

Material Didático

Campo Magnético



"Ser um ser humano (ser, ser, ser) e um verdadeiro herói (herói, herói, herói)"

Alisson Ferreira Martins

Físico

2024

"Este material foi desenvolvido para o estudo do Campo Magnético, um componente essencial da Física. As referências são todas do livro Helou et al., 2010: Helou, D., Gualter, J. B., and Newton, V. B. (2010). Tópicos de Física, volume 3. Editora Saraiva, São Paulo, 1ª edição, sendo, portanto, o material desenvolvido com o objetivo de simplificar o conteúdo."

Sumário

1	Introdução	3
2	Imãs ou magnetos	3
2.1	Polos magnéticos	3
2.2	Atração e repulsão	4
2.3	Lei das interações entre polos magnéticos	5
2.4	Inseparabilidade dos polos de um imã	6
3	Construção de uma bússola	6
4	O campo magnético de um imã	7
4.1	Vetor indução magnética	7
4.2	Características das linhas de indução	10
5	Campo magnético uniforme	11
5.1	Outra representação	11
6	Ação do campo magnético sobre cargas elétricas	13
6.1	Carga elétrica em repouso	13
6.2	Carga elétrica em movimento na mesma direção do campo	14
6.3	Carga elétrica em movimento de direção diferente da do campo	15
6.3.1	Carga movendo-se perpendicularmente ao campo	15
6.4	Carga movendo-se em uma direção qualquer	17
6.5	Regra da mão direita	18
6.5.1	Carga positiva	18
6.6	Para carga negativa	18
6.7	Regra de Fleming ou regra da mão esquerda	19
7	Efeito Hall	19
8	Campo magnético uniforme e constante	21
8.1	Movimento de portadores de carga elétrica lançados em um campo magnético uniforme e constante	22
8.1.1	Quando a velocidade \vec{v} tem mesma direção de \vec{B}	22
8.2	Quando a velocidade \vec{v} tem direção perpendicular a \vec{B}	22
8.3	Determinação do período T desse movimento.	23
8.4	Quando a velocidade \vec{v} forma com \vec{B} um ângulo θ , tal que $0^\circ < \theta < 90^\circ$	24
9	Auroras polares	26
9.0.1	Nota	26
10	A origem do campo magnético	27
10.1	Introdução	27
10.1.1	Nota	29
10.2	Campo magnético gerado por um fio retilíneo muito longo (infinito)	30
10.2.1	Linhas de indução	30
10.3	Conceituando a Experiência de Oersted	32
10.4	Intensidade do vetor indução magnética	33
10.5	Permeabilidade absoluta do vácuo	34

11 Campo magnético gerado por uma espira circular	35
11.1 Linhas de indução	35

1 Introdução

2 Imãs ou magnetos

2.1 Polos magnéticos

É notório que um imã atrai alguns materiais como por exemplo o ferro, as regiões de um imã em que as ações magnéticas são mais intensas denominam-se **polos magnéticos**.

Em geral, um imã tem dois polos. Os polos dos imãs em forma de barra, por exemplo, localizam-se, em suas extremidades.



Figura 1: O ímã da foto entrou em contato com limalhas de ferro. Observe a maior quantidade de limalhas acumuladas em suas extremidades, nas quais se localizam os seus polos magnéticos.

Quando um desses imãs é suspenso pelo seu centro de gravidade, como no caso da agulha magnética da bússola, ele se alinha aproximadamente na direção norte-sul geográfica do local.

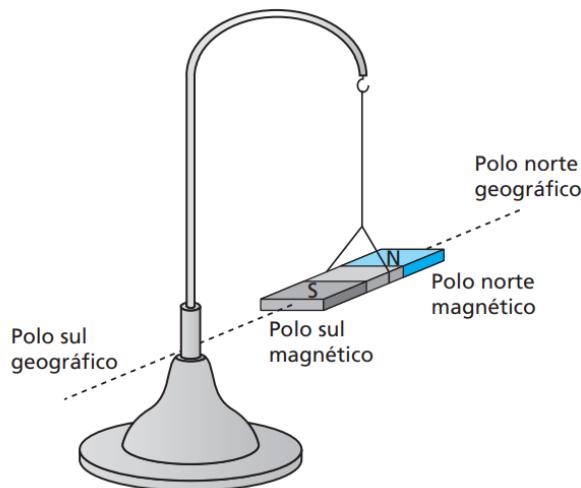


Figura 2: A extremidade do ímã que se volta para o polo norte geográfico recebe o nome de polo norte magnético. Da mesma forma, a extremidade que aponta para o polo sul geográfico chama-se polo sul magnético.



Figura 3: A magnetita, um dos minérios de óxido de ferro (Fe_3O_4), é um ímã natural, ou seja, é encontrada na natureza com os polos magnéticos norte e sul.

2.2 Atração e repulsão

Com o manuseio de dois imãs de polos magnéticos conhecidos, descobrimos que:

Polos magnéticos de mesmo nome se repelem e polos magnéticos de nomes diferentes se atraem.

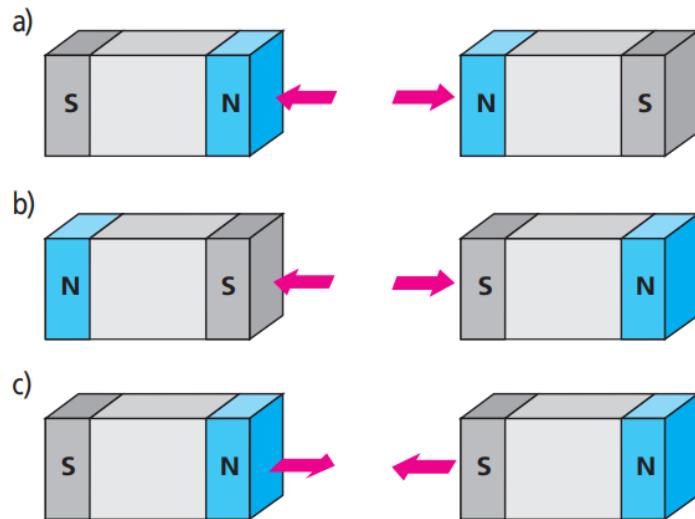


Figura 4: Em a e b, os ímãs se repelem, pois polos de mesmo nome estão próximos: norte-norte e sul-sul, respectivamente. Em c, os ímãs se atraem, já que polos de nomes diferentes estão próximos

Esse fato leva-nos a concluir que, se o polo norte magnético da agulha da bússola aponta para o polo norte geográfico, é porque no polo norte geográfico existe um polo sul magnético e no polo sul geográfico existe um polo norte magnético.

Os polos geográficos e os polos magnéticos da Terra não estão exatamente no mesmo local. É por isso que a agulha da bússola indica aproximadamente a direção norte-sul geográfica.

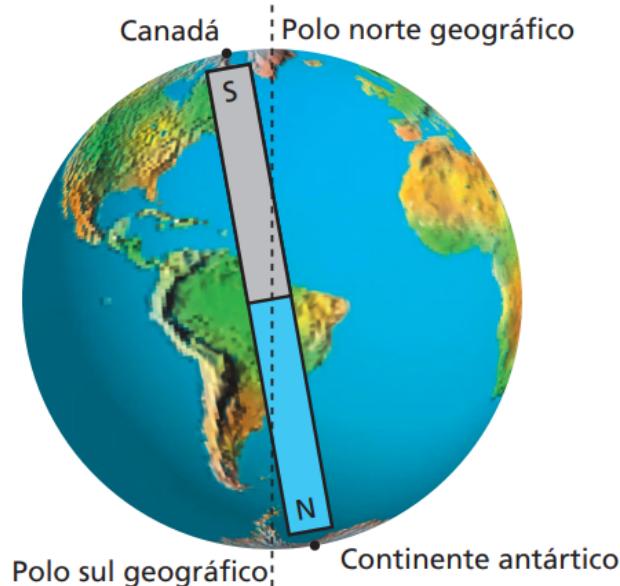


Figura 5: O polo sul magnético da Terra encontra-se no Canadá, a cerca de 1300 km do polo norte geográfico, e seu polo norte magnético está na costa do continente antártico. Dessa maneira, a Terra se comporta aproximadamente como o ímã representado, que forma cerca de 11° com a direção norte-sul geográfica

2.3 Lei das interações entre polos magnéticos

Em 1750, o geólogo e astrônomo inglês John Michell (1724-1793) usou uma balança de torção que ele mesmo inventou, para investigar as forças de campo entre polos magnéticos de imãs e concluiu a seguinte lei:

Dois polos magnéticos se atraem ou se repelem na razão inversa do quadrado da distância que os separa.

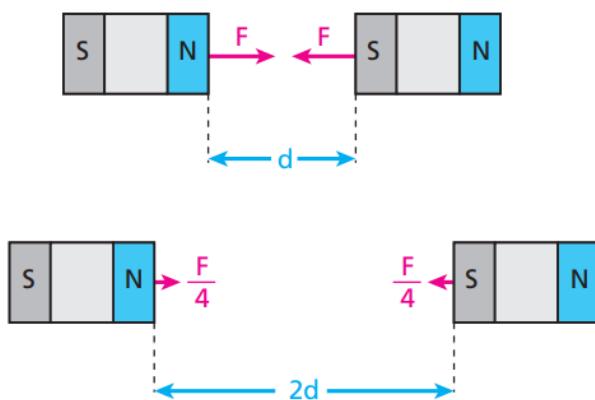


Figura 6: Dobrando a distância entre os polos, a intensidade das forças reduz-se a um quarto do valor inicial.

2.4 Inseparabilidade dos polos de um imã

É impossível separar os polos magnéticos de um imã, isso pode ser comprovado experimentalmente. Isso implica que é impossível conseguir um pedaço de imã que tenha só o polo norte magnético ou só o polo sul magnético. Quando dividimos um imã ao meio, obtemos dois outros imãs, cada um com seus próprios polos norte e sul. Se dividirmos ao meio esses dois novos imãs, obteremos quatro imãs também com seus próprios polos norte e sul e assim sucessivamente.

