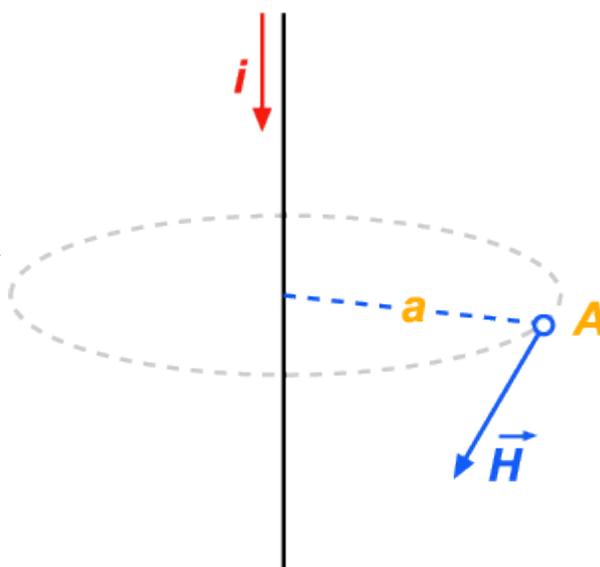


Figura 278

3º - Módulo

Dado por

$$|\vec{H}| = \frac{2i}{a}$$

Essa expressão pode ser calculada a partir da primeira lei elementar de Laplace. Mas Biot e Savart a demonstraram experimentalmente, independentemente da lei de Laplace. Por causa disso ela é chamada lei de Biot e Savart. (Nós aqui não damos a demonstração porque não pode ser feita só com matemática elementar).

8: Unidade de intensidade de corrente do sistema CGSEM

Essa unidade é obtida a partir da equação do campo magnético que um condutor circular produz no seu centro:

$$|\vec{H}| = \frac{2\pi i}{R}$$

Daí tiramos:

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

Devemos então considerar:

$$\left. \begin{array}{l} R = 1\text{cm} \\ |\vec{H}| = 2\pi \text{ oersteds} \end{array} \right\} \text{Resulta: } i = \frac{2\pi \text{ oersteds} \cdot 1\text{cm}}{2\pi}$$

$$i = 1 \text{ uem CGS } i \text{ ou abampère}$$

“Unidade CGSEM de intensidade de corrente elétrica também chamada abampère é a intensidade de uma corrente elétrica que, passando em um condutor circular de raio 1 cm, produz no centro do condutor um campo magnético de intensidade 2π oersteds”.

Relação entre o ampère e o abampère

Demonstraremos essa relação com as três observações seguintes.

1ª) A permeabilidade magnética do vácuo vale $1 \frac{\text{gauss}}{\text{oersted}}$ no sistema CGSEM; e

$10^{-7} \frac{N}{A^2}$ no MKS, o que nos faz concluir que:

$$1 \frac{\text{gauss}}{\text{oersted}} = 10^{-7} \frac{N}{A^2}$$

ou seja:

$$1 \frac{N}{A^2} = 10^{-7} \frac{\text{gauss}}{\text{oersted}}$$

Autor: Roberto A. Salmeron

2ª) Consideremos a fórmula que exprime a força que atua em dois condutores retilíneos paralelos percorridos por correntes i_1 e i_2 , e que serve para a definição do ampère:

$$F = \mu^2 \frac{i_1 i_2 l}{a}$$

Se usarmos todas as unidades CGSEM podemos escrever:

$$1 \frac{\text{gauss}}{\text{oersted}} \cdot \frac{2 \cdot 1 \text{abA} \cdot 1 \text{abA} \cdot 1 \text{cm}}{1 \text{cm}} = 2d$$

de onde tiramos:

$$(1 \text{abA})^2 = \frac{1d}{1 \frac{\text{gauss}}{\text{oersted}}}$$

3ª) Se considerarmos nessa mesma fórmula os elementos que entram na definição do ampère, conforme já vimos no tópico "[Sistemas de Unidades em Magnetismo e Eletromagnetismo](#)", temos:

$$F = 2 \cdot 10^{-7} N$$

$$\mu = 10^{-7} \frac{N}{A^2}$$

$$l = 1m$$

$$a = 1m$$

$$i_1 = i_2 = 1A$$

isto é:

$$2 \cdot 10^{-7} N = 10^{-7} \frac{N}{A^2} \cdot \frac{2 \cdot 1A \cdot 1A \cdot 1m}{1m}$$

de onde tiramos:

$$(1A)^2 = \frac{1N}{1 \left(\frac{N}{A^2} \right)}$$

Autor: Roberto A. Salmeron

No segundo membro dessa igualdade podemos transformar as unidades para o sistema CGSEM, usando a relação $1 \frac{N}{A^2} = 10^{-7} \frac{\text{gauss}}{\text{oersted}}$ e lembrando que $1N = 10^5 d$.

