

Instituto de Física “Gleb Wataghin” – UNICAMP  
F 609B - Tópicos de Ensino de Física I  
Relatório Final

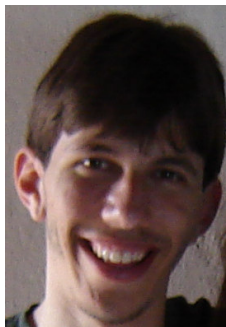
*Motor de Faraday*

Coordenador: Professor Dr. José Joaquín Lunazzi ([lunazzi@ifi.unicamp.br](mailto:lunazzi@ifi.unicamp.br))



Aluno: Raphael Santarelli – RA: 024960 ([tel.santa@gmail.com](mailto:tel.santa@gmail.com))

Orientador: Professor Dr. Alberto Vazquez Saa ([asaa@ime.unicamp.br](mailto:asaa@ime.unicamp.br))



Junho / 2007

## 1 – Resumo

O presente trabalho foi resultado de um projeto da disciplina F609 – Tópicos de Ensino de Física I, e foi orientado pelo Prof. Dr. Alberto Vazquez Saa. Esse projeto tem como objetivo a construção do motor de Faraday, em duas versões. A primeira versão é uma reprodução fiel ao modelo construído por Faraday, e a segunda é uma versão mais compacta e moderna. A utilidade principal desse motor é mostrar a relação que existe entre corrente elétrica e campo magnético. Nesse relatório será mostrado o contexto histórico no qual Faraday construiu seu motor, assim como a teoria por trás de seu funcionamento. Em seguida descreveremos todos os procedimentos realizados em ambas as montagens, com os resultados obtidos e as dificuldades encontradas.

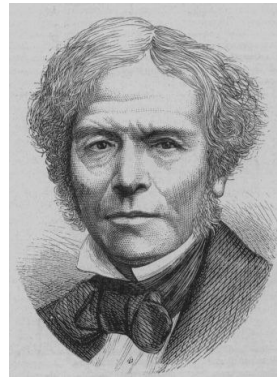
## 2 - Introdução

Hoje em dia sabemos que os efeitos elétricos e os magnéticos estão relacionados pelas equações de Maxwell, mas nem sempre foi assim. Antes do século XIX não se sabia da relação entre esses fenômenos, e todos achavam que eram independentes.

Foi então que em 1820 o físico *Hans Christian Ørsted* (1777 - 1851) publica um trabalho defendendo a idéia de que uma corrente elétrica passando por um fio condutor produz um efeito magnético circular ao redor desse fio. Ele chegou a essa conclusão analisando o comportamento de uma bússola colocada ao redor de um fio condutor, e viu que quando se passava corrente pelo fio a agulha da bússola girava, mudando de posição. Em seu trabalho ele comenta que a agulha tendia a girar para um lado quando posta em cima do fio, mas tendia a girar para o outro lado quando posta embaixo do fio. Tal idéia não foi aceita de imediato, pois o problema não apresentava simetria, ou seja, a agulha da bússola acima do fio giraria num sentido, e abaixo do fio giraria no sentido contrário.



Hans Christian Ørsted



Michael Faraday

Como visto, seu trabalho encontrou forte resistência no meio científico, principalmente devido ao fato de que ele defendia um efeito magnético circular ao redor do fio, e não na direção do fio, o que manteria a simetria do problema. Esse impasse durou até que *Michael Faraday* (1791 - 1867) estudou o problema e se convenceu da idéia de Ørsted, ou seja, de que o efeito era realmente circular. Para defender essa idéia, ele criou um aparelho, em 1821, que mostrava justamente esse efeito circular. Tal aparelho ficou conhecido como o motor de Faraday, e foi o primeiro motor elétrico construído, já que seu objetivo era mostrar o efeito magnético circular ao redor de um fio condutor, ou,

como ele mesmo dizia, a rotação eletromagnética. O esquema desse motor é mostrado abaixo:

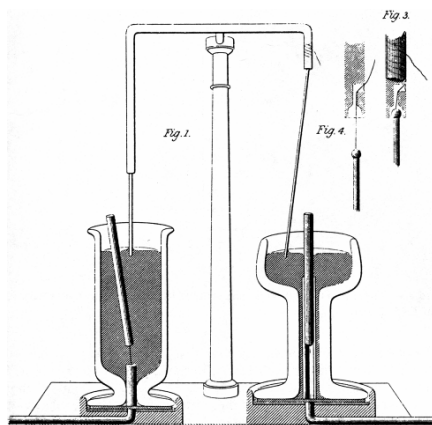


Figura 1 – Esquema do motor construído por Faraday

É interessante notar que mesmo depois da construção desse motor, muitos físicos ainda não concordavam com a teoria de Ørsted, e tentaram explicar a deflexão da agulha da bússola de uma maneira alternativa. Um deles é *André-Marie Ampère (1775 – 1836)*, que apresentou uma explicação para o fenômeno baseado apenas em forças entre correntes elétricas.



André-Marie Ampère

### 3 - Objetivos

Esse projeto tem como objetivo principal mostrar para alunos do ensino médio, de uma maneira simples e elucidativa, que os fenômenos elétricos e magnéticos estão relacionados, e que o efeito magnético ao redor de um fio condutor é circular.

### 4 – Descrição das duas montagens

Vamos nessa seção apresentar como serão feitas as duas montagens experimentais, lembrando que a montagem 1 se refere à reprodução histórica, enquanto que a montagem 2 é uma versão mais moderna e compacta, porém com os mesmos fundamentos teóricos, ou seja, ambas as montagens funcionam pelo mesmo motivo: o efeito magnético circular ao redor de um fio condutor.

### Montagem 1

Essa montagem consiste em uma bacia contendo um líquido condutor e um ímã no meio, mas de tal forma que apenas um dos pólos do ímã fique próximo da superfície do líquido condutor, com o outro pólo mais abaixo. Um fio condutor é preso a uma base metálica situada acima da bacia, e a outra extremidade desse fio é deixada solta, tocando a superfície do líquido condutor. Por fim, passa-se uma corrente elétrica contínua pelo sistema. Tal corrente passará pelo líquido e subirá pelo fio, e a presença de um ímã no centro da bacia fará com que a extremidade solta do fio gire em torno do ímã, demonstrando assim que o efeito magnético realmente tem um caráter circular. Para entender melhor a montagem considere a figura a seguir<sup>[3]</sup>:

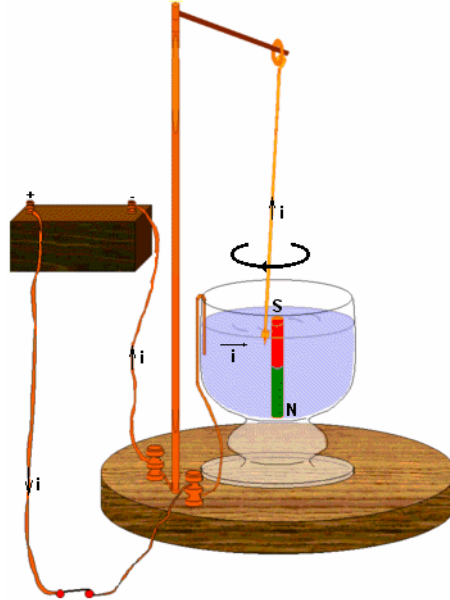


Figura 2 – Esquema do motor de Faraday na montagem 1.

Note na figura acima como a extremidade solta do fio fica próxima somente a um dos pólos do ímã. Esse é um detalhe muito importante, pois cada pólo tende a fazer o fio girar um sentido. Lembre-se que a figura acima é apenas um esquema, nosso motor não precisa ficar exatamente igual ao mostrado acima. Como pode ser visto na figura 2, vamos precisar dos seguintes materiais para essa montagem:

- líquido condutor
- ímã,
- bacia para colocar o líquido condutor e o ímã,
- fio condutor,
- suporte metálico para o fio condutor,
- fonte de tensão,
- demais fiações para fechar o circuito,

### Montagem 2

A montagem 2 é mais simples e prática que a 1. Para realizarmos essa montagem precisaremos de uma pilha comum, um parafuso, um pequeno ímã de neodímio, além de um fio condutor para fechar o circuito. O objetivo é ligar o ímã à pilha através do parafuso, e fechar o circuito entre a pilha e o ímã com um fio condutor. Um esquema dessa montagem pode ser visto abaixo:



Figura 3 – Esquema do motor na montagem 2

Note que na figura acima o ímã está abaixo do parafuso, que por sua vez está conectado a um dos pólos da pilha. O fio condutor deve ligar o outro pólo da pilha ao ímã.