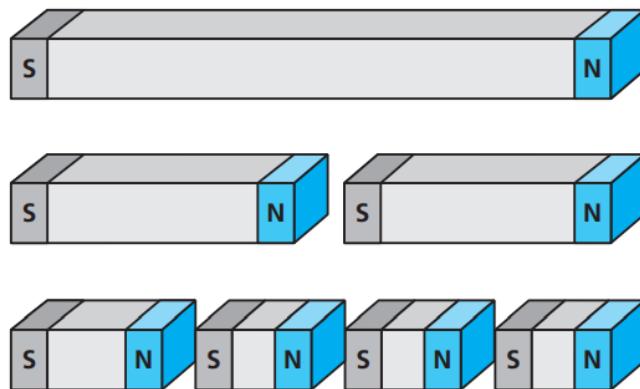
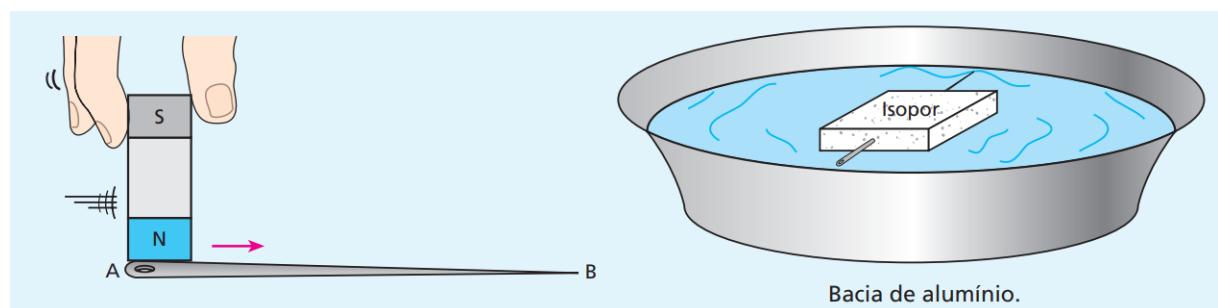


Figura 7: É impossível separar os polos magnéticos de um ímã. Cada pedaço continuará sendo sempre um dipolo magnético.

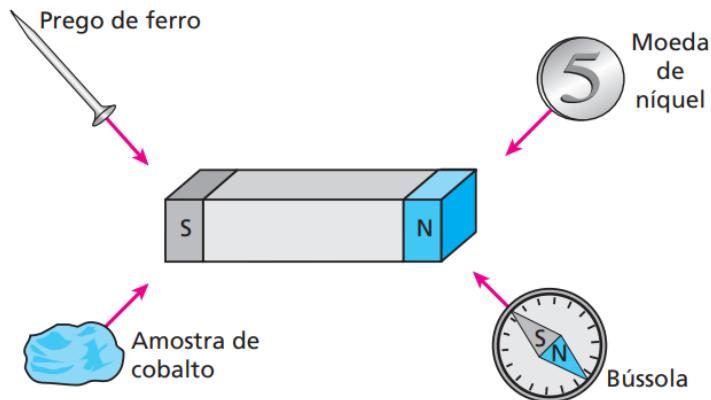
3 Construção de uma bússola



Deslize várias vezes em uma agulha de costura, sempre no mesmo sentido, o mesmo polo de um ímã, como mostra a figura acima. Passando o ímã na agulha, sempre de A para B, como mostra a figura, ela é imantada, de modo que a extremidade A se torna um polo norte magnético e a extremidade B, um polo sul magnético. Espete a agulha em um tablete de isopor e coloque o sistema para flutuar na água de um recipiente que não seja de ferro – pode ser de vidro, plástico ou alumínio. Construímos, assim, uma bússola. Observe que a agulha tende sempre a se alinhar em uma mesma direção, que é, aproximadamente, a direção norte-sul geográfica.

4 O campo magnético de um imã

Um imã cria uma região de influências que são significativas tanto em outros imãs como em alguns materiais, como o ferro, o cobalto, o níquel e algumas ligas. Essa região é denominada **campo magnético**, que é descrito por um vetor.



4.1 Vetor indução magnética

O campo magnético de um imã é descrito por um vetor. Esse vetor é denominado **vetor indução magnética** e simbolizado por \vec{B} .

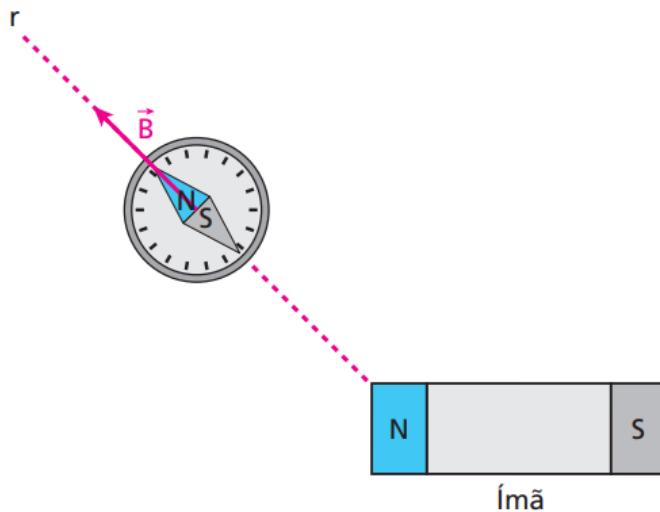


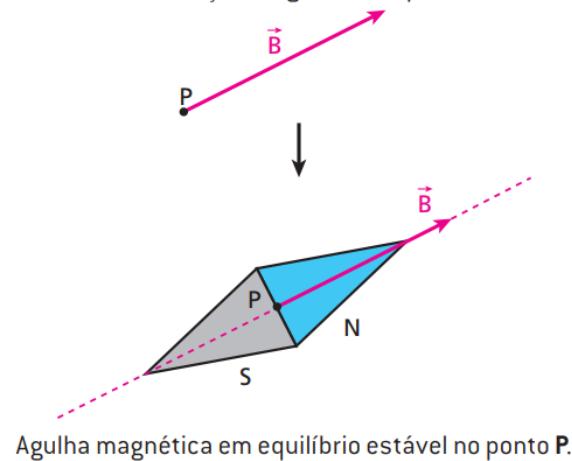
Figura 8: Bússola sob a ação do campo magnético de um imã, suponhamos desprezíveis outros eventuais campos magnéticos na região, inclusive o da Terra.

O vetor indução magnética \vec{B} , criado pelo imã, na posição em que a bússola está, com sua agulha em equilíbrio estável, tem a seguinte orientação:

Direção: da reta r com a qual a agulha se alinha. **Sentido:** Para onde aponta o polo norte magnético da agulha.

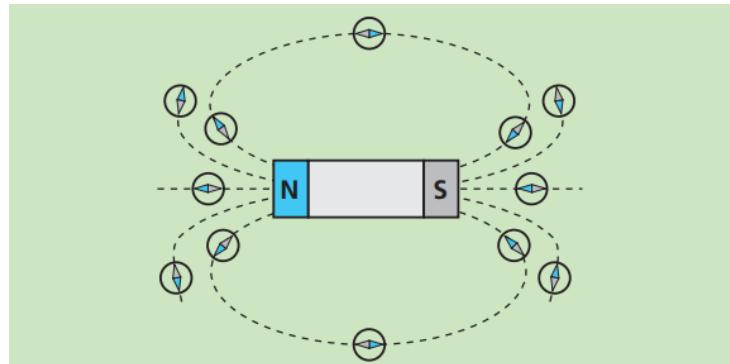
Se conhecermos o vetor indução magnética em determinado local, saberemos também como a agulha da bússola vai se estabilizar naquele local:

Vetor indução magnética no ponto **P**.

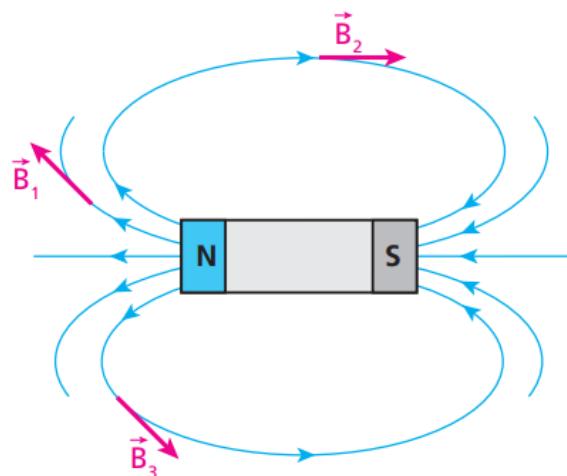


Agulha magnética em equilíbrio estável no ponto **P**.

Suponhamos, que temos agora, um imã e várias bússolas bem pequenas ao seu redor, todos sobre uma mesa de madeira. Podemos traçar linhas de um polo a outro do imã, de modo que elas tangenciem as agulhinhas das bússolas.



Essas linhas são denominadas **linhas de indução** do campo magnético do imã; na região externa ao imã, elas são orientadas convencionalmente do polo norte para o polo sul. O vetor \vec{B} , que tangencia essas linhas em cada um de seus pontos, tem sentido concordando com o das linhas.



Na região externa a um imã, as linhas de indução orientam-se do polo norte para o polo sul.

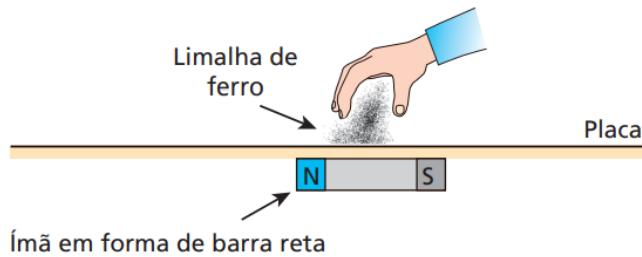


Figura 9: Podemos visualizar as linhas de indução, utilizando-se de uma limalha de ferro: colocando-se um imã debaixo de uma placa de papelão, plástico ou madeira fina e, em seguida, pulverizando a limalha de ferro por toda a placa.

Teremos uma configuração de linhas de indução, denominada padrão do campo magnético, conforme a figura a seguir.



Nesse experimento, cada fragmento da limalha de ferro imanta-se na presença do campo magnético do imã, comportando-se como uma minúscula agulha magnética. Com a limalha podemos observar o padrão do campo magnético de imãs com outros formatos.

Nota

Muitas vezes o vetor indução magnética \vec{B} é chamado de vetor campo magnético e até mesmo de campo magnético.

4.2 Características das linhas de indução

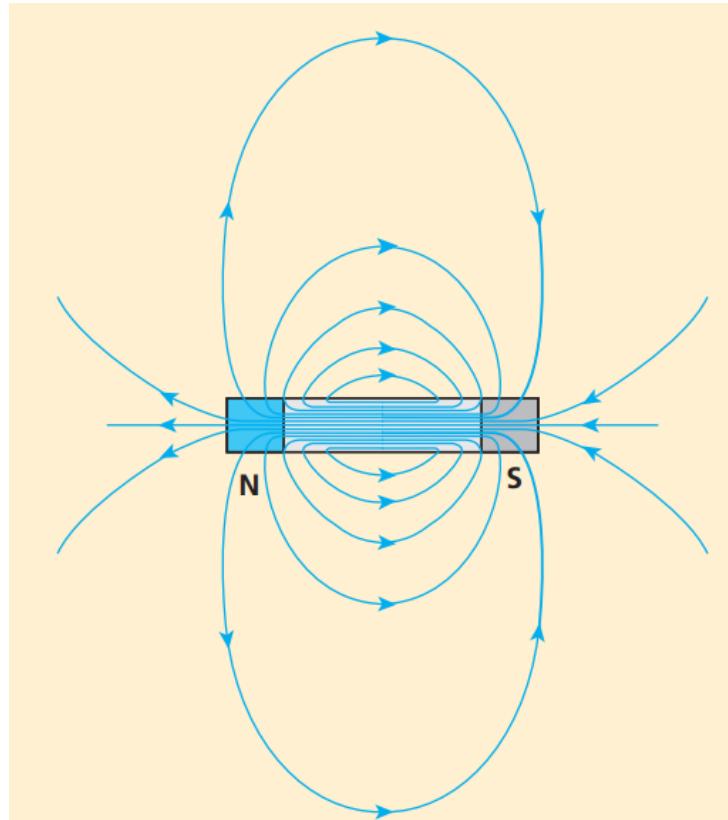


Figura 10: As linhas de indução do campo magnético de um imã não existem apenas na região externa a ele, mas também em seu interior. Portanto essas linhas são fechadas

Observe que, como na região externa ao imã a orientação dessas linhas foi convencionada de norte para sul, elas se orientam de sul para norte na região interna.