Resulta:

$$(1A)^2 = \frac{10^5 d}{10^7 \frac{1 \text{ gauss}}{2 \text{ oersted}}} = 10^{-2} = \frac{d}{\frac{\text{gauss}}{\text{oersted}}}$$

o que significa, de acordo com a relação $(1abA)^2 = \frac{1d}{1 \frac{\text{gauss}}{\text{oersted}}}$, que:

$$(1A)^2 = 10^{-2} (abA)^2$$

ou

$$(1abA)^2 = 10^2 A^2$$

ou

$$1abA = 10A$$

É a relação entre a unidade de intensidade de corrente do sistema CGSEM e a do MKS, e é uma das relações fundamentais entre unidades eletromagnéticas

9: Unidade de carga elétrica, diferença de potencial, resistência e condutância no sistema CGSEM

1. Unidade de carga elétrica

Chama-se **abcoulomb** (símbolo, **abc**). É definida a partir da equação $Q = it$, considerando-se:

$$i = 1abA$$

$$t = 1seg$$

Resulta:

$$Q = 1aba.1seg = 1abc$$

Autor: Roberto A. Salmeron

Deixamos ao leitor, como exercício, enunciar por extenso o abcoulomb, e demonstrar que:

$$1abc = 10c$$

2. Unidade de diferença de potencial

Chama-se abvolt (símbolo, abv). É definida a partir da equação

$$V_A - V_B = \frac{\tau}{q},$$

considerando-se:

$$\tau = 1erg$$

$$q = abc$$

Resulta:

$$V_A - V_B = \frac{1erg}{1abc} = 1abv$$

Deixamos ao leitor, como exercício, escrever por extenso a definição do abvolt, e demonstrar que:

$$1abv = 10^{-8} v$$

3. Unidade de resistência

Chama-se abohm (símbolo, $ab\Omega$). É definida a partir da lei de Ohm:

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

considerando-se:

$$V = 1abv$$

$$I = 1abA$$

Resulta:

$$R = \frac{1abv}{1abA} = 1ab\Omega$$

Autor: Roberto A. Salmeron

Escreva o leitor por extenso a definição do abohm, e demonstre que:

$$1ab\Omega = 10^{-9}\Omega$$

4. Unidade de condutância

Chama-se abmho. Pode ser definida pela equação:

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

isto é,

$$1abmho = \frac{1}{ab\Omega}$$

Escreva o leitor por extenso a definição do abmho, e demonstre que:

$$1abmho = 10^9 mhos$$

10: Nome das unidades CGSEM

O leitor já deve ter observado que os nomes das unidades magnéticas do CGSEM são obtidas por combinações dos nomes das três unidades: oersted, gauss e maxwell (veja os quadros de resumo no fim dos [Capítulos 12](#) e [13](#)). Mas, os nomes das outras unidades desse sistema, que não são formados por combinações daqueles três nomes, são obtidos do seguinte modo: ao nome da unidade correspondente do sistema MKS se adiciona o prefixo *AB*. Assim, a unidade de intensidade de corrente é chamada abampère, a de diferença de potencial, abvolt, etc..

Analogamente ao que acontece com o sistema CGSES, com o CGSEM se dá o seguinte:

1º) Em vez de se usar o nome de uma unidade como está mencionado acima, pode-se indicar a unidade escrevendo-se: unidade CGS eletromagnética de..... (nome da grandeza).

Autor: Roberto A. Salmeron

Exemplo

Em vez de se usar o nome abampère para unidade de intensidade de corrente, pode-se escrever: unidade CGS eletromagnética de intensidade de corrente (abreviadamente: u_{CGSEMI} , ou uem_{CGSi}).

2º) Quando não há possibilidade de confusão, isto é, quando se sabe de antemão qual a grandeza que está sendo tratada, não é necessário indicar o nome dela nem escrever CGS. Basta escrever: **unidade eletromagnética**.

Exemplo

Não é necessário escrever: a carga elétrica do elétron é $1,6 \times 10^{-20}$ unidades **CGS** eletromagnéticas de **carga elétrica**, porque já se sabe que se trata de uma carga elétrica. Basta escrever: a carga elétrica do elétron é $1,6 \times 10^{-20}$ unidades eletromagnéticas. E abreviadamente: $1,6 \times 10^{-20}$ uem.

11: A unidade de intensidade de campo magnético do sistema MKS

No "[Unidades de Intensidade de Campo](#)" vimos que o praoersted, ou ampère/metro, é definido como a intensidade do campo magnético num ponto, quando a massa magnética de um weber colocada nesse ponto fica sujeita à força de um newton. Mas, ele também pode ser definido a partir da lei de Biot e Savart para o campo produzido por condutor retilíneo.

$$H = \frac{2i}{a}$$

Considerando-se:

$$i = 0,5A$$

$$a = 1m$$

resulta:

Autor: Roberto A. Salmeron

$$H = \frac{2.0,5A}{1m} = \frac{1A}{1m} = 1 \left(\frac{A}{m} \right)$$

ou praoersted.

É daqui que provem o nome ampère/metro.

Podemos então dar a seguinte definição: ampère/metro, ou praoersted é a intensidade do campo magnético produzido por uma corrente de meio ampère que circula em um condutor retilíneo infinitamente comprido, num ponto situado a um metro do condutor.

Relação entre o praoersted e o oersted

Temos:

$$1\text{praoersted} = \frac{1A}{1m}$$

Mas,

$$1A = 0,1abA \text{ e } 1m = 100cm$$

Logo,

$$1\text{praoersted} = \frac{0,1abA}{100cm} = \frac{1}{1.000} \frac{abA}{cm}$$

Mas, $\frac{abA}{cm} = \text{oersted}$, como indicou, por exemplo, as fórmulas 159 e 160.

