

1: Força exercida sobre um condutor

O segundo fenômeno eletromagnético é o seguinte: suponhamos que um condutor AC seja colocado em um campo magnético: se por esse condutor passar uma corrente elétrica, o campo magnético exercerá uma força sobre ele (fig. 287).

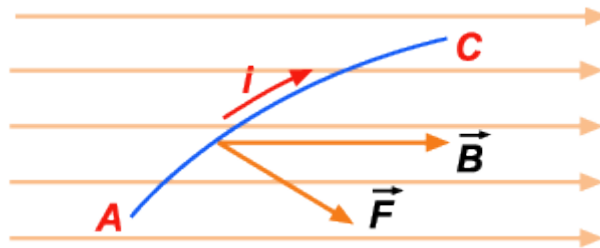


Figura 287

2: Cálculo da força - 2ª Lei elementar de Laplace

Podemos determinar o módulo, a direção e o sentido da força que atua no condutor.

a. Modulo

É calculado pela 2ª lei elementar de Laplace. Para calcularmos a força, imaginamos o condutor dividido em um número muito grande de partes. Cada uma dessas partes é chamada um elemento do condutor. A 2ª lei de Laplace se refere ao módulo da força que atua em cada um desses elementos; por isso é chamada lei elementar.

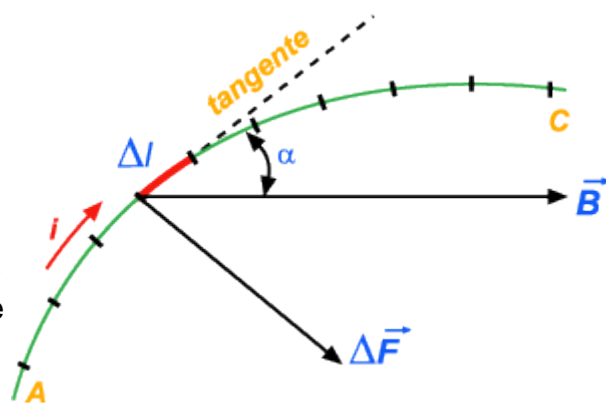


Figura 288

Seja:

Δl o comprimento de um elemento;
 i a intensidade da corrente;

\vec{B} a indução magnética no lugar em que está o elemento;
 α o ângulo formado por \vec{B} e a tangente ao elemento.

A 2ª lei elementar de Laplace diz que o módulo da força $\Delta\vec{F}$ que atua em Δl vale:

$$|\Delta\vec{F}| = i \cdot |\vec{B}| \cdot \Delta l \cdot \text{sen}\alpha$$

Isto é, a força que atua no elemento de condutor é diretamente proporcional à intensidade da corrente, à indução magnética, ao comprimento do elemento e ao seno do ângulo que o elemento faz com a indução magnética. Essa é a 2ª lei elementar de Laplace.

A força \vec{F} que atua no condutor inteiro é dada pela soma vetorial de todos esses $\Delta\vec{F}$.

b. Direção

$\Delta\vec{F}$ é perpendicular ao plano determinado por \vec{B} e Δl . No caso da figura 288, o plano determinado por \vec{B} e Δl é o próprio plano do papel; então $\Delta\vec{F}$ é perpendicular ao plano do papel.

c. Sentido

É dado por uma regra prática, chamada regra dos três dedos da mão esquerda: colocando-se o polegar no sentido do campo e o indicador no sentido da corrente, então o médio dará o sentido da força (fig. 289). Esses três dedos devem ser da mão esquerda. Na figura anterior, por exemplo, $\Delta\vec{F}$ é dirigida para trás do papel.

NOTA IMPORTANTE

É muito importante comparar o comportamento de um campo magnético em relação a um ímã com o comportamento em relação a uma corrente elétrica.

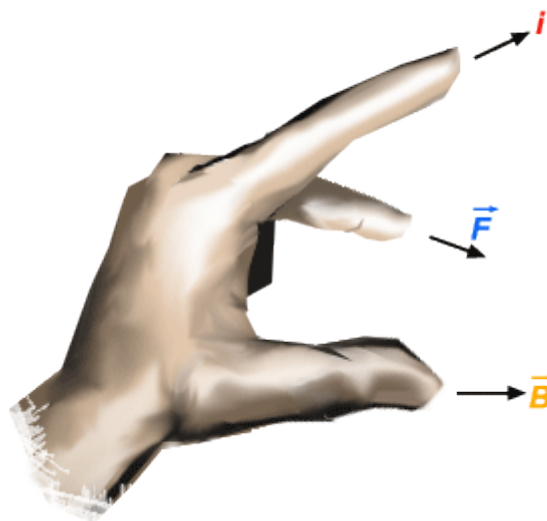


Figura 289

Quando um ímã é colocado num campo magnético, a força que atua na massa magnética é dada por:

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

Quando uma corrente elétrica é colocada em um campo magnético, a força que atua num elemento Δl do condutor vale:

$$|\Delta\vec{F}| = i \cdot |\vec{B}| \cdot \Delta l \cdot \text{sen}\alpha$$

Portanto, a intensidade de campo magnético, \vec{H} , é responsável pela força que atua numa massa magnética (num ímã); a indução magnética, \vec{B} , é responsável pela força que atua numa corrente elétrica (num condutor).