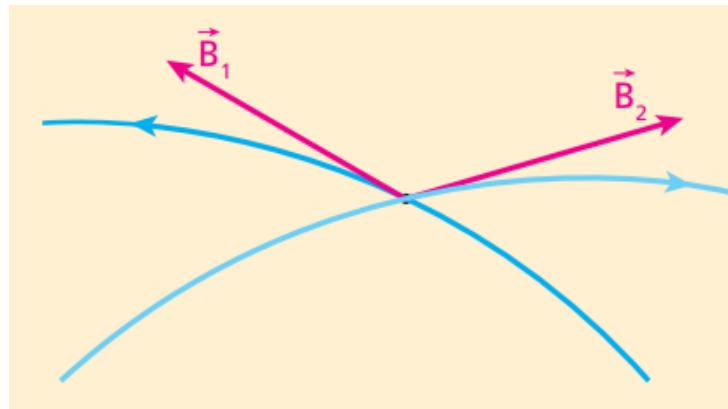


Figura 11: As linhas de indução de um campo magnético não podem se cruzar. Se isso acontecesse, o vetor \vec{B} teria duas orientações possíveis no cruzamento, o que é absurdo.

Ao representar um conjunto de linhas de indução, a concentração dessas linhas (densidade de linhas) é maior onde o campo magnético é mais intenso. Confirme isso, observando a concentração das linhas de indução nas proximidades dos polos do imã.

5 Campo magnético uniforme

Definição

Campo magnético uniforme é aquele em que o vetor indução magnética \vec{B} tem o mesmo módulo, a mesma direção e o mesmo sentido em todos os pontos do meio.

Embora possam ser desenhadas em todos os pontos do campo, as linhas de indução de um campo magnético uniforme são representadas por algumas linhas retas paralelas entre si e igualmente orientadas. Elas são desenhadas com espaçamentos iguais para indicar que a intensidade do campo é igual em toda a região:

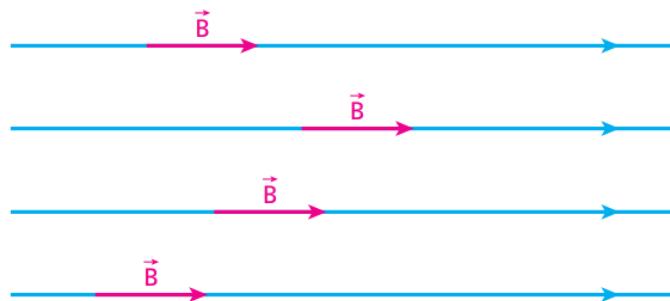


Figura 12: Em um campo magnético uniforme, as linhas de indução são representadas por linhas retas paralelas, igualmente espaçadas e com a mesma orientação.

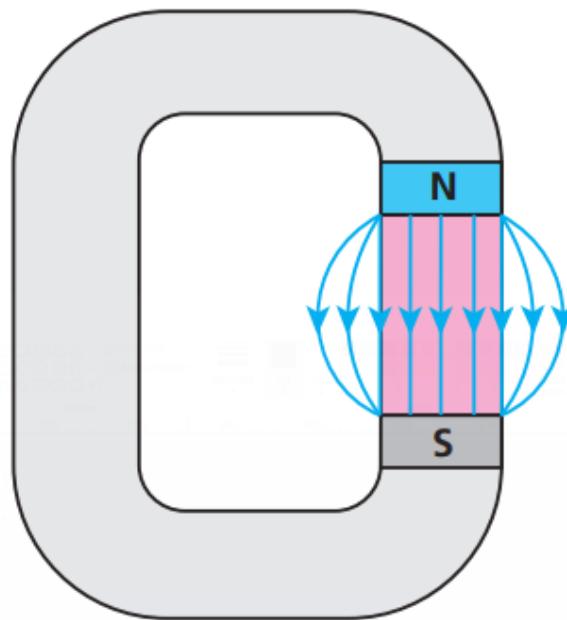


Figura 13: O campo magnético na região destacada na figura ao lado, entre os polos de um ímã em forma de U, é aproximadamente uniforme.

5.1 Outra representação

Imagine um campo magnético uniforme em que as linhas de indução são perpendiculares ao plano desta página. Se o sentido do campo for para fora do papel, ele será



Figura 14: Padrão do campo magnético criado por um ímã em forma de U, obtido com limalhas de ferro.

representado por um conjunto de pontos uniformemente distribuídos

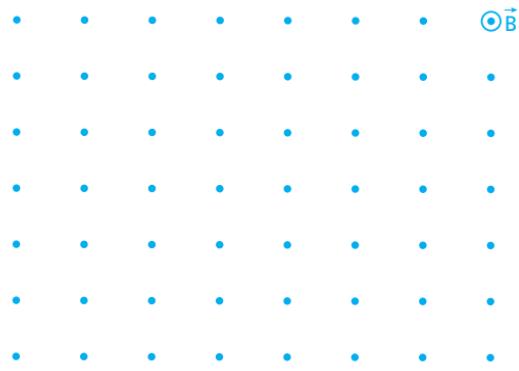


Figura 15: Campo magnético uniforme “saindo do papel”

Se ocorrer o contrário, isto é, se o sentido do campo for para dentro do papel, ele será representado por um conjunto de “cruzinhos” também uniformemente distribuídas



Figura 16: Campo magnético uniforme “entrando no papel”.

6 Ação do campo magnético sobre cargas elétricas

Elétrons, prótons e outros portadores de carga elétrica, por possuírem essa propriedade física, podem interagir com campos magnéticos, submetendo-se a uma força magnética \vec{F}_m . Vamos trabalhar com partículas eletrizadas submetidas a campos magnéticos estacionários, ou seja, campos magnéticos em que o vetor \vec{B} , em cada ponto do campo, é invariável no tempo, portanto não muda.

Esses campos são denominados campos magnetostáticos, podendo ser imãs permanentes e correntes elétricas contínuas e constantes (Segundo caso).

No estudo da \vec{F}_m numa partícula eletrizada com carga q , suponhamos primeiro que ela esteja com velocidade \vec{v} em relação a um referencial R , numa posição em que a mesma é submetida a um campo magnético estacionário, cujo vetor indução magnética é igual a \vec{B} .

Antes de tudo é nítido experimentalmente que a F_m só se manifesta quando a velocidade \vec{v} do portador de carga elétrica não é nula, e além disso, tem direção diferente da do vetor indução magnética \vec{B} .

6.1 Carga elétrica em repouso

Se tivermos um imã em repouso em um laboratório (referencial R) e uma partícula com carga q for abandonada em suas proximidades, com velocidade nula em relação ao imã, e portanto com velocidade nula em relação ao laboratório, não surgirá força magnética na partícula, independente se for carga positiva ou negativa.

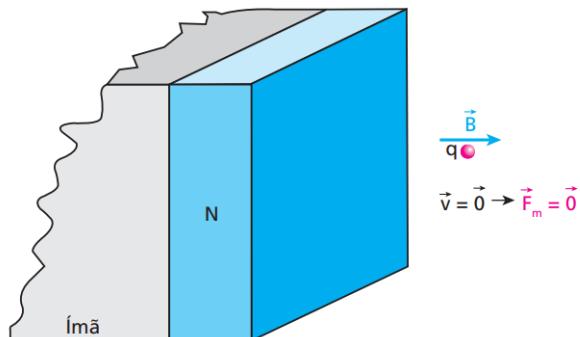


Figura 17: Imã em repouso no laboratório. A força magnética na partícula de carga q e $\vec{v} = 0$ é nula. Assim, se ela também estiver livre de outras forças, permanecerá em repouso na posição em que foi abandonada.

Um campo magnético estacionário não exerce força sobre portadores de carga elétrica que estão em repouso.

6.2 Carga elétrica em movimento na mesma direção do campo

Partículas com carga q , movendo-se entre os polos de um imã em repouso no laboratório, na mesma direção do campo uniforme de indução magnética \vec{B} e com velocidade \vec{v} em relação ao laboratório (ou imã), também não se submetem a forças magnéticas, independentemente do sinal da carga e do sentido do movimento.

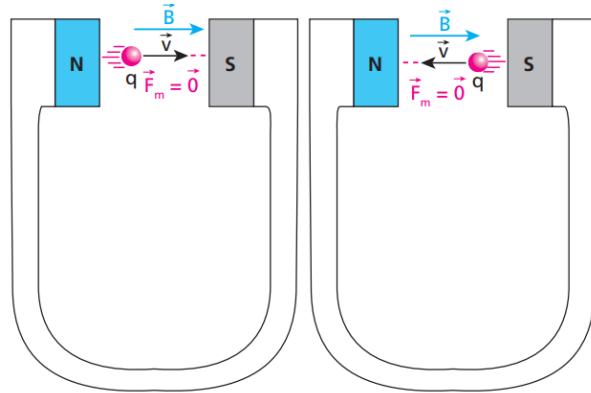


Figura 18: A força magnética na partícula de carga q é nula. Assim, enquanto nenhuma outra força relevante atuar nessa partícula, ela realizará um movimento retilíneo e uniforme.