Então:

$$1\text{praoersted} = \frac{1}{10^3} \text{oersted}$$

12: Outras relações entre unidades MKS e CGSEM

Como já sabemos que:

$$1\text{praoersted} = \frac{1}{10^3} \text{oersted}$$

$$1 \frac{N}{A^2} = 10^7 \frac{\text{gauss}}{\text{oersted}}$$

deixamos a cargo do leitor, como exercício, demonstrar as seguintes relações:

Autor: Roberto A. Salmeron

$$1 \frac{\text{weber}}{\text{m}^2} = 10^4 \text{ gauss} \quad (\text{para } \vec{B}, \vec{I}, \sigma)$$

$$1 \text{ weber} = 10^8 \text{ max wells} \quad (\text{para } \Phi, m)$$

$$1 \text{ weber.m} = 10^{10} \text{ gauss.cm}^3 \quad (\text{para } \vec{M})$$

13: Indução magnética no campo produzido por corrente elétrica

A indução magnética B DEPENDE DO MEIO, QUANDO O CAMPO MAGNÉTICO É PRODUZIDO POR CORRENTE ELÉTRICA.

Sendo μ a permeabilidade magnética do meio no qual a corrente elétrica produz o campo, e \vec{H} o vetor campo magnético num ponto, a indução magnética nesse ponto é, por definição,

$$\vec{B} = \mu \vec{H}$$

Na 1ª lei elementar de Laplace já está enunciado que o campo magnético \vec{H} que a corrente produz NÃO DEPENDE DO MEIO; ele depende só da intensidade da corrente elétrica e da forma geométrica do condutor. Mas, na expressão da indução magnética, B, aparece a permeabilidade magnética μ , que depende do meio. Logo, a indução magnética B DEPENDE DO MEIO, QUANDO O CAMPO MAGNÉTICO É PRODUZIDO POR CORRENTE ELÉTRICA. Compare este resultado com o caso em que o campo magnético é produzido por ÍMÃ, visto no tópico "[Indução Magnética ou Densidade de Fluxo Magnético](#)".

Para calcularmos a indução magnética em um ponto, calculamos o campo H nesse ponto, pela lei de Laplace. Depois multiplicamos esse campo por μ .

14: Aplicações do 1º fenômeno eletromagnético

Os campos magnéticos criados por correntes elétricas têm numerosas aplicações. Veremos algumas importantes e que utilizamos constantemente na vida diária.

1ª - Princípio de funcionamento dos galvanômetros de ímã móvel

De modo geral, chama-se galvanômetros aos instrumentos de medida que funcionam pela ação entre uma corrente elétrica e um ímã permanente. São muito sensíveis, e por isso são usados para a medida de correntes muito pequenas. Há dois tipos:

- 1º) galvanômetro de ímã móvel e bobina fixa;
- 2º) galvanômetro de bobina móvel e ímã fixo.

Veremos agora como funcionam os primeiros. Os segundos serão vistos no capítulo seguinte.

a. Galvanômetro de ímã móvel

Um ímã permanente, NS, suspenso pelo centro de gravidade, é colocado no interior de uma bobina. Quando não passa corrente pela bobina, o ímã fica com o eixo na direção do meridiano magnético do lugar. Quando passa a corrente i , que desejamos medir, ela cria um campo magnético. Os polos do ímã ficam sujeitos a forças, e o ímã se desloca, girando de um ângulo α (fig. 279).

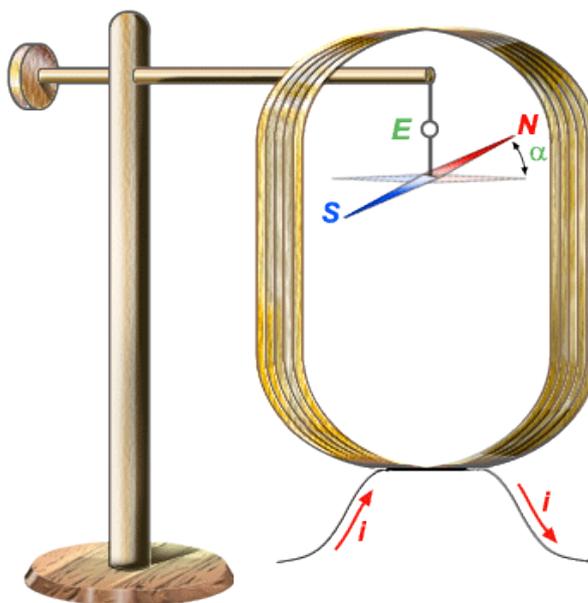


Figura 279

Autor: Roberto A. Salmeron

Pode-se demonstrar que esse ângulo é diretamente proporcional à corrente i , isto é, que:

$$I = K.\alpha$$

K é uma constante que depende do instrumento e do lugar em que o galvanômetro está sendo usado, pois o campo magnético da Terra também exerce ação sobre o ímã. Para um mesmo galvanômetro essa constante deve ser determinada no lugar em que ele vai ser usado.