Observação relativa às duas leis elementares de Laplace

Poderá ocorrer ao leitor a seguinte dúvida: como se deduzem as duas leis elementares de Laplace?

Essas duas leis não têm demonstração. Elas são na verdade dois postulados; isto é, nós admitimos, como ponto de partida para o estudo dos dois primeiros fenômenos eletromagnéticos, que as duas equações de Laplace sejam verdadeiras, sem demonstrá-las diretamente. E sabemos que elas realmente são verdadeiras porque as aplicações dessas duas leis elementares sempre nos levam a resultados que são confirmados pela experiência.

3: Exemplo - Condutor retilíneo colocado em campo magnético uniforme

Seja ℓ o comprimento do condutor retilíneo AC, \vec{B} a indução magnética do campo uniforme; α o ângulo formado entre \vec{B} e AC. Um elemento qualquer do condutor, de comprimento Δl , fica sujeito a uma força $\Delta\vec{F}$, cuja direção é perpendicular ao plano formado por \vec{B} e Δl , sentido dado pela regra dos três dedos da mão esquerda, e módulo dado por:

$$|\Delta\vec{F}| = i \cdot |\vec{B}| \cdot \Delta l \cdot \text{sen}\alpha$$

O condutor sendo retilíneo, todos os $\Delta\vec{F}$ têm a mesma direção e o mesmo sentido (fig. 290). A força total \vec{F} tem, então, a mesma direção e o mesmo sentido que os $\Delta\vec{F}$, e tem por módulo a soma dos módulos:

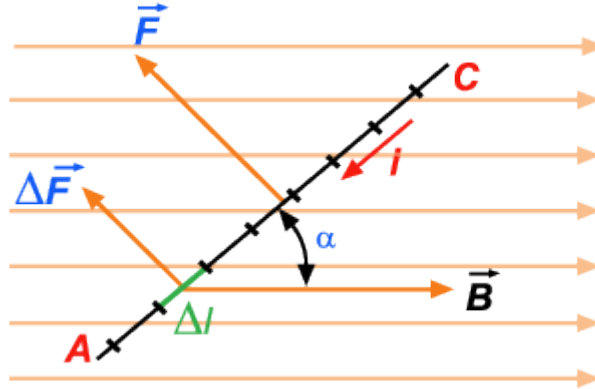


Figura 290

$$|\vec{F}| = \sum |\Delta\vec{F}|$$

$$|\Delta\vec{F}| = \sum i \cdot |\vec{B}| \cdot \Delta l \cdot \text{sen}\alpha$$

$$|\vec{F}| = i \cdot |\vec{B}| \cdot \text{sen}\alpha \sum \Delta l$$

Mas, $\sum \Delta l = l$

Então

$$|\vec{F}| = i \cdot |\vec{B}| \cdot l \cdot \text{sen}\alpha$$

Caso particular

1º - O condutor é perpendicular ao campo

Neste caso, $\alpha = 90^\circ$.

Então $\alpha = 90^\circ = \text{sen}90^\circ = 1$.

Resulta:

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

Como o valor +1 é o máximo valor do seno, esta é a posição em que um condutor fica sujeito à força máxima (fig. 291).

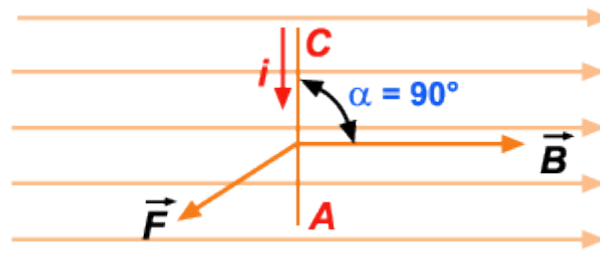


Figura 291

2º - O condutor é paralelo ao campo

Neste caso, $\alpha = 0^\circ$ ou 180° . Mas, $\text{sen}0^\circ = \text{sen}180^\circ = 0$

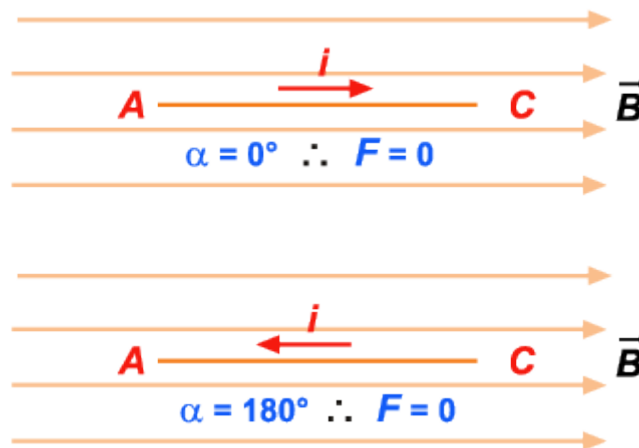


Figura 292

Resulta:

$$F = 0$$

Então, no caso particular em que o condutor é paralelo ao campo, nenhuma força atua nele.