## 5 – Teoria

Vamos agora apresentar a explicação teórica aceita hoje em dia para a rotação observada em ambas as montagens. Esse motor de Faraday é também chamado de motor homopolar, pois não ocorre nenhuma mudança de polaridade de seus componentes durante seu funcionamento. Após o circuito estar fechado, aparece uma corrente elétrica, que nada mais é do que elétrons em movimento orientado.

Na montagem 1 a corrente flui do líquido condutor para o fio que está pendurado, e essa corrente elétrica será afetada pelo campo magnético do ímã permanente, e fará com que apareça uma força tangencial no fio, o que faz com que ele comece a girar. Note que essa força que aparece no fio é sempre tangencial, o que implica que o fio continuará girando enquanto houver corrente no circuito.

Sabemos que uma partícula com carga elétrica  $q$  que atravessa um campo magnético  $\mathbf{B}$  sofre uma força cujo módulo é dado por:

$$F = q.v.B.\text{sen}(\theta) \quad (1)$$

Onde  $B$  é o módulo do campo magnético,  $v$  é a velocidade da partícula, e  $\theta$  é o ângulo entre o vetor  $\mathbf{B}$  e o vetor  $\mathbf{v}$ . Para acharmos a direção e o sentido dessa força, devemos utilizar a regra da mão direita<sup>[8]</sup>: primeiro escreva ambos os vetores na mesma origem. Depois coloque o dedo indicador no sentido da corrente elétrica (velocidade) e o dedo médio no sentido do campo magnético. A direção da força é agora a direção que aponta seu dedão.

Podemos estender esse conceito para um fluxo contínuo de cargas elétricas, ou seja, para correntes elétricas. Nesse caso a força que uma corrente elétrica  $I$  sofre devido à presença de um campo magnético  $\mathbf{B}$  é dada por:

$$\vec{F} = \int I(d\vec{l} \times \vec{B}) \quad (2)$$

Onde  $d\vec{l}$  aponta na mesma direção da corrente  $I$ . Se a corrente elétrica  $I$  e o campo magnético  $\mathbf{B}$  forem constantes, então a fórmula acima se reduz à:  $F = B.I.L.\text{sen}(\varphi)$ , onde  $L$  é o comprimento do fio que carrega a corrente elétrica e  $\varphi$  é o ângulo entre  $\mathbf{B}$  e  $I$ , sendo que a direção da força é perpendicular tanto à corrente  $I$  quanto ao campo  $\mathbf{B}$ . Para vermos como essa equação se aplica no nosso caso, considere a figura abaixo, que mostra o esquema da montagem 1:

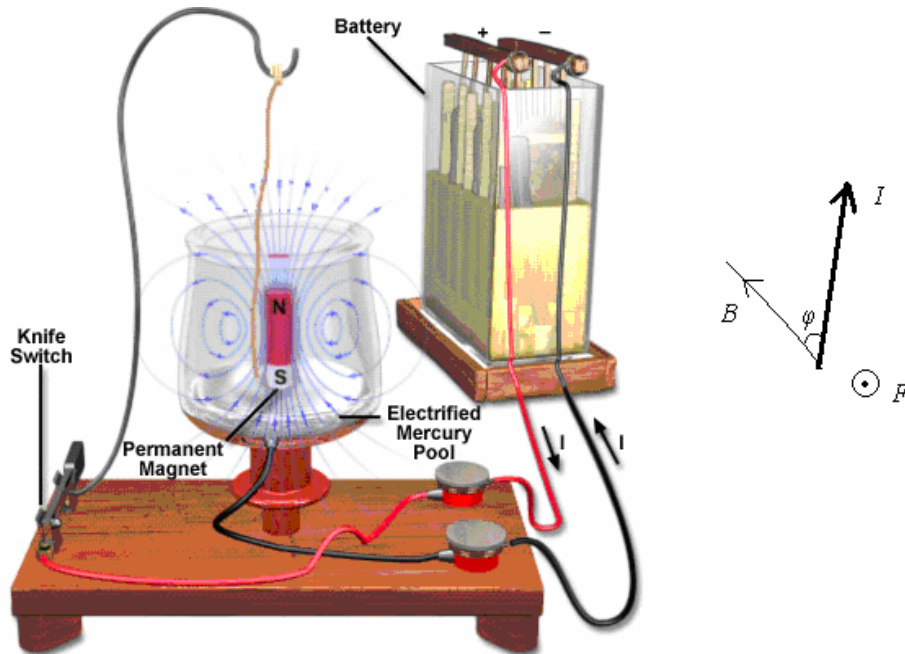


Figura 4 – Esquema da montagem 1. Em azul podemos ver as linhas de campo magnético do ímã permanente. Ao lado podemos ver a direção e sentido da corrente  $I$  e do campo  $B$  para uma posição particular do fio condutor (quando ele está do lado esquerdo do ímã, conforme figura da esquerda). Note que nesse caso a força  $F$  aponta na direção que sai da folha.

Veja que o campo magnético gerado pelo ímã é simétrico na região acima do ímã, e aponta para “fora”. Pela equação 2 nós vimos que a direção da força é perpendicular à corrente  $I$  e ao campo  $B$ , conforme figura 4 (esquema a direita). Logo, a interação entre o campo magnético do ímã e a corrente elétrica do fio faz com que apareça essa força sempre na direção perpendicular a ambos, fazendo com que o fio gire ao redor do ímã (Isso só ocorre pois a maior parte do fio está na região do pólo norte do ímã, já que o pólo sul tende a fazê-lo girar na direção contrária).

Para entendermos melhor o campo magnético de um ímã cilíndrico, considere a figura a seguir:

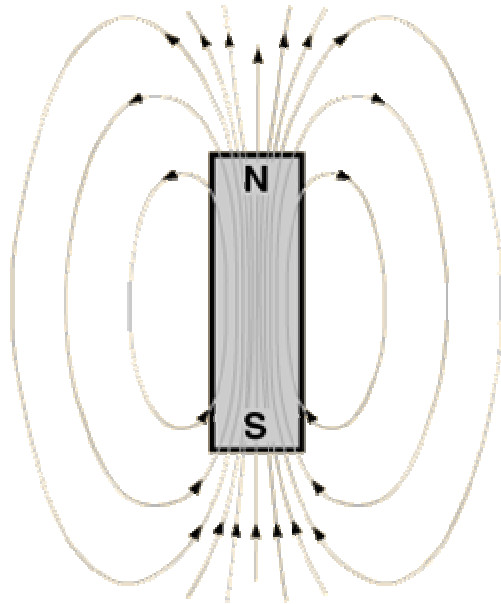


Figura 5 – Linhas de campo em um ímã cilíndrico.

Da figura acima vemos que as linhas de campo vão do pólo norte do ímã para o pólo sul, e formam sempre linhas fechadas. A tangente a essas linhas em cada ponto indica a direção do vetor campo magnético. Como o ímã é cilíndrico, esse mesmo esquema de linhas de campo estará presente se o girarmos em torno de seu eixo de simetria (eixo vertical da figura). Note que na região acima do pólo norte as linhas de campo são simétricas, e se abrem, enquanto que as linhas que chegam ao pólo sul estão se fechando (convergindo). Por isso é crucial que o fio condutor esteja na região de cima do ímã, pois, pela equação 2, vimos que o pólo norte do ímã fará o fio girar em um sentido, enquanto que o pólo sul fará o fio girar em sentido contrário.

Por fim, note que fizemos nossa análise considerando a força entre um fio com corrente elétrica e um campo magnético externo. Essa abordagem é equivalente a dizermos que o fio condutor gera um campo magnético circular ao seu redor, e esse campo magnético do fio interage com o campo magnético do ímã, produzindo rotação e verificando assim a teoria de Ørsted.