Para medirmos o ângulo α , em geral há um espelho E preso à suspensão do ímã. O ângulo é então medido pelo método de Poggendorff (de rotação de espelho).

b. Galvanômetro das tangentes, ou bússola das tangentes

É um tipo particular de galvanômetro de ímã móvel. Neste galvanômetro a bobina é chata, de espiras circulares e é colocada com o plano dos círculos coincidindo com o plano meridiano magnético do lugar (fig. 280). O ímã NS é muito pequeno em relação à bobina e é colocado no centro O dela. Quando não passa corrente pela bobina, o ímã, suspenso pelo centro de gravidade, indica a direção do campo magnético terrestre, \vec{H}_t . Quando passa a corrente i , que desejamos medir, ela produz um campo magnético \vec{H} perpendicular ao plano das espiras (ver tópico "[Exemplo - Campo Criado no Centro de um Condutor Circular](#)"), e, portanto, horizontal. Se a bobina tivesse uma só espira, o campo H valeria (ver tópico "[Exemplo - Campo Criado no Centro de um Condutor Circular](#)"):

$$H = \frac{2\pi i}{R}$$

Autor: Roberto A. Salmeron

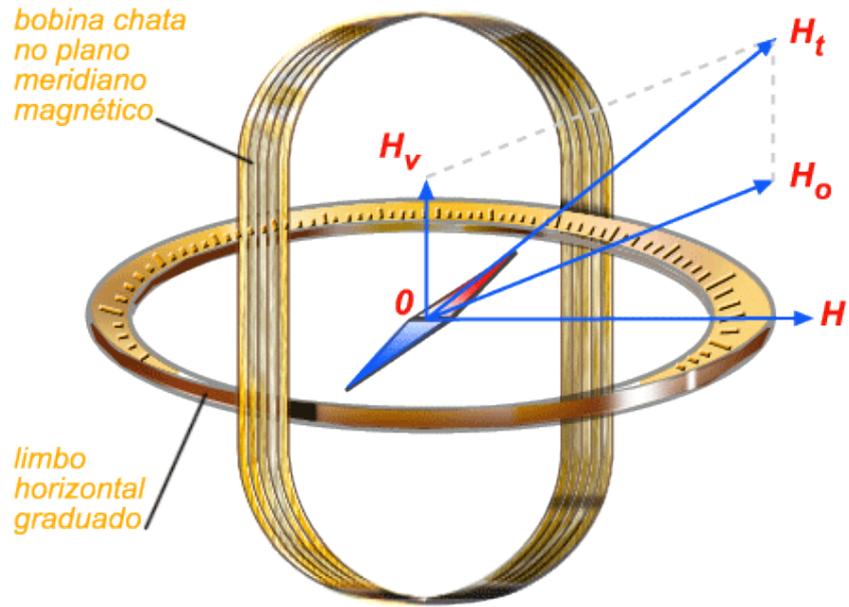


Figura 280-a

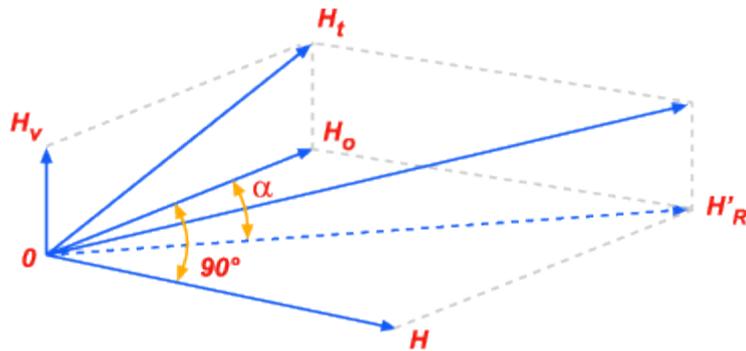


Figura 280-b

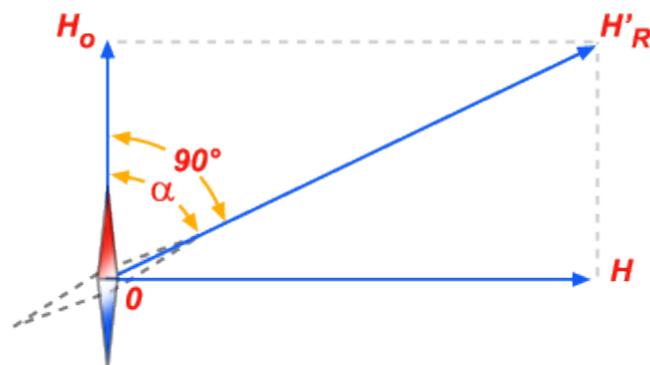


Figura 280-c

Autor: Roberto A. Salmeron

Mas, como tem n espiras, o campo é n vezes mais forte, isto é,

$$H = \frac{2\pi i}{R} \cdot n$$

O campo que atua no ímã, que era H_t , agora é H_R , soma de H_t com H .

O ímã gira então de um ângulo α , sob a influência de dois campos horizontais: o campo \vec{H} produzido pela corrente i , e a componente horizontal do campo magnético terrestre, \vec{H}_0 . Pela figura c vemos que:

$$\operatorname{tg}\alpha = \frac{H}{H_0} = \frac{\frac{2\pi ni}{R}}{H_0} = \frac{2\pi ni}{RH_0}$$

de onde:

$$i = \frac{RH_0}{2\pi n} \operatorname{tg}\alpha$$

Mas,

$$\frac{RH_0}{2\pi n}$$

é uma constante para um mesmo galvanômetro num mesmo lugar da Terra.