Um campo magnético estacionário não atua em cargas elétricas que se movem na mesma direção desse campo

6.3 Carga elétrica em movimento de direção diferente da do campo

6.3.1 Carga movendo-se perpendicularmente ao campo

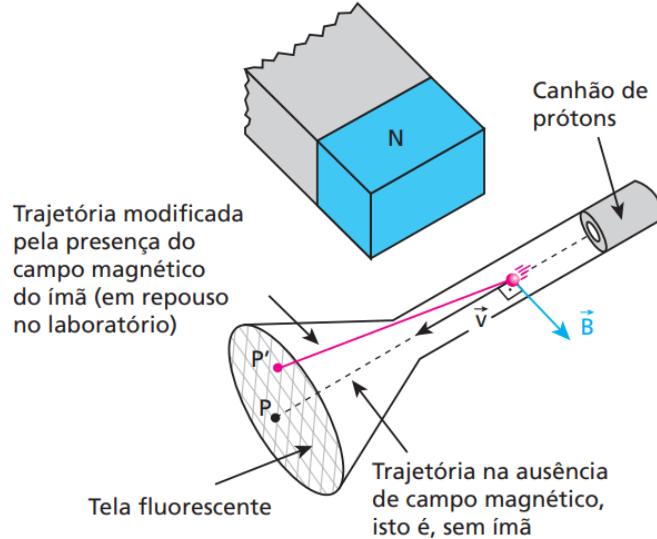


Figura 19: Um canhão de prótons está acoplado a um tubo de vidro em que se fez o vácuo. Sua extremidade mais larga é uma tela recoberta internamente com material fluorescente, de modo que o ponto atingido pelos prótons torna-se luminescente.

Na ausência do ímã, os prótons emitidos pelo canhão movem-se sensivelmente em linha reta, com velocidade \vec{v} em relação ao laboratório, atingindo o ponto P da tela. Na presença do ímã, entretanto, a trajetória modifica-se, e os prótons desviam-se para cima, atingindo P' em vez de P. Concluímos, então, que o campo magnético atuou nos prótons.

Esse experimento revela que, embora os prótons se desviam verticalmente para cima, o módulo de suas velocidades permanece o mesmo. Assim, a força magnética \vec{F}_m que o campo magnético faz surgir em cada próton deve ter direção perpendicular ao plano definido pelos vetores \vec{B} e \vec{v} e sentido para cima.

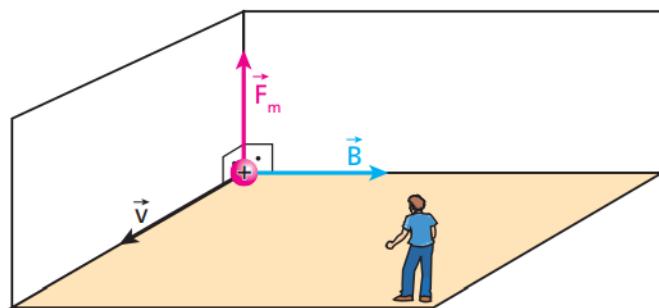


Figura 20: força magnética tem direção perpendicular ao plano definido por \vec{B} e \vec{v} .

Se substituirmos o canhão de prótons por um de elétrons e repetirmos o experimento descrito anteriormente, vamos observar que os elétrons se desviam para baixo. Isso significa que a força magnética \vec{F}_m tem sentido para baixo.

A intensidade da força magnética que atua numa partícula eletrizada pode ser obtida a partir do desvio sofrido pela partícula. Experimentos mostram que, em determinado

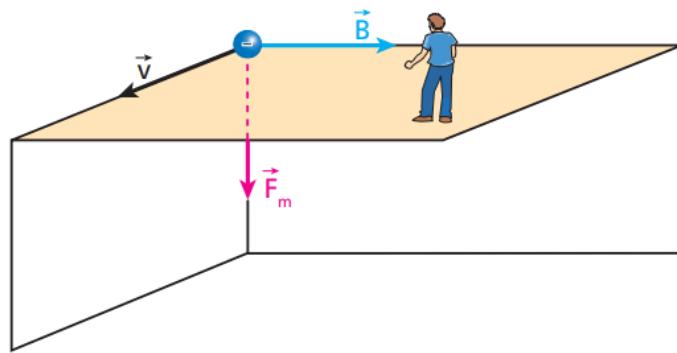


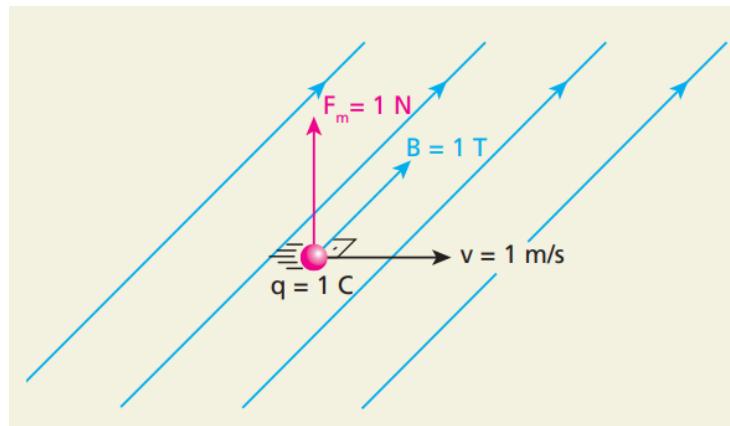
Figura 21: Na carga negativa a força magnética continua com direção perpendicular ao plano definido por \vec{B} e \vec{v} , mas com sentido invertido.

campo magnético, a intensidade dessa força é proporcional ao módulo da carga elétrica e ao módulo da velocidade da partícula (quando \vec{v} é perpendicular a \vec{B}). A intensidade de B , nesse caso, pode ser definida pela expressão:

$$B = \frac{F}{|q| \cdot v}$$

A intensidade do vetor indução magnética expressa a intensidade de força magnética por unidade de carga e por unidade de velocidade perpendicular a B . A unidade $\frac{\text{N}}{\text{C} \cdot \text{m/s}}$ é denominada tesla (símbolo: T), em homenagem ao físico e inventor iugoslavo Nikola Tesla (1856-1943). Portanto, no SI, a unidade de medida da intensidade de B é o tesla, e podemos dizer que:

Um tesla (1 T) é a intensidade de um campo magnético uniforme em que uma partícula hipoteticamente eletrizada com carga igual a 1 C, movendo-se com velocidade de 1 m/s, perpendicularmente ao campo, submete-se a uma força magnética de 1 N de intensidade.



6.4 Carga movendo-se em uma direção qualquer

Se a velocidade \vec{v} da partícula eletrizada formar com o vetor indução magnética \vec{B} um ângulo θ qualquer, podemos determinar as componentes de \vec{v} na direção de \vec{B} e na direção perpendicular a \vec{B} .

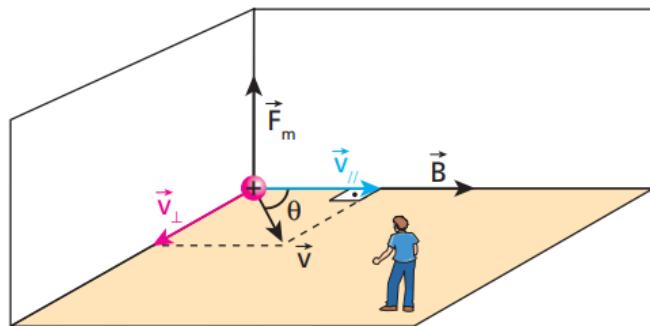


Figura 22: \vec{v}_{\parallel} é a componente de \vec{v} na direção de \vec{B} (paralela a \vec{B}). \vec{v}_{\perp} é a componente de \vec{v} na direção perpendicular a \vec{B} .

A componente \vec{v}_{\parallel} tem a mesma direção de \vec{B} e, como já vimos, não provoca o surgimento de força magnética. A componente \vec{v}_{\perp} é perpendicular a \vec{B} e, portanto, faz surgir uma força magnética tal que:

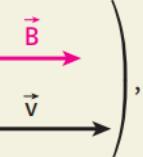
$$\vec{F} = |q|\vec{v}_{\perp} \Rightarrow \vec{F}_m = |q|v_{\perp}B \quad (\text{I})$$

Como $v_{\perp} = v \sin \theta$, temos, de (I):

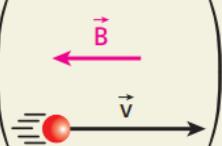
$$\vec{F}_m = |q|vB \sin \theta$$

em que θ é o menor ângulo entre \vec{v} e \vec{B} .

Se $v = 0$, então $F_m = 0$.

Se $\theta = 0^\circ$ , então

$\sin \theta = 0$ e $F_m = 0$.

Se $\theta = 180^\circ$ , então

$\sin \theta = 0$ e $F_m = 0$.

Se $\theta = 90^\circ$, então $\sin \theta = 1$ e $F_m = |q|vB$.

Além disso:

Se $q = 0$ (partícula eletricamente neutra),
 $F_m = 0$.

6.5 Regra da mão direita

O sentido do campo magnético é determinado usando uma regra, denominada regra da mão direita espalmada, que está de acordo com as observações experimentais.

6.5.1 Carga positiva

Considere uma partícula dotada de carga positiva q , movimentando-se com uma velocidade \vec{v} num campo de indução magnética \vec{B} e submetendo-se a uma força magnética \vec{F}_m .

Para determinar o sentido dessa força, aponte, com a mão direita espalmada, o polegar no sentido da velocidade \vec{v} e os outros dedos no sentido de \vec{B} . A força magnética \vec{F}_m será, então, perpendicular à palma da mão, “saindo” dela.

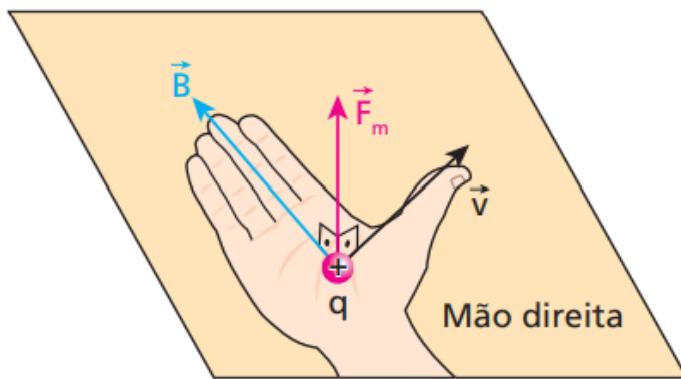


Figura 23: O polegar aponta no sentido de \vec{v} . Os outros dedos apontam no sentido de \vec{B} . A força “sai” da palma da mão.

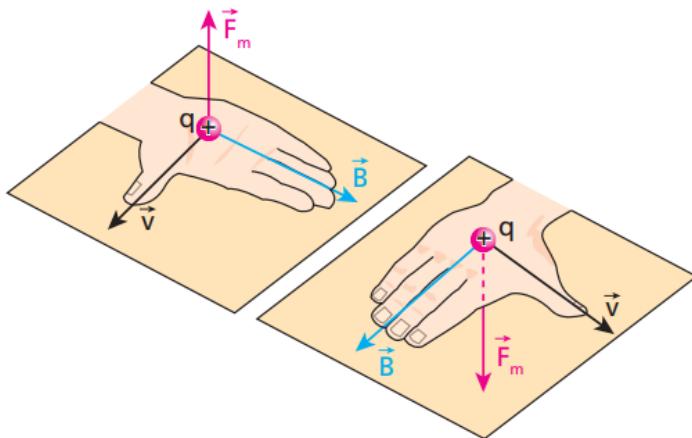


Figura 24: Exemplos de aplicação da regra da mão direita espalmada no caso de cargas positivas.