Para a segunda montagem, a explicação é a mesma, porém temos algumas diferenças. Na montagem 2 o ímã não está fixo como na montagem 1, e portanto girará junto com o parafuso. Considere o esquema a seguir:

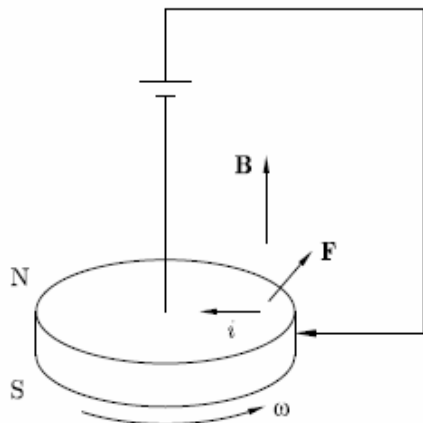


Figura 6 – Esquema mostrando as direções da corrente elétrica (velocidade) e do campo magnético, além da direção da força resultante.

Vimos que a força será perpendicular à corrente e ao campo magnético. Nesse caso o campo magnético é vertical (perpendicular à superfície superior do ímã) – isso pode ser visto da figura 5, pois esse também é um ímã cilíndrico, só que agora a altura do ímã é menor que seu diâmetro, o que faz com que o campo magnético na região imediatamente acima do pólo norte seja praticamente vertical – e a corrente elétrica é horizontal (direção radial do ímã). Logo, a direção na qual aponta a força é tangencial (entrando na folha), fazendo com que o ímã, juntamente com o parafuso, comece a girar. Apesar do ímã girar nessa segunda montagem e não girar na primeira, a explicação para ambas é a mesma: corrente elétrica gera um campo magnético circular ao seu redor, o que faz com que interfira com um campo magnético externo, surgindo uma força tangencial nos portadores de carga.

## 6 – Procedimentos experimentais

Nessa seção iremos descrever os procedimentos tomados na realização das duas montagens, assim como os resultados obtidos.

### Montagem 1

Tendo a lista dos materiais necessários descrita no projeto, iniciei meu trabalho nessa disciplina indo atrás desses materiais. Percorri várias oficinas do IFGW, e consegui a base de madeira, os suportes metálicos e também os fios condutores de cobre. Em uma das oficinas recebi ajuda para fixar o suporte de cobre na base de madeira. O resultado final está mostrado na figura abaixo:





Figura 7 – Base de madeira e suporte metálico (de cobre). O gancho acima é para o encaixe do fio que deverá girar ao redor do ímã

Quanto ao restante dos materiais, os procedimentos foram os seguintes: como bacia eu usei uma que achei em casa; como fonte de tensão usei uma pilha nova de 9V; e como líquido condutor usei inicialmente uma solução de água com sal (seguindo sugestões encontradas na internet). O problema maior nessa etapa foi a obtenção do ímã.

Percorri várias oficinas e laboratórios do IFGW, e nas primeiras semanas não consegui obter o ímã. Comecei então a pesquisar na internet lugares aqui de Campinas que vendiam ímãs, porém o preço dos ímãs se mostrou muito caro (em torno de R\$150,00), e nem eu nem meu orientador podemos pagar. Fui então conversar com o professor Dr. Richard Landers. Ele me emprestou dois ímãs iguais, porém os ímãs não possuíam as dimensões corretas (não possuíam simetria cilíndrica, pois eram duas placas retangulares de 15x5x2cm), o que fez com que não fossem úteis para o motor que estou construindo. Uma figura de um dos ímãs é mostrada abaixo:



Figura 8 – foto do ímã emprestado pelo professor Landers. Note como ele é bem maior que a pilha usada como fonte de tensão.

Como não tinha escolha, decidi aceitar os ímãs para poder pelo menos começar meu trabalho. Consegui esses ímãs apenas no início dessa semana, e logo comecei a montar o motor. A versão montada pode ser vista na figura a seguir:



Figura 9 – Versão já montada do motor de Faraday.

Note que nessa foto podemos observar os materiais utilizados. O líquido dentro da bacia é uma solução concentrada de água com sal de cozinha, enquanto que a fonte de tensão é a pilha mostrada na figura anterior.