Chamando K a esse fator, temos:

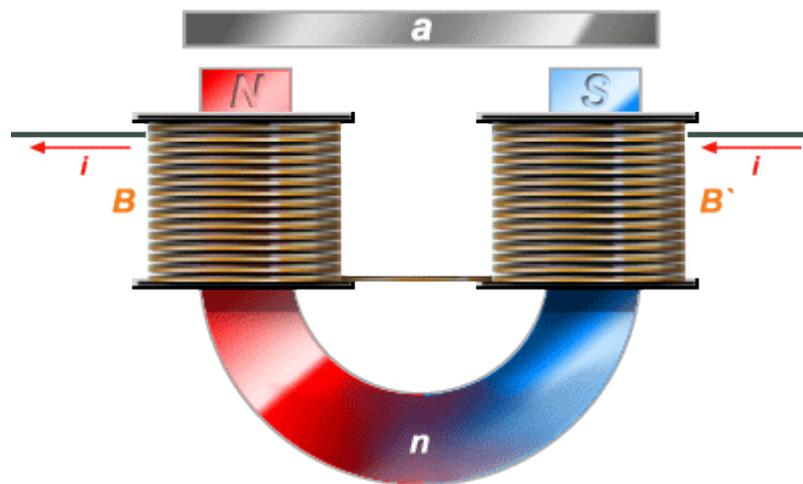
$$i = K \cdot \operatorname{tg}\alpha$$

isto é, a intensidade da corrente é diretamente proporcional à tangente do ângulo de que girou o ímã. Daí o nome, galvanômetro das tangentes.

2ª - Eletroímã

Os eletroímãs são constituídos por uma barra de ferro, ao redor da qual é enrolado um condutor. Quando passa corrente pelo condutor, ela produz um campo magnético; e a barra de ferro, ficando em um campo magnético, se imanta. Podemos saber onde aparece o polo norte aplicando, por exemplo, a regra do saca-rolhas.

Autor: Roberto A. Salmeron



O uso de eletroímãs oferece várias vantagens:

- 1ª) se quisermos inverter os polos, basta invertermos o sentido da corrente;
- 2ª) é somente a imantação por corrente elétrica que nos fornece ímãs muito possantes;
- 3ª) podemos usar uma barra de ferro doce (ferro puro), que tem a propriedade de só se imantar **enquanto estiver passando** a corrente; e se neutraliza logo que a corrente é desligada. Assim, temos um ímã que só funciona quando queremos. (Nota: o aço, ao contrário, permanece imantado mesmo quando cessa a causa da imantação).

Os eletroímãs, em geral, não têm forma de barra, mas a forma de U, indicada na figura acima. Em uma peça n de ferro doce, se enrolam duas bobinas, B e B' ; os seus enrolamentos são postos em série e de tal forma que a corrente que passe por elas produza campo no mesmo sentido. Em geral, têm também uma peça de ferro doce α que é atraída pelos polos quando o eletroímã funciona. A peça n é chamada núcleo; a peça a é chamada armadura.

Os eletroímãs têm inúmeras aplicações, desde em instalações delicadas, como telégrafos, telefones e campainhas, até em grandes instalações industriais. Veremos, a seguir, exemplos de utilização de eletroímãs.

3ª - Disjuntor

O disjuntor é um eletroímã que funciona como interruptor de circuitos. É usado quando se quer proteger um dispositivo qualquer M de correntes muito elevadas. Esse dispositivo M é ligado em série com a bobina do eletroímã, de maneira que a mesma corrente i que passa por M também passa pela bobina (fig. 282). A armadura A do eletroímã é sustentada pela mola m de tal maneira

Autor: Roberto A. Salmeron

que para valores admissíveis de i ela não se desloca para os polos. Mas, para valores de i superiores a um valor prefixado, a força de atração sobre a armadura vence a mola. Então, a armadura desce, a haste AC gira ao redor do ponto O, o ponto D se separa do ponto E, e o circuito se abre. A corrente deixa de circular, e o dispositivo M fica assim protegido de uma corrente alta.

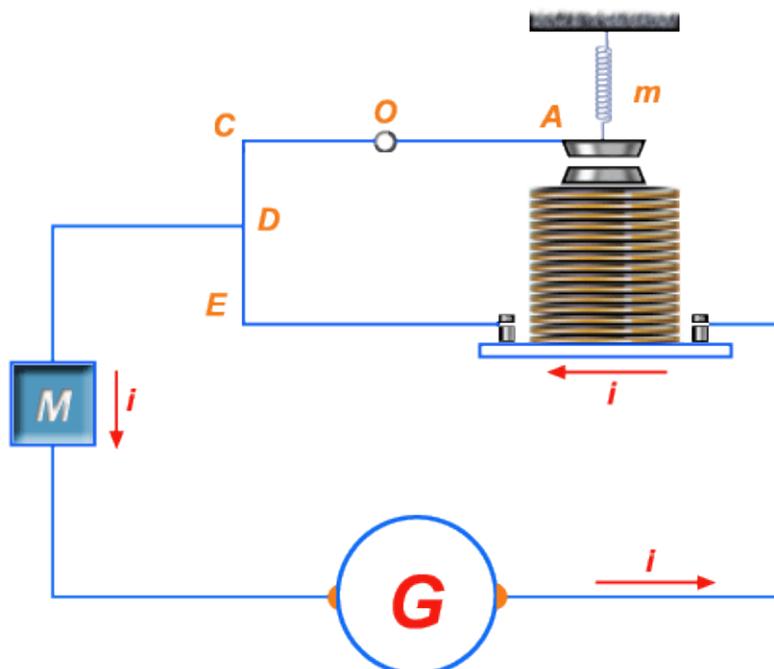


Figura 282

4ª - Relé

O relé é um dispositivo que serve para abrir ou fechar um circuito. Sua parte fundamental é um eletroímã, constituído por uma bobina B, armadura A e núcleo de ferro N (desenhado em preto na fig. 283). A bobina é alimentada por uma corrente i . Uma peça metálica CDE é ligada com a armadura, e se desloca juntamente com ela; a parte DE dessa peça é flexível, para facilitar seus deslocamentos. Uma outra peça metálica FG é fixa. A finalidade do relé é estabelecer ligação entre os pontos G e E, através da parte metálica GFCDE, para fechar o circuito da corrente i ,