6.6 Para carga negativa

Se a carga for negativa, a força magnética terá sentido oposto ao que teria se a carga fosse positiva. Nesse caso, a força também é perpendicular à palma da mão, mas “entrando” nela.

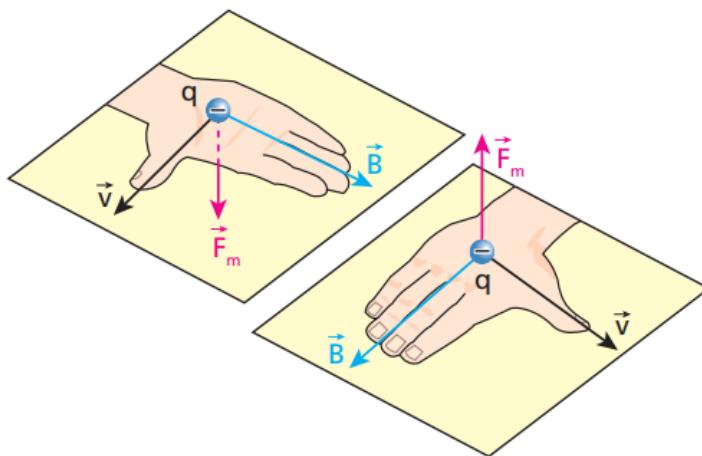
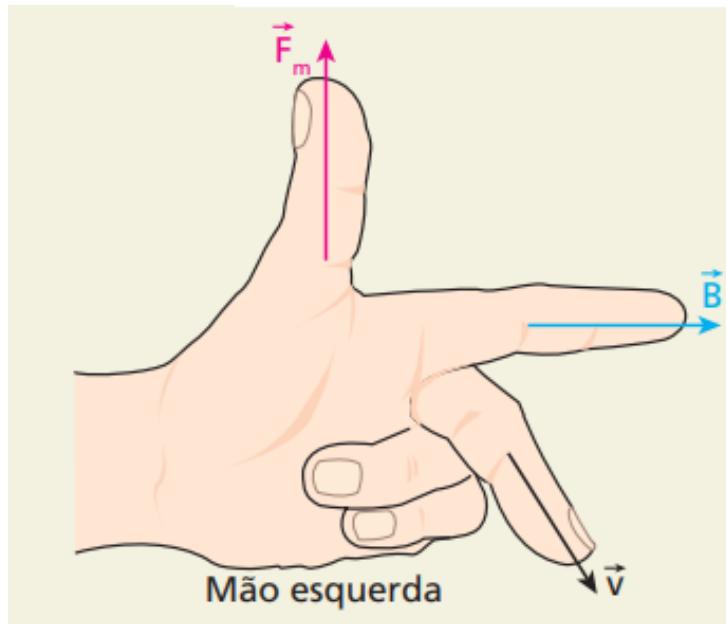


Figura 25: Exemplos de aplicação da regra da mão direita espalmada no caso de cargas negativas.

6.7 Regra de Fleming ou regra da mão esquerda

Esta é uma regra prática alternativa para determinar a orientação da força magnética atuante em uma partícula eletrizada. Para usá-la, devemos dispor o dedo indicador na direção e no sentido de \vec{B} , e o dedo médio na direção e no sentido de \vec{v} . Assim, o polegar indicará a direção e o sentido da força magnética \vec{F}_m , como ilustra a figura, caso a carga da partícula seja positiva. Se for negativa, o sentido da força \vec{F}_m será oposto ao previsto pela regra.



7 Efeito Hall

Em 1879, o físico norte-americano Edwin Hall (1855-1938) realizou um experimento para descobrir o sinal, positivo ou negativo, da carga das partículas que constituem a corrente elétrica em um condutor qualquer.

A corrente tem o sentido indicado, quer os portadores móveis tenham carga positiva e velocidade \vec{v}_1 (região R_1), quer tenham carga negativa e velocidade \vec{v}_2 (região R_2). Os

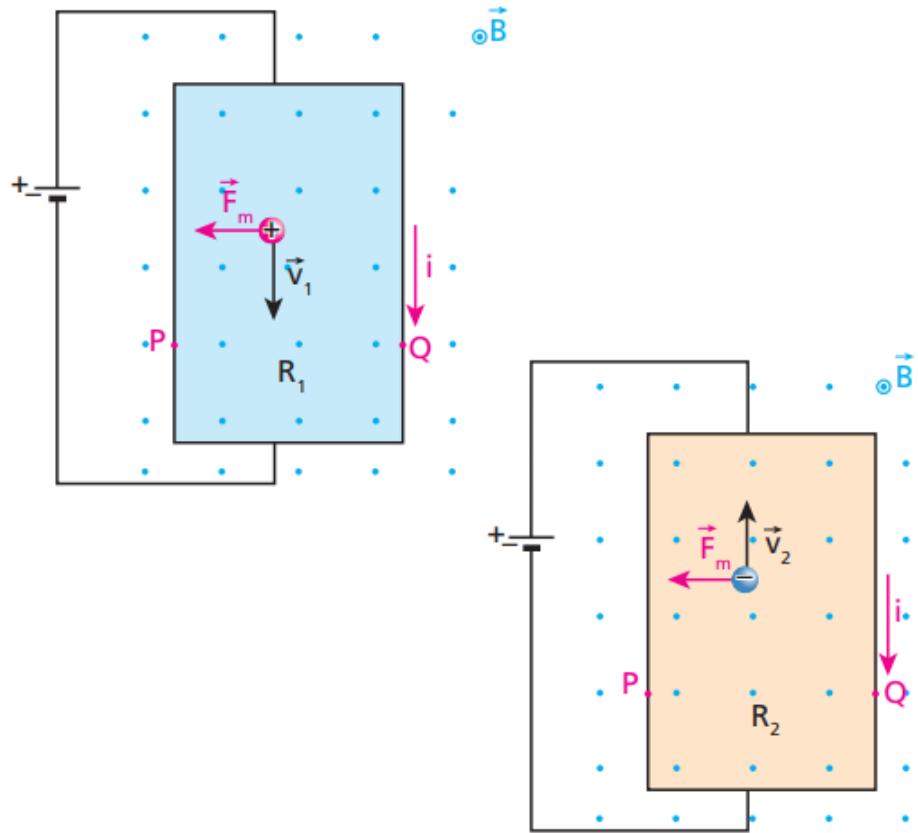


Figura 26: Duas regiões retangulares, R_1 e R_2 , condutoras, percorridas por correntes elétricas no sentido indicado. Essas regiões estão imersas num campo magnético “saindo” dessa página, perpendicularmente a ela.

portadores se submetem a forças magnéticas orientadas para a esquerda.

Desse modo, na região R_1 haverá um acúmulo de cargas positivas no lado esquerdo, o que torna o potencial elétrico do ponto P , ν_P , maior que o do ponto Q , ν_Q . Na região R_2 , por sua vez, haverá um acúmulo de cargas negativas, também no lado esquerdo, o que torna ν_P menor que ν_Q . Medindo, então, a diferença de potencial entre P e Q , podemos descobrir se os portadores móveis têm carga positiva ou negativa. A conclusão experimental de que ν_P é maior que ν_Q revela-nos que os portadores têm carga positiva. Se, porém, concluirmos que ν_P é menor que ν_Q , saberemos que os portadores têm carga negativa.

8 Campo magnético uniforme e constante

Em um campo magnético uniforme o vetor \vec{B} é igual em todos os pontos, entretanto esse vetor pode ser variável com o tempo.

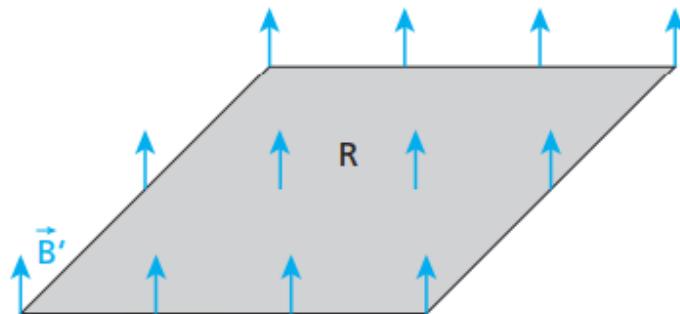


Figura 27: Campo magnético na região R, no instante t'

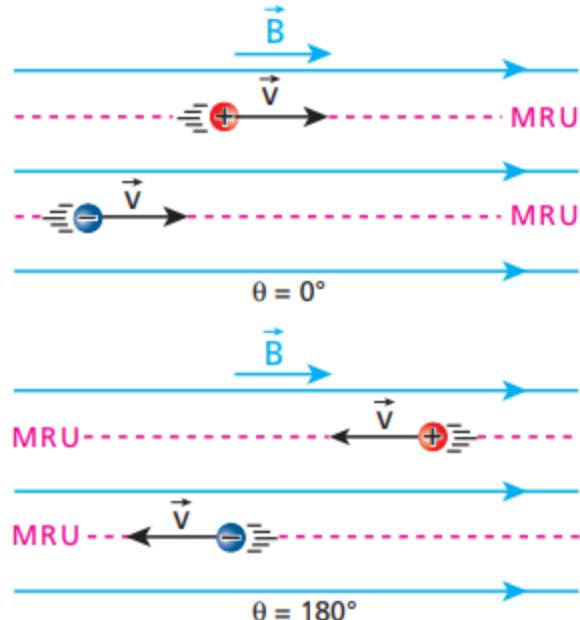
O campo magnético na região R é uniforme, mas não é constante, pois varia com o tempo. Portanto, um campo magnético é uniforme e constante quando o vetor \vec{B} , além de ser igual em todos os pontos, não apresenta variações com o passar do tempo.

8.1 Movimento de portadores de carga elétrica lançados em um campo magnético uniforme e constante

Há tipos de movimentos que uma partícula dotada de carga elétrica pode realizar ao ser submetida em um campo magnético uniforme e constante.

8.1.1 Quando a velocidade \vec{v} tem mesma direção de \vec{B}

Se a partícula é lançada na mesma direção do campo magnético, o ângulo θ , entre \vec{v} e \vec{B} , é igual a 0° ou 180° . Assim, $\sin \theta$ é igual a zero, e a força magnética também é nula. Consequentemente, a partícula realiza um movimento retilíneo e uniforme (MRU).