4: Ação mútua entre correntes e ímãs

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

Para demonstrar a ação mútua de correntes e ímãs podemos realizar a experiência da figura abaixo. Um solenoide, ligado em série com um gerador e

um interruptor, é suspenso pelo centro de gravidade, para que possa oscilar e transladar-se um pouco. Um ímã, também é suspenso pelo centro de gravidade próximo do solenoide. Mantendo-se o solenoide fixo, e fechando-se o interruptor, forma-se o campo magnético do solenoide, e observa-se nitidamente um deslocamento do ímã. Mantendo-se o ímã fixo, e fechando-se o interruptor, nota-se nitidamente um deslocamento do solenoide. E, deixando-se os dois livres, ao fechar-se o interruptor se observa nitidamente deslocamentos dos dois. Podemos também observar que polos de mesmo nome do solenoide e do ímã se repelem, e os de nomes contrários se atraem, analogamente aos polos de dois ímãs.

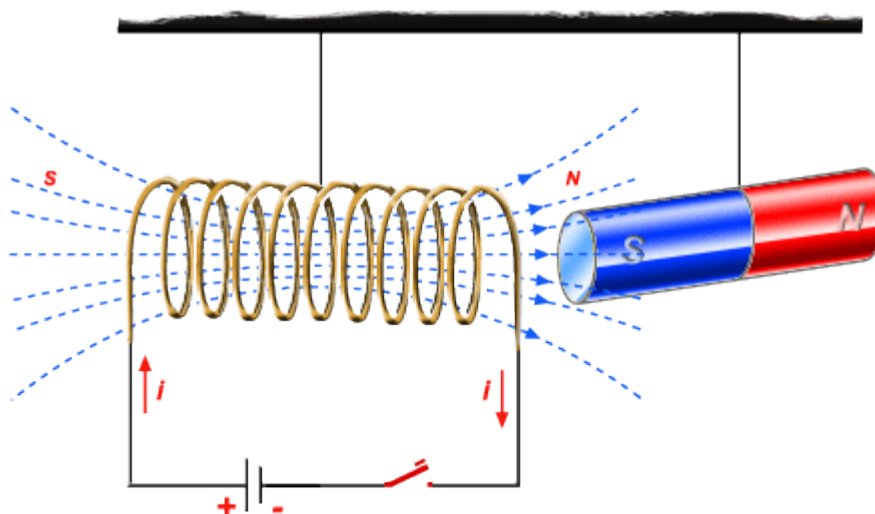


Figura 293

5: Ação mútua entre correntes

Duas correntes elétricas próximas exercem forças entre si. Isto porque, cada uma delas produz um campo magnético (1º fenômeno eletromagnético); e a outra, estando colocada nesse campo magnético, fica sujeita a forças (2º fenômeno eletromagnético).

Podemos demonstrar a ação mútua entre correntes com a experiência da figura abaixo. Dois solenoides são suspensos pelos centros de gravidade, cada um deles ligado a um gerador e a um interruptor. Quando fechamos os interruptores cada uma das correntes produz um campo magnético como o que está indicado na figura a. A corrente i_2 , estando no campo magnético da corrente i_1 , fica sujeita a uma força; a corrente i_1 , estando no campo magnético da corrente i_2 , fica sujeita a uma força. Observamos então o seguinte:

mantendo o solenoide (1) fixo, no instante em que fechamos os interruptores, o solenoide (2) se desloca; mantendo o solenoide (2) fixo, no instante em que fechamos os interruptores, o solenoide (1) se desloca; deixando os dois livres, ambos se deslocam.