O fio vermelho liga o pólo negativo da pilha ao suporte de cobre, enquanto que o fio azul liga o pólo positivo da pilha ao líquido condutor (na figura esse fio está desconectado).

O fio maior pendurado na vertical possui a extremidade superior apoiada ao gancho do suporte metálico e a extremidade inferior livre, podendo assim girar ao redor do ímã.

Primeiro tentei ligar o motor usando os dois ímãs juntos, porém não obtive nenhuma rotação do fio. Isso pode ter ocorrido devido ao fato de que na junção dos ímãs o campo magnético não é uniforme – os próprios ímãs não são cilíndricos, o que pode ter contribuído para o não funcionamento.

Depois tentei com apenas um dos ímãs, conforme figura acima. Realizei a montagem com as três posições possíveis para o ímã: em pé (conforme figura 9), de lado e deitado. Dessa vez obtive um pequeno movimento do fio, e notei que a posição mostrada na figura 4 era a melhor das três.

Consegui apenas um pequeno movimento, e não a rotação contínua desejada. O problema estava no fato do ímã não possuir a simetria que o problema requer, o que faz com que o fio não execute o movimento circular. Além disso, o ímã era muito grande em relação aos demais materiais utilizados na montagem, o que pode atrapalhar também, já que o fio teria que girar num ângulo muito grande.

Tentei então conseguir um ímã cilíndrico e relativamente grande, que seria o ideal para a montagem, porém tais ímãs são muito caros (são de uma liga especial chamada Alnico). Percorri novamente as oficinas do IFGW até que o técnico do laboratório de vácuo e criogenia (Renato) me indicou um local onde poderia comprar ímãs baratos. Porém tais ímãs eram pequenos ímãs cilíndricos de neodímio, que eu estava pensando

em usar na montagem 2. Comprei dois desses ímãs. Falei com meu orientador e ele conseguiu alguns ímãs potentes usados em computadores. Abaixo segue uma foto desses ímãs:

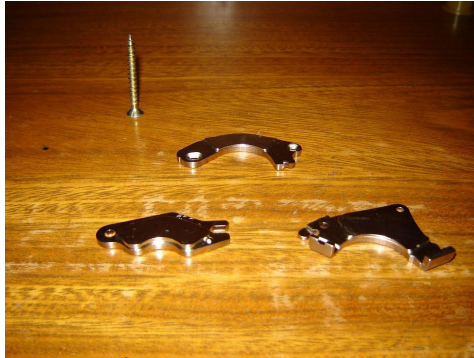


Figura 10 - Ímãs obtidos com meu orientador.

Note que os ímãs acima, apesar de serem potentes, não possuem a simetria requerida, e realmente não funcionaram, como esperado. Então decidi fazer a montagem utilizando o ímã de neodímio, que apesar de ser pequeno, era o único na forma cilíndrica que eu tinha disponível. Testei o motor com esse ímã usando como líquido condutor água com sal e também uma solução de sulfato de cobre. Ambas não apresentaram resultado satisfatório. Substituí nesse ponto a bacia branca que eu estava usando (ver figura 9) por uma outra menor (azul), que permitia colocar uma menor quantidade do líquido condutor. Abaixo segue uma figura mostrando essa nova configuração:



Figura 11 – Esquema do motor de Faraday utilizando o sulfato de cobre. O fio azul mostrado abaixo serve para fechar o circuito entre a bateria e o líquido. O pote transparente abaixo do azul serviu apenas para ajustar a altura, já que o fio de cobre era menor que a altura do suporte. Ao lado direito vemos em detalhe a solução azulada do sulfato de cobre.

Por fim, decidi manter o ímã de neodímio, mas agora usar um condutor melhor, pois precisava obter uma corrente elétrica maior (como já visto na teoria, a força é proporcional a corrente). Falei com o coordenador da disciplina (Dr. José Joaquín Lunazzi), e ele me emprestou um pouco de mercúrio. Coloquei o mercúrio como líquido condutor e o motor funcionou. O esquema dessa versão que funcionou é o mesmo da figura 11 acima, somente com o mercúrio no lugar da solução de sulfato de cobre (note que o líquido está dentro do potinho azul). Uma foto do pote com o mercúrio e o ímã pode ser vista abaixo:



Figura 12 – Esquema mostrando o fio solto de cobre, o mercúrio e o ímã de neodímio ao centro. Note que o ímã está fixado ao fundo do pote com durex.