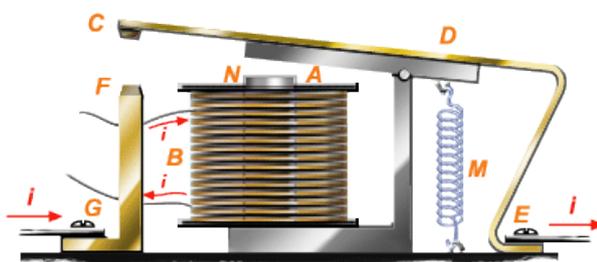


Figura 283-a

Autor: Roberto A. Salmeron

ou, ao contrário, desfazer a ligação entre esses dois pontos, para abrir esse circuito.

Para manter aberto o circuito da corrente I devemos retirar a corrente i da bobina; então a bobina deixa de funcionar, e a mola M mantém a armadura na posição indicada na figura; os pontos C e F ficam afastados, e não há ligação entre G e E . Se quisermos fechar o circuito da corrente I , devemos fazer passar a corrente i pela bobina; então a bobina atrai a armadura, que gira ao redor do ponto D , os pontos C e F se unem, e se estabelece ligação entre os pontos G e E .

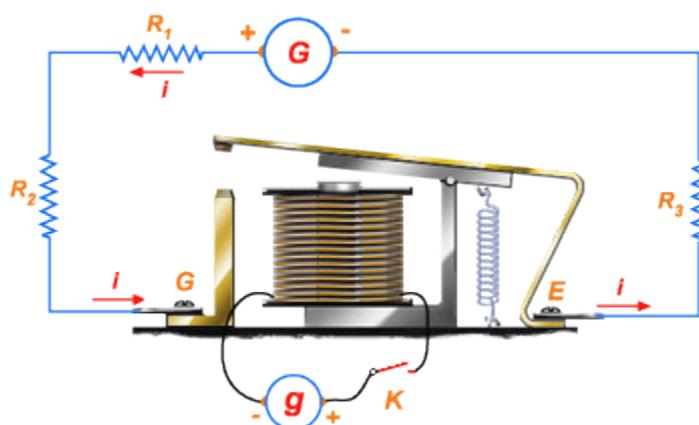


Figura 283-b

Um relé é, portanto, um interruptor controlado eletricamente. A figura b mostra a posição de um relé num circuito; sua finalidade é abrir ou fechar o circuito formado pelo gerador g e as resistências R_1 , R_2 e R_3 . A bobina do relé é alimentada por um gerador g , que está em série com a chave K . Fechando-se a chave K , o relé funciona; abrindo-se esta chave, ele deixa de funcionar.

Entre as vantagens do uso de relés, podemos citar as seguintes:

- 1ª) a corrente i que o relé utiliza para funcionar é independente da corrente I que ele controla. Desse modo, com uma pequena corrente i podemos controlar uma grande corrente I ;
- 2ª) a corrente i pode ser fornecida por válvulas eletrônicas; com essas válvulas, a corrente pode ser controlada muito rapidamente, em tempos da ordem de milionésimos de segundo;
- 3ª) o relé pode controlar uma corrente I em um aparelho qualquer colocado muito afastado.

5ª - Campainha

Consta de um eletroímã E, cuja armadura A tem uma extremidade presa a uma mola de aço flexível B e a outra extremidade a uma haste C que mantém na ponta uma esfera D. A mola B obriga a armadura a ficar em contato com uma placa metálica F. A corrente é fornecida por uma pilha P, ou pelo circuito que serve a uma residência (fig. 284). Quando se fecha a chave S a corrente segue o seguinte caminho: eletroímã, mola B, armadura A, placa F, chave S e volta à pilha. Mas, logo que a corrente passa acontece o seguinte:

1º) o eletroímã atrai a armadura; esta leva consigo a haste C, e a esfera D bate no tímpano T;

2º) quando a armadura é atraída, ela se afasta da placa F e o circuito se abre;

3º) com o circuito aberto, cessa a atração sobre a armadura, e a mola B leva novamente a armadura em contato com F;

4º) então o circuito se fecha, e tudo se repete. Assim, enquanto a chave S permanecer fechada, a esfera D alternadamente bate no tímpano e recua. Essa chave S é o que vulgarmente chamamos o “botão” da campainha; quando apertamos o botão, estamos fechando o circuito.