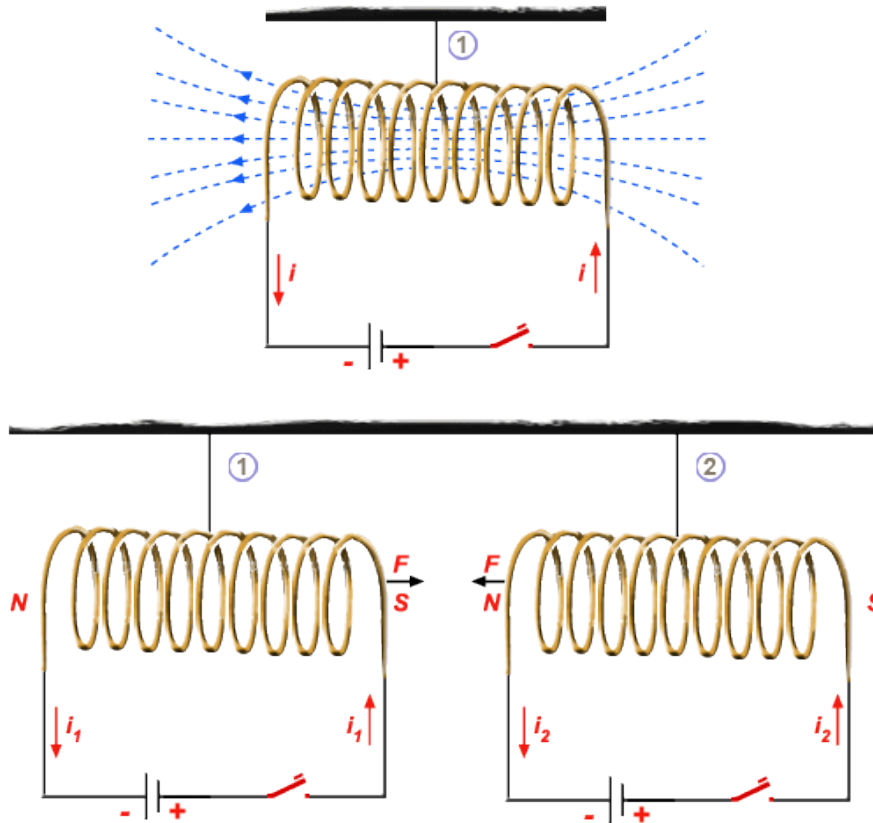


Figura 294

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

6: Forças entre dois condutores retilíneos paralelos

Calculemos as forças que, reciprocamente, se exercem dois condutores retilíneos, paralelos, afastados pela distância a (fig. 295). Seja l o comprimento dos condutores, i_1 a corrente do condutor (1), i_2 a do condutor (2). Calculemos a força que o condutor (1) exerce sobre o condutor (2).

O condutor (1) produz, em todos os pontos do condutor (2) um campo cuja indução magnética tem:

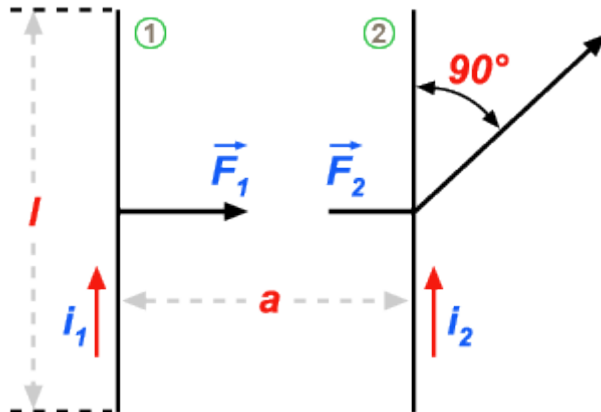


Figura 295

módulo: dado pela lei de Biot e Savart

$$B_1 = \mu \cdot \frac{2i_1}{a}$$

direção: perpendicular ao plano dos dois condutores.

sentido: para trás da figura (verifique pela regra do boneco, de Ampère).

Em todos os pontos do condutor (2) existe uma indução igual a essa B_1 . Então tudo se passa como se o condutor (2) estivesse em um campo magnético uniforme de indução magnética B_1 e perpendicular ao condutor. A força F_2 que atua nesse condutor tem então:

direção: perpendicular ao plano determinado por B_1 e o condutor, portanto, está no plano da figura.

sentido: do condutor (2) para o condutor (1) (verificar pela regra dos três dedos da mão esquerda).

módulo: $F_2 = i_2 \cdot B_1 \cdot l$ (tópico "Cálculo da Força - 2ª. lei elementar de Laplace", 1º caso particular).

Substituindo B_1 pelo seu valor, resulta:

$$F_2 = \mu \frac{2i_1 i_2 l}{a}$$

Essa é a importantíssima fórmula tomada como base para a definição do

AMPÈRE, à qual já nos referimos nos tópicos "A Formação do Sistema MKS em Eletricidade" e "Sistemas de Unidades em Magnetismo e Eletromagnetismo".

Deixamos a cargo do leitor demonstrar o seguinte:

- 1º) que a força F_1 que o condutor (2) exerce sobre o condutor (1) tem esse mesmo valor, e é dirigida para o condutor (2);
- 2º) vemos que, no caso da figura acima, em que as duas correntes têm o mesmo sentido, os dois condutores se atraem; demonstre que quando as duas correntes têm sentidos opostos os condutores se repelem.

7: Aplicações do 2º fenômeno eletromagnético

O 2º fenômeno eletromagnético tem inúmeras aplicações. Todas elas consistem em se usar uma combinação de um campo magnético e uma corrente elétrica para se obter uma força num condutor. Essa força poderá deslocar o condutor; assim obtemos energia mecânica (no movimento) partindo inicialmente de um campo magnético e uma corrente elétrica.