Enchi o pote de mercúrio até ele atingir a altura do ímã (aproximadamente 8mm). Depois ajustei a altura do fio de cobre para que ele ficasse apenas alguns milímetros dentro do mercúrio, o que me garantiria que ele estaria na região “de cima” do ímã, fazendo com que girasse quando uma corrente elétrica atravessava o sistema.

Gravei um vídeo mostrando o funcionamento dessa montagem do motor, inclusive mostrando que quando se inverte os pólos da bateria, se inverte também o sentido de rotação do fio. O vídeo será enviado ao coordenador por CD.

### Montagem 2

Essa segunda montagem é mais simples que a primeira, porém necessita também de um bom ímã, mas dessa vez um ímã pequeno. Como dito acima, eu consegui comprar dois ímãs de neodímio, que são os mais adequados para essa montagem. Um deles eu acabei utilizando na montagem 1, como já visto. Uma foto dos materiais para a montagem 2 está mostrada abaixo:

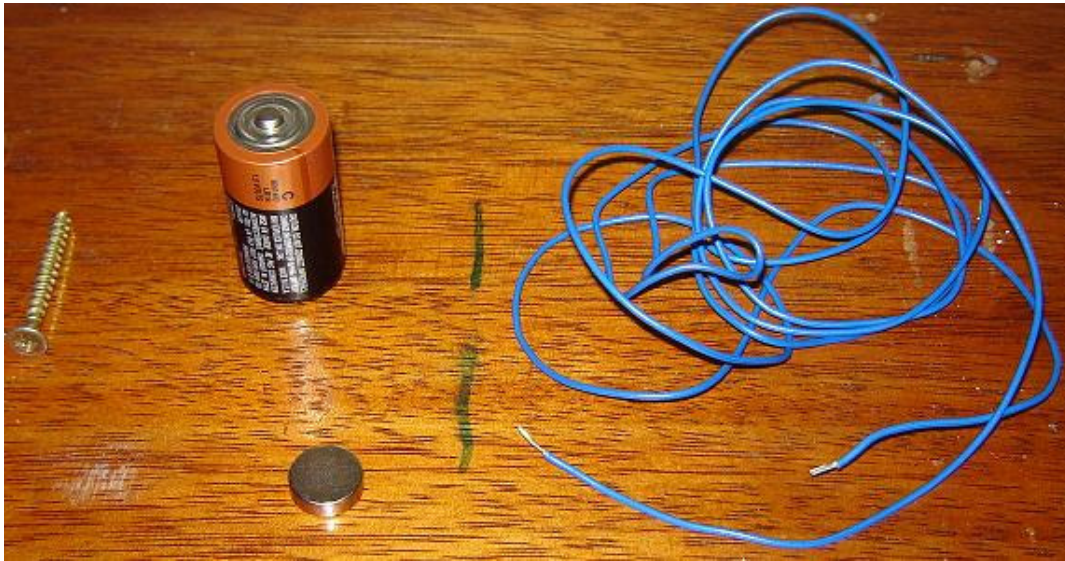


Figura 13 – Na foto acima vemos os materiais utilizados na montagem 2.

Tendo comprado o ímã, os materiais restantes são fáceis de obter. A pilha eu comprei, o fio condutor eu consegui em uma oficina do IFGW, e o parafuso eu tinha em casa. Abaixo segue uma foto dos materiais montados:



Figura 14 – Foto do esquema de funcionamento da montagem 2

Assim que o circuito é fechado o parafuso começa a girar rapidamente. Fiz um vídeo dessa montagem, e nele também podemos ver que invertendo o pólo da pilha no qual o parafuso está conectado, invertemos também o sentido de rotação do conjunto ímã/parafuso.