8.2 Quando a velocidade \vec{v} tem direção perpendicular a \vec{B}

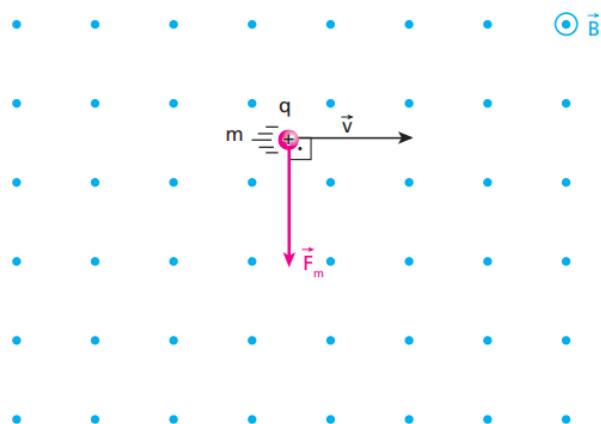


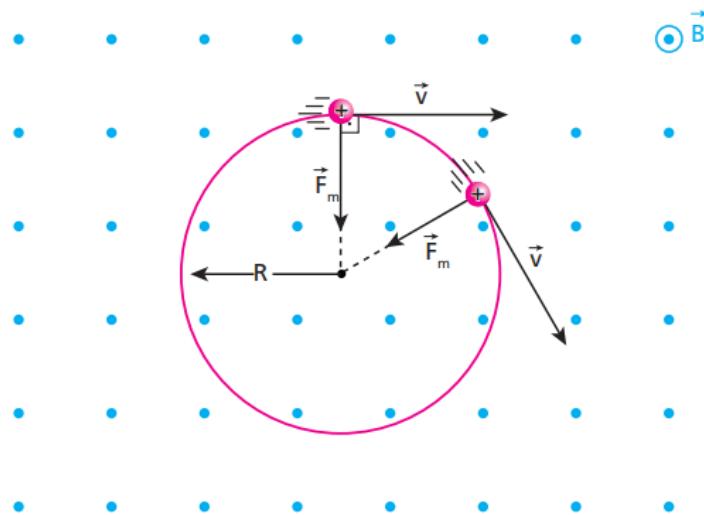
Figura 28: A representação de um campo magnético uniforme e constante, perpendicular a esta página e apontando para você. Uma partícula de massa m , dotada de carga positiva q , é lançada perpendicularmente ao campo \vec{B} .

Como a força magnética \vec{F}_m é perpendicular à velocidade \vec{v} , o movimento da partícula é uniforme: \vec{F}_m só pode modificar a direção de \vec{v} , fazendo a partícula descrever uma trajetória curvilínea plana.

Sendo \vec{F}_m uma força centrípeta, e o ângulo θ entre \vec{B} e \vec{v} igual a 90° , podemos escrever:

$$\begin{aligned}\vec{F}_m &= \vec{F}_{cp} \Rightarrow |q|vB \sin 90^\circ = \frac{mv^2}{R} \\ \Rightarrow |q|B &= \frac{mv}{R} \\ \Rightarrow R &= \frac{mv}{|q|B}\end{aligned}$$

Como os valores de m , v , q e B são os mesmos em todos os pontos da trajetória da partícula, o raio de curvatura R dessa trajetória também é igual em todos os pontos. Por isso, a curva plana descrita pela partícula é uma circunferência.



Conclusão

Quando um portador de carga elétrica é lançado perpendicularmente a um campo magnético uniforme e constante, ele realiza um movimento circular e uniforme de raio R , dado por:

$$R = \frac{mv}{|q|B}$$

8.3 Determinação do período T desse movimento.

Temos que:

$$R = \frac{mv}{|q|B} \Rightarrow v = \frac{|q|BR}{m} \quad (\text{I})$$

Sabemos, também, que:

$$v = \frac{\Delta s}{\Delta t} \Rightarrow v = \frac{2\pi R}{T} \quad (\text{II})$$

Igualando as expressões (I) e (II), obtemos:

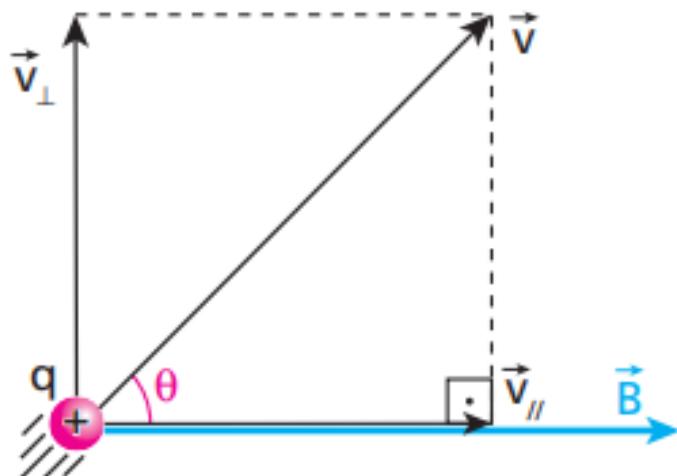
$$\frac{2\pi R}{T} = \frac{|q|BR}{m} \Rightarrow T = \frac{2\pi m}{|q|B}$$

Observe, na expressão obtida, que o período desse movimento não depende do valor da velocidade da partícula nem do raio da circunferência. Isso acontece porque a alteração de v (veja a expressão (I)) acarreta uma alteração proporcional em R e, consequentemente, no perímetro $2\pi R$ da circunferência. Assim, quanto maior for v , maior será o comprimento da circunferência a ser percorrida pela partícula, mas o período será o mesmo.

Esse fato tem grande importância nos aceleradores de partículas para bombardeamento de núcleos atômicos.

8.4 Quando a velocidade \vec{v} forma com \vec{B} um ângulo θ , tal que $0^\circ < \theta < 90^\circ$

A velocidade \vec{v} com que a partícula é lançada admite a componente $\vec{v}_{||}$, paralela a \vec{B} , e a componente \vec{v}_\perp , perpendicular a \vec{B} .



A componente $v_{||}$ não se altera, pois o campo magnético não influí em movimentos de mesma direção que a sua. Assim, temos, na direção de \vec{B} , um movimento retilíneo e uniforme (MRU), com velocidade $v_{||}$ de módulo igual a $v \cos \theta$:



Figura 29: Na direção de \vec{B} , o movimento é retilíneo e uniforme.

$$v_{||} = v \cos \theta$$

A componente \vec{v}_\perp , igual, em módulo, a $v \sin \theta$, gera um movimento circular e uniforme (MCU), estando a circunferência contida em um plano perpendicular a \vec{B} :

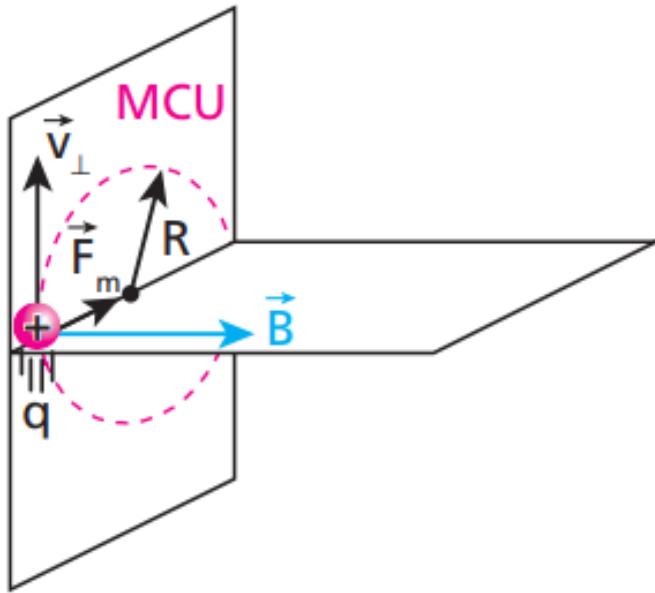


Figura 30: Na direção perpendicular a \vec{B} , o movimento é circular e uniforme.

$$v_{\perp} = v \sin \theta$$

$$R = \frac{mv_1}{|q|B} = \frac{mv \sin \theta}{|q|B}$$

O movimento resultante é, então, a composição do MRU com o MCU, que dá origem a um movimento helicoidal e uniforme (MHU)

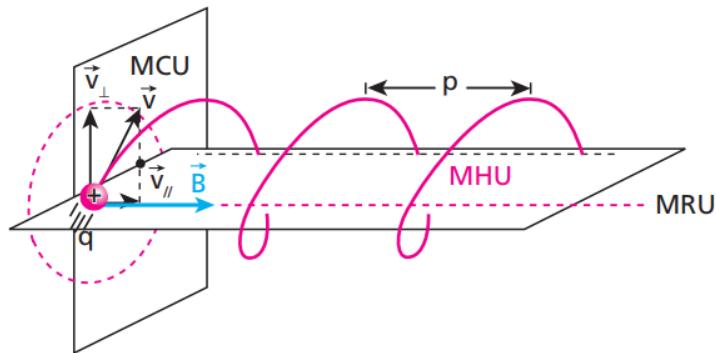


Figura 31: Ao mesmo tempo em que descreve o MCU, a partícula desloca-se para a direita em MRU. Portanto o movimento resultante é helicoidal e uniforme.

A curva descrita pela partícula é denominada hélice cilíndrica, e o comprimento p indicado na figura anterior é o passo da hélice, isto é, a distância que a partícula percorre na direção de \vec{B} , em MRU, durante um período T do MCU.

Para determinar o passo p , devemos lembrar que:

$$T = \frac{2\pi m}{qB}$$

e

$$v_{\parallel} = v \cos \theta$$

Com relação ao MRU, temos:

$$\Delta s = v_{\parallel} t \Rightarrow p = v_{\parallel} T \Rightarrow p = v \cos \theta \cdot \frac{2\pi m}{|q|B}$$

Portanto, o passo p é dado por:

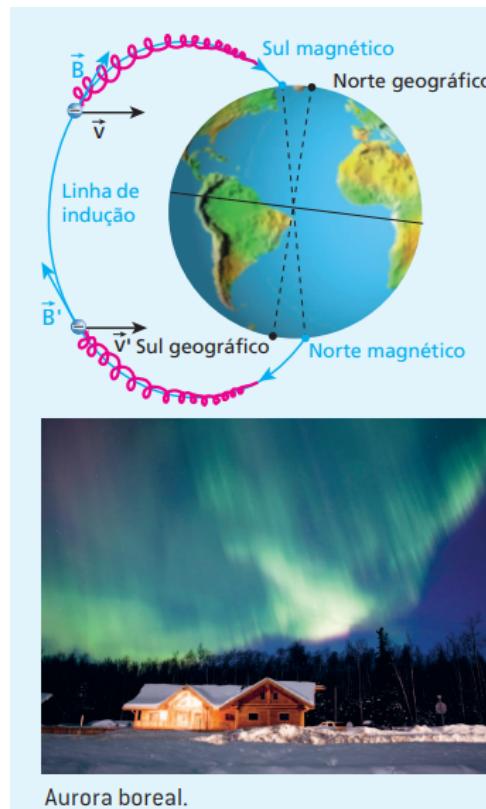
$$p = \frac{2\pi m v \cos \theta}{|q|B}$$

9 Auroras polares

Além de ondas eletromagnéticas, a atmosfera terrestre recebe do Sol partículas dotadas de carga elétrica (o "vento solar"), com predominância de elétrons. Esses elétrons interagem com o campo magnético da Terra, dirigindo-se para os polos. Esses elétrons estão chegando do Sol e excitam o oxigênio (que então emite luz azul-esverdeada) e o nitrogênio (que emite luz avermelhada). Nas proximidades dos polos, isso dá origem a espetaculares colorações no céu, denominadas auroras boreais, quando acontecem no hemisfério norte, e auroras austrais, quando acontecem no hemisfério sul. Esse fenômeno é mais frequente e mais intenso nas épocas em que aumenta a atividade solar, pois isso acentua o "vento solar".