1ª - Roda de Barlow

É um dispositivo que serve para mostrar como se pode obter movimento de um corpo utilizando-se um campo magnético e uma corrente elétrica. É uma roda metálica dentada, suspensa por um eixo horizontal O, cujos dentes submergem no mercúrio contido numa cuba C (fig. 296). A roda fica colocada entre os polos de um ímã, de maneira tal que o campo magnético seja perpendicular à roda. A corrente i , fornecida por um gerador, percorre a roda segundo um raio do círculo, e passa através do mercúrio da cuba C, pois os dentes que estão em contato com mercúrio fecham o circuito. Vê-se, pela regra dos três dedos da mão esquerda, que a roda fica sujeita a uma força \vec{F} que atua no plano da roda. Essa força produz na roda um movimento de rotação. Logo que um dente sai do mercúrio, outro dente entra, o circuito elétrico se fecha novamente, e tudo se repete. Assim, com a utilização do ímã e da corrente elétrica a roda gira. A figura 297 é a fotografia de uma roda de Barlow; veem-se os fios por onde a corrente chega do gerador, e o ímã, colocado em posição horizontal.

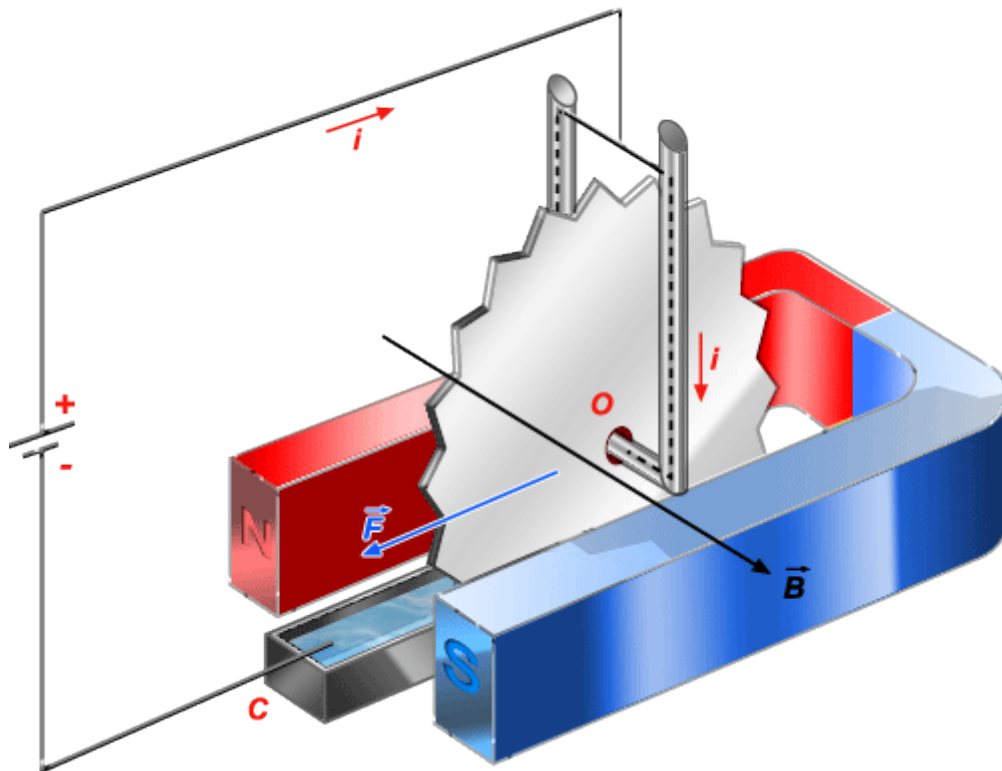


Figura 296

A roda de Barlow é um exemplo de **motor elétrico**, isto é, um dispositivo que utiliza corrente elétrica e campo magnético para obter movimento de algum corpo.