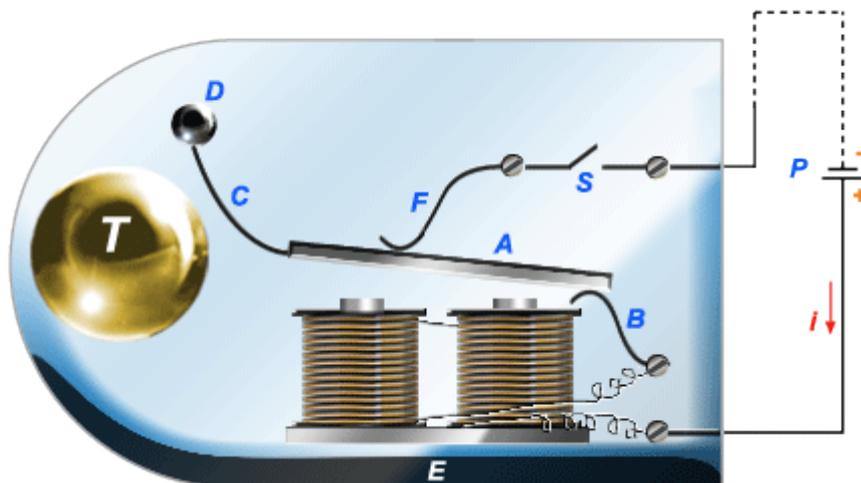


Figura 284

6ª - Telégrafo

O princípio de funcionamento é o seguinte: são colocados em série um gerador G, um eletroímã E e um interruptor C. Esse interruptor tem uma mola M que

Autor: Roberto A. Salmeron

mantém o circuito aberto. Para fecharmos o circuito precisamos apertar o “botão” B do interruptor. Quando um operador fecha o circuito em C, o eletroímã atrai a sua armadura A. Então a haste AD gira ao redor do ponto O, e um estilete, colocado em D, encosta-se a uma fita de papel que se desenrola de um cilindro P. Esse estilete fica encostado no papel durante todo o tempo em que o interruptor C permanecer fechado. Assim, se fechar o interruptor por um instante, aparecerá na fita de papel um ponto. Se fechar C por algum tempo aparecerá na fita um traço. Como se sabe, em telegrafia as letras do alfabeto são representadas por combinações de traços e pontos. Assim, um observador, atuando no interruptor C pode mandar uma mensagem a outro que receba junto ao eletroímã, colocado à distância muito grande.

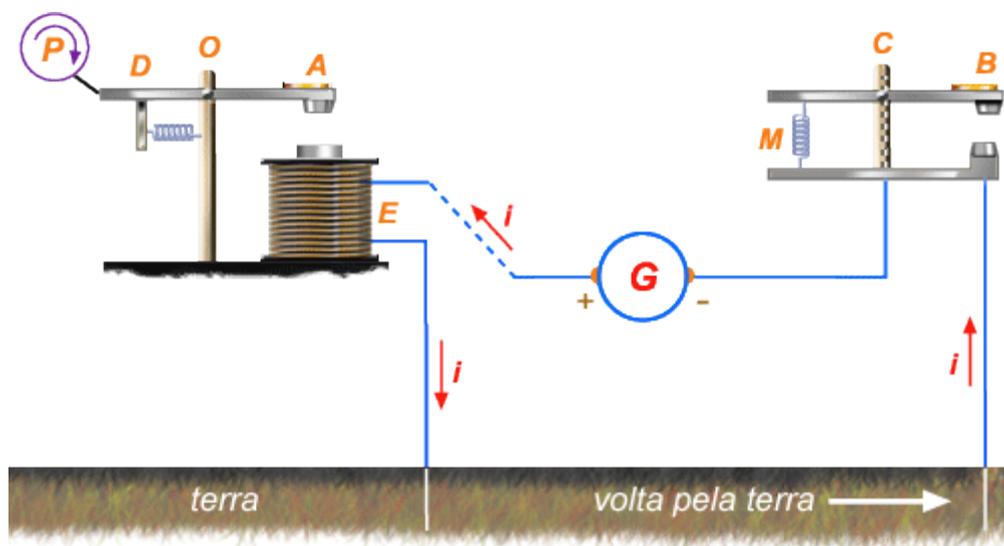


Figura 285

Nas instalações telegráficas, em vez de se usarem dois fios para a condução da corrente, uma para ida e outro para volta, usa-se um só, o outro fio é substituído pela terra. Como esta é condutora, transporta corrente de uma estação à outra, bastando para isso ligar as extremidades do circuito à terra, como indica a figura 285.

7ª - Fonte

O fone (a parte do telefone por onde ouvimos) também é um eletroímã, cuja armadura A é uma lâmina muito delgada (fig. 286). A corrente i chega ao eletroímã vinda do microfone de um outro telefone, no qual há outra pessoa falando. Essa corrente é variável; ela acompanha as variações da voz da pessoa que está falando no outro telefone. À medida que a corrente varia, a

Autor: Roberto A. Salmeron

atração do eletroímã sobre a armadura A também varia, e a armadura vibra. Essas vibrações produzem som, que é uma reprodução do som que, no outro telefone, faz variar a corrente i .