9.0.1 Nota

Os elétrons do "vento solar" também excitam outros gases. Entretanto as porcentagens desses gases são muito pouco significativas em comparação às do nitrogênio e do oxigênio.



10 A origem do campo magnético

10.1 Introdução

Em 1820, o dinamarquês Hans Christian Oersted (1777-1851), professor de Física da Universidade de Copenhague, mostrou experimentalmente que os fenômenos elétricos e os magnéticos não eram tão independentes como se supunha até então. Oersted descobriu que um fio percorrido por corrente elétrica, colocado nas proximidades de uma bússola, era capaz de provocar desvio na agulha magnética. Dessa maneira, comprovou-se a ligação existente entre eletricidade e magnetismo.



Figura 32: Hans Christian Oersted, físico dinamarquês, que muito contribuiu para o desenvolvimento do Eletromagnetismo e de suas aplicações tecnológicas

Oersted acabou realizando-se um experimento, ao qual está ilustrado a seguir:

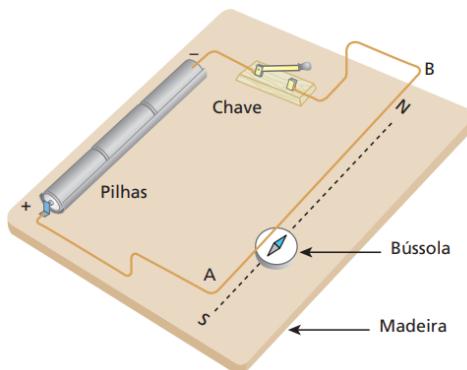


Figura 33: Na figura, a agulha da bússola já se estabilizou na direção norte-sul. A chave está aberta e, portanto, não circula corrente no fio condutor AB (de cobre), disposto paralelamente à agulha e acima dela.

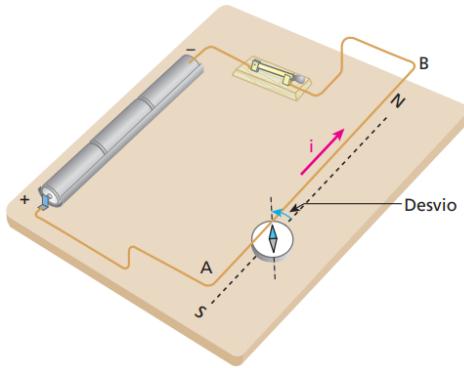


Figura 34: Fechando-se a chave, o condutor AB é percorrido por uma corrente i , no sentido indicado. A agulha sofre um desvio, estabilizando-se numa direção diferente da anterior. Abrindo-se a chave, a agulha volta a se estabilizar na direção norte-sul

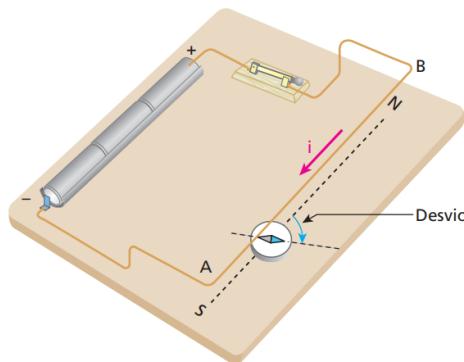


Figura 35: Invertendo o sentido da corrente, a agulha sofre um desvio no sentido oposto.

Interpretamos o resultado desse experimento da seguinte maneira, a agulha da bússola sempre vai se estabilizar na direção do campo magnético no local em que ela se encontra, com seu polo norte magnético apontando no sentido desse campo.

Na primeira figura temos que a agulha da bússola está alinhada com o campo magnético da terra, após passar uma corrente elétrica notamos que a agulha da bússola se estabilizou em direções diferentes, portanto, com um campo magnético diferente. Constatou-se, então, que a corrente elétrica no fio AB criou um campo magnético que, composto com o da Terra, produziu um campo magnético resultante, com o qual a agulha passou a se alinhar. Podemos formalizar então:

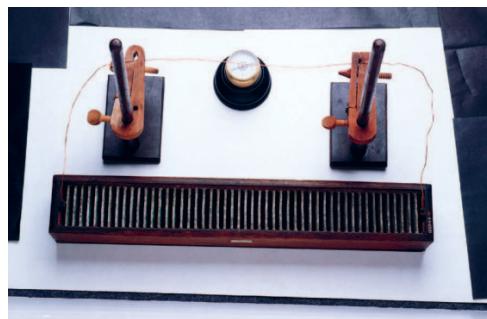


Figura 36: Réplica do equipamento usado por Oersted em seu experimento.

podemos questionar a origem do campo magnético de um ímã. Para um ímã produzir seu campo magnético, ele não precisa ser ligado a uma pilha ou a uma bateria, ou seja,

não precisamos fazer uma corrente elétrica passar por ele. Do ponto de vista clássico, a causa do campo magnético de um ímã, entretanto, continua sendo correntes elétricas: são pequeníssimas correntes devidas ao movimento dos elétrons dos átomos que constituem o ímã.

Cargas elétricas em movimento, ou seja, correntes elétricas, criam um campo magnético na região do espaço que as circunda, sendo, portanto, fontes de campo magnético.

10.1.1 Nota

Um corpo eletrizado e em movimento em relação a um determinado referencial cria, nesse referencial, um campo elétrico \vec{E} , por estar eletrizado, e um campo magnético \vec{B} , por estar eletrizado e em movimento.

10.2 Campo magnético gerado por um fio retilíneo muito longo (infinito)

10.2.1 Linhas de indução

Quando consideramos "fio infinito" ou "fio muito longo", estamos considerando a priori regiões próximas do fio e bem afastadas de suas extremidades. O experimento a seguir é de um experimento em que será gerado um campo magnético supostamente intenso o suficiente para ser desprezível o campo magnético da terra.

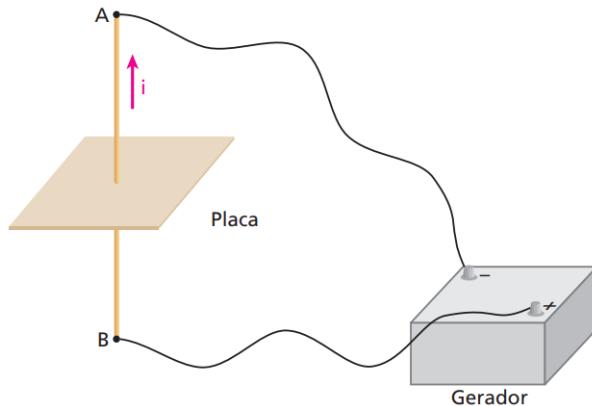


Figura 37: Um fio retilíneo AB perfura uma placa, de papelão, madeira ou plástico, perpendicularmente. Esse fio está ligado a um gerador, capaz de produzir nele uma corrente elétrica de grande intensidade i . Se pulverizarmos limalha de ferro sobre a placa, poderemos observar a configuração das linhas de indução do campo magnético gerado pelo fio.

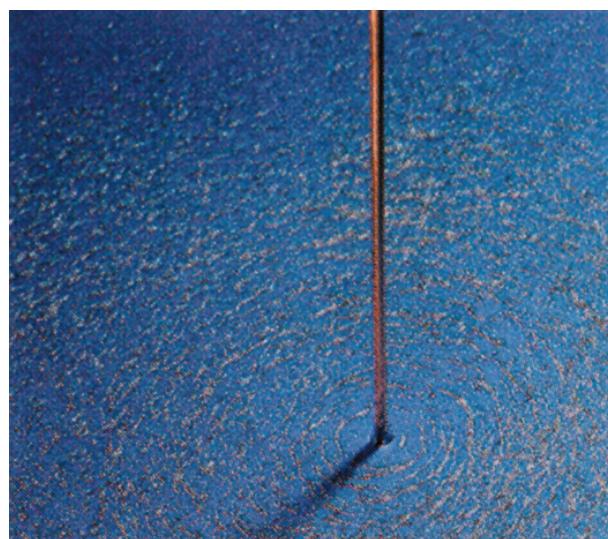


Figura 38: Padrão do campo magnético gerado pela corrente elétrica em um fio retilíneo. Cada partícula de ferro se comporta como uma minúscula agulha imantada.

As linhas de indução desse campo são circunferências dispostas em um plano perpendicular ao fio, todas com centro nesse fio. Para descobrir o sentido dessas linhas de indução, usamos uma bússola, em vez de limalhas de ferro. Deslocamos a bússola sobre a placa, mantendo-a sempre à mesma distância do fio.

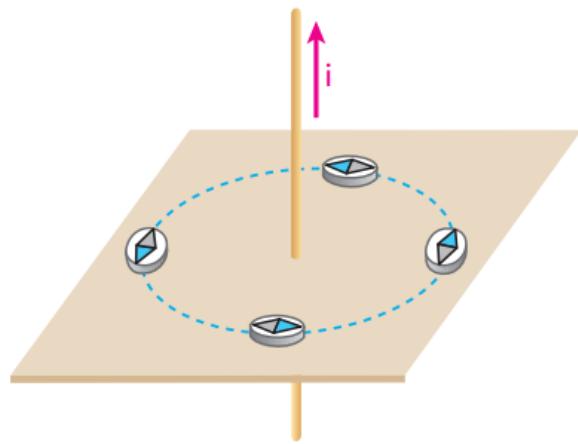


Figura 39: Campo magnético gerado pela corrente elétrica em um fio retilíneo. A agulha se alinha com o vetor \vec{B} , criado pelo fio, com seu polo norte magnético apontando no sentido de \vec{B} .

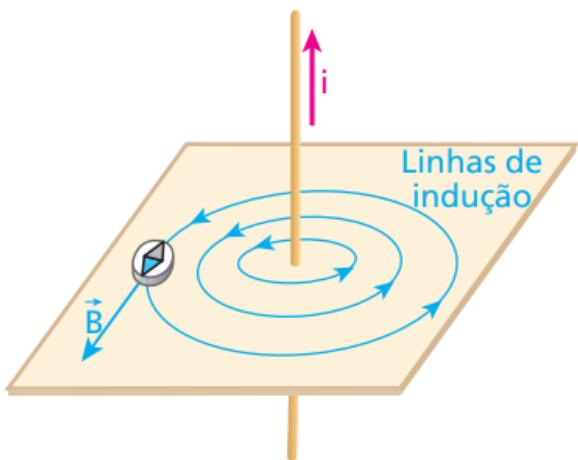


Figura 40: O vetor \vec{B} é, em cada ponto, tangente a uma linha de indução e tem o sentido indicado por ela.