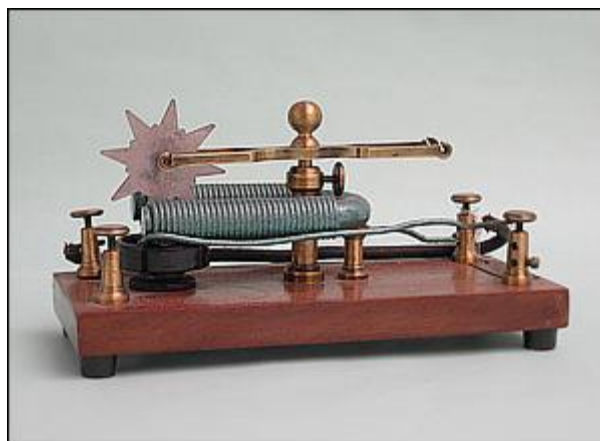


Figura 297

2ª - Quadro plano em campo magnético uniforme

Suponhamos um condutor com a forma retangular ABCD, aberto no lado AB para que possa receber a corrente i , como indica a figura 298. Imaginemos o quadro ABCD colocado em um campo magnético uniforme de indução magnética \vec{B} de tal modo que AD e BC fiquem perpendiculares ao campo. Aplicando a regra dos três dedos da mão esquerda vemos que, quando passa corrente, nos ramos AE e JB atuam as forças f_1 , no lado CD atua a força f . Tanto f como f_1 atuam no plano do quadro e não produzem movimento do quadro: simplesmente tendem a deformar os condutores AE, JB e CD. O lado AD fica sujeito à força \vec{F} e BC à força $-\vec{F}$. Essas duas forças são paralelas, têm sentidos opostos e mesma intensidade ($F = i.l.B$, tópico "Campo Magnético em um Ponto Infinitamente Próximo de um Polo Plano"). Então elas formam um binário, que dá ao quadro um movimento de rotação ao redor da reta mn.

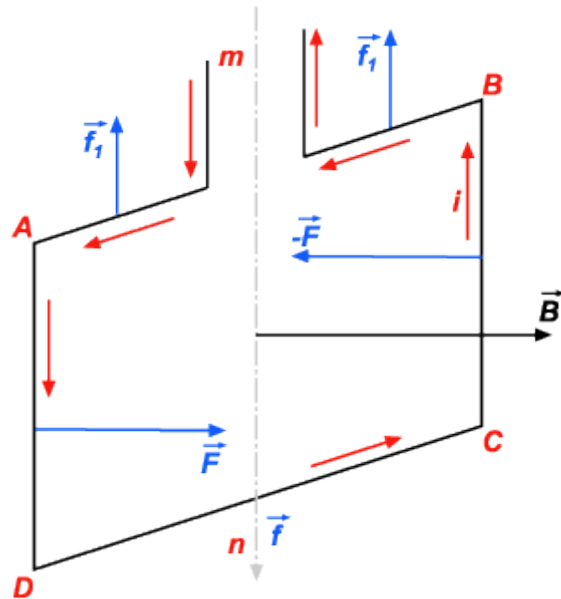


Figura 298

Esse é mais um exemplo de como se pode obter movimento de um corpo utilizando-se um campo magnético e uma corrente elétrica.

3ª - Motor elétrico

Chama-se **motor elétrico** a qualquer dispositivo que recebe energia elétrica e fornece energia mecânica. A roda de Barlow é um primeiro exemplo de motor elétrico. Mas, os motores comuns se baseiam no comportamento do quadro plano colocado no campo magnético uniforme.

Suponhamos que o quadro ABCD seja disposto ao redor de um cilindro, como indica a figura 299. O binário formado pelas forças \vec{F} e \vec{F} e $-\vec{F}$ faz com que o cilindro entre em rotação. Na prática, em vez de um único quadro, enrolamos no cilindro muitos quadros, e os seus binários são somados.

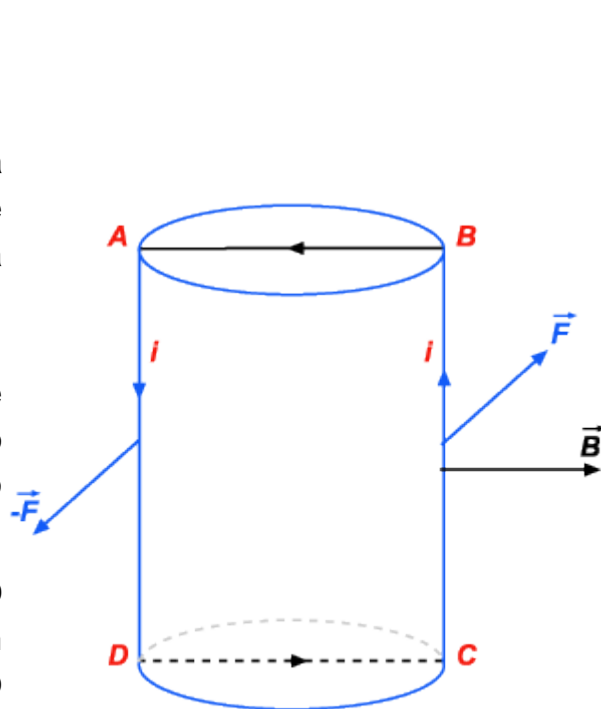


Figura 299

A figura 300 é um esquema de um motor elétrico, mostrando as partes fundamentais de um motor:

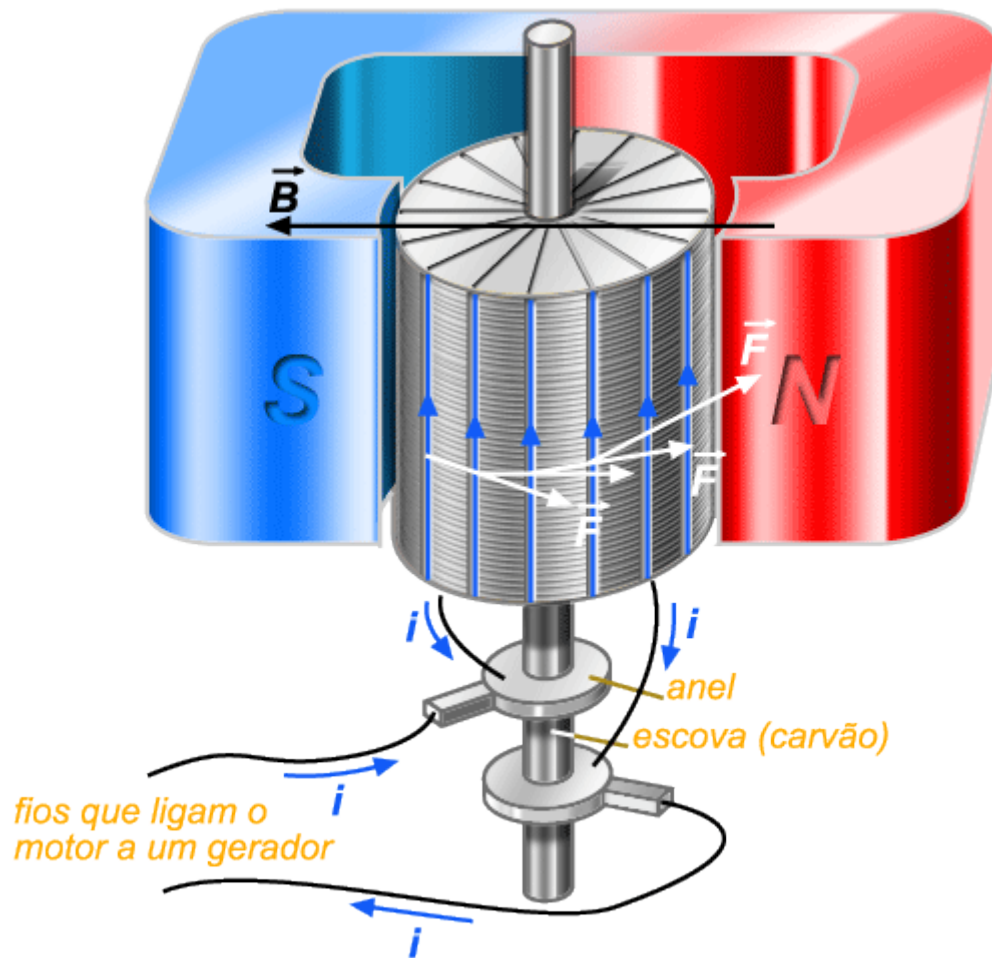


Figura 300

- a) um ímã, que produz um campo de indução magnética \vec{B} (em vez de ímã poderia ser uma bobina);
 b) um cilindro, no qual estão enrolados os condutores;
 c) um conjunto de condutores, enrolados ao redor desse cilindro de maneira a formar quadros planos como os que estão indicados na figura 299.

Os quadros planos estão ligados em série. A corrente i que passa por eles é fornecida ao motor por algum gerador. Para que a corrente chegue até os condutores, no eixo do cilindro são fixados dois anéis metálicos, que giram solidários com o cilindro. Esses anéis ficam encostados a dois pedaços de carvão, chamados escovas, que são ligados aos fios que vão ter ao gerador. Os condutores do cilindro têm suas extremidades ligadas aos anéis. A corrente chega por um dos fios ligados ao gerador, passa para a escova, depois ao anel, deste aos condutores do cilindro, depois de percorrer os condutores vai ao outro anel, escova correspondente e sai para o outro fio que vai ter ao gerador.

O conjunto do cilindro com os condutores enrolados nele é chamado ROTOR, porque é a parte que gira. O ímã (ou bobina) que produz o campo é chamado ESTATOR, porque fica fixo.

Ao eixo do rotor ligamos as peças que desejamos por em movimento, como por exemplo, as rodas de um bonde, as escovas de uma enceradeira, as pás de um ventilador, etc.. Na maior parte dos casos, o rotor é horizontal; equivale a girar a figura 300 de 90°.

4ª - Galvanômetro de quadro móvel

Uma outra aplicação do quadro plano colocado em campo magnético uniforme está na construção de instrumentos de medida. Um desses instrumentos é o galvanômetro de quadro móvel.

Esse galvanômetro consiste de:

- um ímã permanente, que produz um campo magnético entre seus polos;
- uma bobina, em forma de quadro plano, colocada nesse campo entre os polos do ímã (fig. 301).