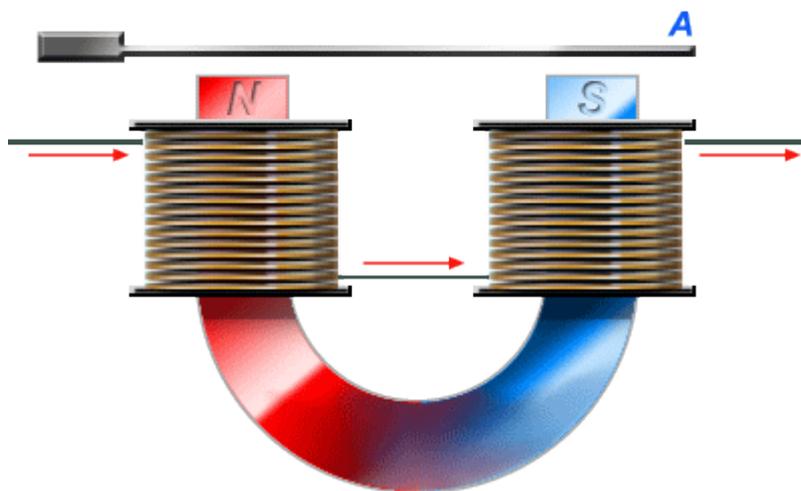


Figura 286

15: [Teorias do magnetismo](#)

Um corpo que normalmente é neutro pode ser imantado. Isso acontece, por exemplo, com o ferro. Para explicar o magnetismo, antigamente admitiam que na constituição de todos os corpos entrasse um número muito grande de pequenos ímãs. Admitiam que no corpo neutro, esses ímãs tivessem orientações quaisquer, e seus polos, assim, neutralizassem seus efeitos. E que, quando o corpo fosse colocado em um campo magnético, todos esses ímãs se orientassem, de maneira que não haveria mais neutralização de todos os polos, e o corpo se apresentaria imantado.

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

Resumo

1 – 1ª lei elementar de Laplace:

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

2 – O sentido do campo magnético produzido por corrente é dado pelas três regras: do saca-rolhas, de Maxwell do boneco, de Ampère da mão direita.

3 – Campo magnético no centro de condutor circular:

$$H = \frac{2\pi i}{R}$$

4 – Campo magnético criado por condutor retilíneo (lei de Biot e Savart):

$$H = \frac{2i}{a} .$$

5 – Unidades a serem usadas nessas fórmulas:

GGSEM: H ... oersted i ... abampère a, R ... centímetro

MKS: H ... praoersted i ... ampère a, R ... metro *

Resumo das unidades estudadas nesse capítulo

Grandeza	Símbolo	Unidade CGSES	Unidade MKS	Relação
Intensidade de corrente	I ou i	ab A	A	10^{-1}
Carga elétrica	Q ou q	abc	c	10^{-1}
Diferença de potencial	V ou v	abv	v	10^8
Resistência	R ou r	ab Ω	Ω	10^9
Condutância	C ou c	abmho	mho	10^{-9}
Intensidade de campo magnético	\vec{H}	Oersted	Praoersted	10^{-3}
Permeabilidade magnética	μ	$\frac{\text{gauss}}{\text{oersted}}$	$\frac{N}{A^2}$	10^7

Autor: Roberto A. Salmeron

Susceptibilidade magnética	χ	$\frac{\text{gauss}}{\text{oersted}}$	$\frac{N}{A^2}$	10^7
Massa magnética	m	uem CGS	weber	10^8
Fluxo magnético	Φ	maxwell	weber	10^8
Momento magnético	\vec{M}	gauss.cm^3	weber.m	10^{10}
Densidade magnética	σ	gauss	$\frac{\text{weber}}{m^2}$	10^4
Intensidade de imantação	\vec{I}	gauss	$\frac{\text{weber}}{m^2}$	10^4
Indução magnética	\vec{B}	Gauss	$\frac{\text{weber}}{m^2}$	10^4

Nota: A relação dada indica o número de unidades eletromagnéticas necessárias para perfazerem uma unidade MKS.

16: Nota Histórica

No século passado, o período compreendido entre os anos de 1819 e 1831 foi dos mais férteis em descobertas no campo da eletricidade. Os fenômenos básicos do eletromagnetismo foram descobertos entre aquelas datas. A observação que Oersted fez, em 1819, de que uma corrente elétrica desvia a agulha de uma bússola, marca o início de uma época da Física que iria influir profundamente na história da humanidade. A ação mútua de um ímã e uma corrente elétrica aguçou a curiosidade de muitos investigadores que até então não se dedicavam ao estudo da eletricidade, principalmente um grupo de franceses. A primeira grande aplicação da descoberta de Oersted foi feita três anos mais tarde, por Dominique François Arago e Joseph Luis Gay-Lussac. Este, muito conhecido por seus trabalhos em Química. Eles observaram que quando passava corrente em um condutor enrolado numa barra de ferro, esta se imantava: estava, pois, inventado o eletroímã. No mesmo ano, André Marie Ampère estabeleceu a “regra do observador”, e descobriu que um solenoide atua como um ímã. Posteriormente, Jean Baptiste Biot e Felix Savart descobriram, ao mesmo tempo, e independentemente um do outro, a lei que leva seus nomes.

Autor: Roberto A. Salmeron

Este é um dos muitos exemplos conhecidos nas ciências, de uma descoberta feita ao mesmo tempo por dois ou mais investigadores que trabalham independentemente um do outro. Isso porque uma descoberta só pode ser realizada quando o assunto já atingiu o necessário grau de maturidade. Não seria normal, por exemplo, Biot, ou Savart, descobrir a lei 50 anos antes daquela época, porque então eles não conheceriam os trabalhos de seus predecessores, que lhes serviram de base.