Regra da mão direita envolvente.

Figura 41: Regra da mão direita envolvente.

A regra da mão direita envolvente é uma regra utilizada para orientar as linhas de indução. "Segure" o fio com a mão direita, de modo que seu dedo polegar aponte no sentido da corrente elétrica i . Os outros dedos darão, automaticamente, o sentido das linhas de indução.

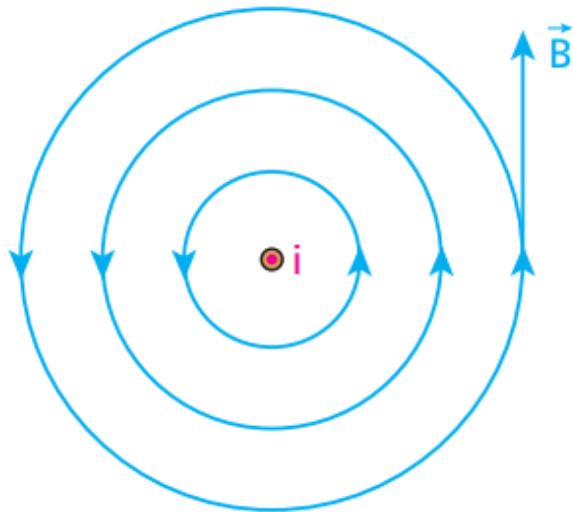


Figura 42: Fio perpendicular ao plano do papel, com a corrente "saindo" desse plano.

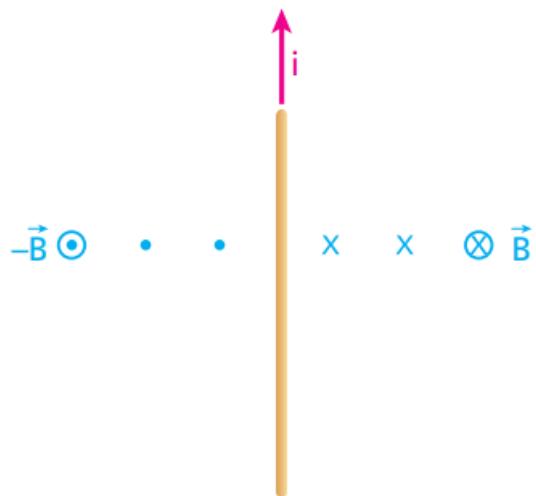


Figura 43: Fio estendido no plano do papel. À direita do fio, as linhas de indução têm sentido entrando no papel e, à esquerda do fio, saindo do papel.

10.3 Conceituando a Experiência de Oersted

Na ausência de corrente no fio, a agulha se alinha com o vetor de indução magnética da Terra, \vec{B}_{Terra} , suposto horizontal.

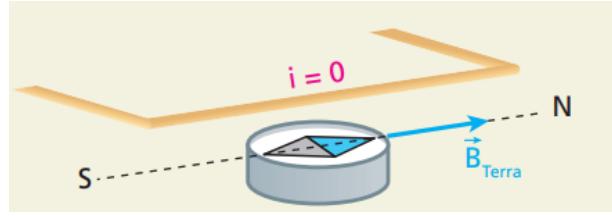


Figura 44: A agulha alinha-se com \vec{B}_{Terra} , com seu polo norte apontando no sentido de \vec{B}_{Terra} .

Quando o fio é percorrido por uma corrente de intensidade i , ele cria um campo \vec{B}_{fio} , e a agulha se alinha com o campo \vec{B} , resultante de \vec{B}_{Terra} com \vec{B}_{fio} .

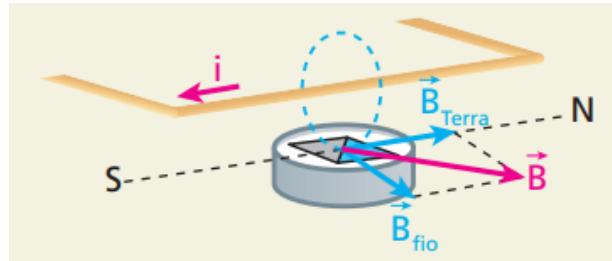


Figura 45: A agulha alinha-se com \vec{B} e seu polo norte aponta no sentido de \vec{B} .

10.4 Intensidade do vetor indução magnética

O cálculo da intensidade do vetor \vec{B} , criado por um condutor retilíneo muito longo, requer o conhecimento da Lei de Ampère. Podemos formalizar da seguinte maneira:

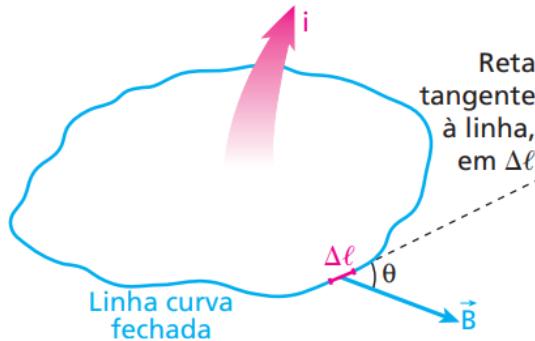


Figura 46: Consideremos uma linha curva qualquer, fechada, contida em um meio em que existe um campo magnético \vec{B} . Vamos representar por $\Delta\ell$ o comprimento de um trecho elementar ("pedacinho") dessa linha e por i a intensidade constante da corrente elétrica que atravessa a região envolvida pela linha.

A Lei de Ampère é formulada da seguinte forma:

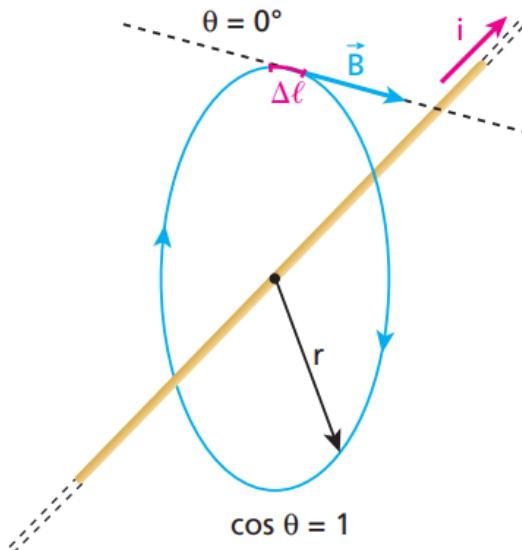
$$\sum B \Delta\ell \cos \theta = \mu i$$

O somatório deve ser feito ao longo de toda a linha curva fechada. A grandeza μ é denominada permeabilidade absoluta do meio em que a linha curva foi traçada. Ela mede a facilidade com que o material permite a formação de um campo magnético dentro dele, e está relacionada com a intensidade do campo magnético gerado por uma corrente

elétrica ou por uma fonte magnética externa magnetizar quando submetido a um campo magnético.

Trata-se de uma característica do meio, e sua unidade, no SI, é Tm/A ($\frac{\text{tesla metro}}{\text{ampére}}$).

Aplicaremos essa lei, ao longo de uma linha de indução, já que pode ser usada qualquer curva fechada.



Temos que:

$$\sum B \Delta\ell \cos \theta = \mu i \Rightarrow \sum B \Delta\ell = \mu i$$

Por simetria, a intensidade de B é a mesma em todos os pontos da linha de indução.

Então:

$$B \sum \Delta\ell = \mu i \quad (\text{I})$$

Note que o somatório de todos os $\Delta\ell$ é o perímetro da linha de indução, ou seja:

$$\sum \Delta\ell = 2\pi r \quad (\text{II})$$

Substituindo (II) em (I), obtemos:

$$B 2\pi r = \mu i \Rightarrow B = \frac{\mu i}{2\pi r} \quad (\text{III})$$

onde ℓ é o comprimento de um segmento da linha de indução.

10.5 Permeabilidade absoluta do vácuo

Suponha que o meio ao redor do condutor seja o vácuo. A permeabilidade absoluta do vácuo, cujo símbolo é μ_0 , tem, no SI, o seguinte valor, simplesmente adotado:

$$\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \frac{\text{Tm}}{\text{A}}$$

O valor da permeabilidade absoluta μ de muitos outros meios, como o ar, a água e o óleo, por exemplo, são praticamente iguais a μ_0 .

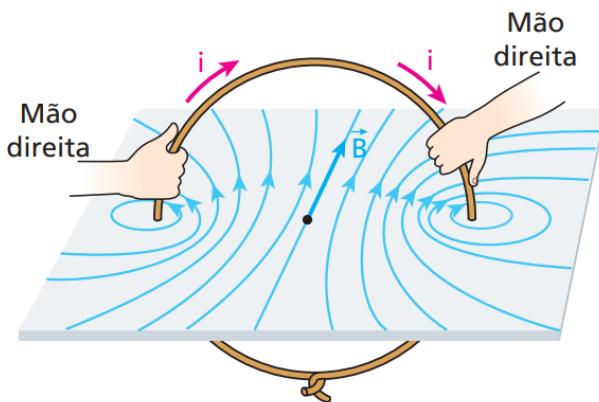


Figura 48: Configuração das linhas de indução, em um plano que contém o eixo da espira. O sentido das linhas de indução é, também dado pela regra da mão direita envolvente.

11 Campo magnético gerado por uma espira circular

11.1 Linhas de indução

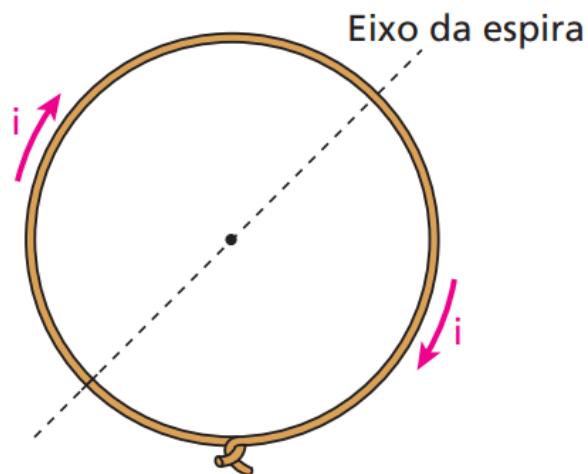


Figura 47: Espira circular percorrida por ma corrente elétrica de intensidade constante i .

Se repetirmos os experimentos sugeridos para o fio retilíneo, obteremos os resultados a seguir.

Referências

[Helou et al., 2010] Helou, D., Gualter, J. B., and Newton, V. B. (2010). *Tópicos de Física*, volume 3. Editora Saraiva, São Paulo, 1^a edition.