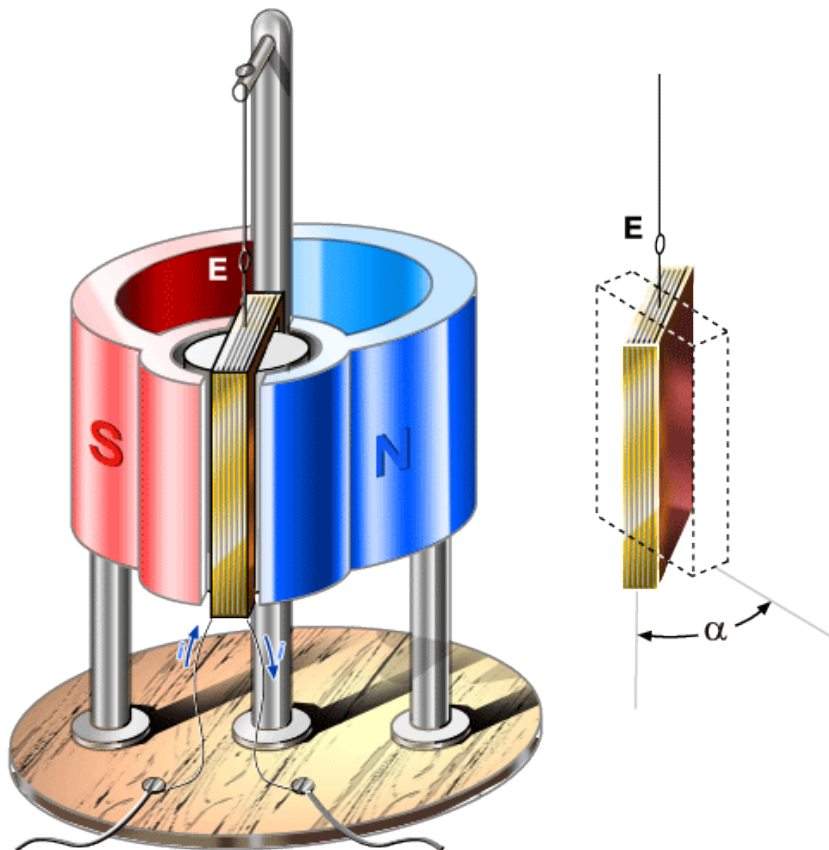


Figura301

O quadro é percorrido pela corrente i que se quer medir. Quando a corrente passa, as forças \vec{F} e \vec{F} fazem o quadro girar de certo ângulo α , como está indicado na figura b. Pode-se demonstrar que o ângulo α é diretamente proporcional à corrente i , isto é, que:

$$i = K \cdot \alpha \quad \boxed{i = K \cdot \alpha}$$

onde K é uma constante. K tem um valor conhecido para cada instrumento. Conhecendo-se α e K , determina-se i . Para se medir o ângulo α , o galvanômetro tem um espelho E preso ao suporte da bobina. Quando esta gira, o espelho também gira, e o ângulo de rotação é medido pelo método de Poggendorff. A figura 302 é a fotografia de um desses galvanômetros.

fotografia de um desses galvanômetros

Resumo

1 – 2ª lei elementar de Laplace: $\Delta F = iBl \sin \alpha$.

2 – Sentido de ΔF : dado pela regra dos três dedos da mão esquerda.

3 – Força que atua em condutor retilíneo colocado em campo magnético uniforme: $F = iBl \sin \alpha$

4 – Unidades a serem usadas nessa fórmula:

GGSEM: i ... abampère B ... gauss l ... centímetro F ... dine

MKS: i ... ampère B ... $\frac{\text{weber}}{\text{m}^2}$... l ... metro F ... newton

8: Nota Histórica

O ano de 1822, ano da independência do Brasil, está assinalado na história da Física por dois acontecimentos empolgantes: um de ordem prática, devido a Faraday, outro de ordem teórica, devido a Ampère.

No dia de natal daquele ano, Faraday colocou um condutor entre os polos de um ímã, fez passar corrente elétrica pelo condutor, e este executou movimento de rotação. Foi a primeira vez que o homem obteve movimento de rotação a partir de um campo magnético e uma corrente elétrica: estava inventado o motor elétrico. Como acontece em geral com as descobertas científicas, ninguém pôde julgar, naquela época, a importância do fato. Decorridas

algumas dezenas de anos foi possível a produção industrial de motores, cujos serviços para o bem estar humano não é preciso ressaltar.

No campo teórico do eletromagnetismo, Ampère lançou uma ideia revolucionária. Até então admitiam a existência de “fluidos magnéticos”, que seriam responsáveis pelo magnetismo. Ampère abandonou essa hipótese, e admitiu que nas moléculas dos corpos existissem correntes elétricas que produziram pequenos campos magnéticos. Quando esses campos magnéticos se neutralizassem, o corpo seria neutro. Quando não se neutralizassem, o corpo seria imantado. Se considerarmos que naqueles tempos, o próprio conceito de molécula era mal definido, podemos julgar quanto arrojada era essa hipótese. Efetivamente, a ideia de Ampère não foi muito aceita. Ela foi retomada somente quase um século depois. Hoje sabemos que ela encerra um fundo de verdade. Que o magnetismo é consequência, não de correntes elétricas moleculares, mas, de correntes elétricas atômicas.