## 7 - Conclusões

Realizei duas montagens para o motor de Faraday. A primeira foi uma tentativa de reprodução do modelo que o próprio Faraday construiu. Tive muito trabalho nessa montagem, principalmente com relação a obtenção do ímã. No final, por estar usando um ímã muito pequeno, precisei de um bom líquido condutor, que consegui com o coordenador da disciplina. Usando o ímã de neodímio e o mercúrio como líquido

condutor, finalmente consegui fazer o motor funcionar, e assim observar o movimento circular do fio ao redor do ímã.

Já a segunda montagem foi mais simples, tendo como único empecilho também a obtenção do ímã. Após a compra dos dois ímãs de neodímio (dos quais um eu usei na montagem 1 e o outro na montagem 2), os outros elementos não foram problema e consegui fazer essa montagem funcionar também, e assim observar o movimento de rotação do parafuso e do ímã.

Gravei dois vídeos, um de cada montagem. Eles serão entregues em CD para o coordenador da disciplina.

## **8 - Declarações do Orientador e do Coordenador**

### Orientador

Relatório parcial:

Meu orientador, o Professor Dr. Alberto Vazquez Saa, concorda com o expressado neste relatório parcial e deu a seguinte opinião:

“O estudante está cumprindo de maneira plenamente satisfatória as etapas do projeto.”

Relatório final:

Meu orientador, o Professor Dr. Alberto Vazquez Saa, concorda com o expressado neste relatório final e deu a seguinte opinião:

“O relatório descreve bem as atividades do estudante. Considero que seu empenho e seus resultados neste projeto merecem, certamente, a nota 10.0.”

### Coordenador

Relatório parcial:

O coordenador da disciplina, o Professor Dr. José Joaquín Lunazzi, deu o seguinte parecer sobre meu relatório parcial:

“RP nota 10. Trabalhe a questão de como é o campo de um ímã, e pergunto se a distribuição pode ser aproximada por meio de elementos de aço que comportem o campo. Um caso comum na disciplina tem sido o de necessitar um ímã em ferradura, formato U. Mesmo que não seja o que você precisa, gostaria que me respondesse se é possível. Para o que você precisa, o mesmo: dispomos de ímãs fortes tirando-os de discos rígidos desmontados, o campo deles poderia ser adaptado? Claro que quanto mais o experimento parecer com o original, melhor. Quanto ao ímã pequeno de Neodímio, posso emprestar um circular como o do modelo que tem na internet, até que consiga um. E pode experimentar com um de disco rígido.”

## **9 – Agradecimentos**

Gostaria de agradecer aos funcionários das oficinas do IFGW, que me trataram bem e me ajudaram a conseguir os materiais e também a montá-los. Em especial gostaria de agradecer ao Renato, técnico do laboratório de vácuo e criogenia, que se mostrou prestativo com respeito ao ímã.

Por fim, gostaria de agradecer a aluna Maria Clara Igrejas Amon, que me ajudou com as montagens e também foi responsável pela filmagem dos dois vídeos.

## 10 - Referências

- [1] Notas de aula do professor Dr. Roberto de Andrade Martins disponíveis no site <http://ghhc.ifi.unicamp.br/hf2.htm> (essas notas de aula contém a história do surgimento do eletromagnetismo, além de várias fotos dos físicos envolvidos e especificamente do motor feito por Faraday).
- [2] <http://www.wikipedia.com> (site com muitas informações úteis, como história dos motores e biografias dos físicos).
- [3] <http://www.feiradeciencias.com.br/sala22/motor28.asp> (site com vários experimentos disponíveis para estudo. Contém uma descrição do motor de Faraday, além dos materiais necessários e esquemas das montagens).
- [4] <http://lauro.wordpress.com/2006/08/08/criando-o-motor-eletrico-mais-simples-possivel> (contém uma descrição da montagem e uma explicação rápida).
- [5] <http://www.dvorak.org/blog/?p=6521> (contém um vídeo da experiência e a explicação).
- [6] <http://www.evilmadscientist.com/article.php/HomopolarMotor> (contém fotos da montagem e explicação no final).
- [7] <http://www.evilmadscientist.com/article.php/SimpleMHD> (site com figuras ilustrativas e explicação sobre o fenômeno).
- [8] <http://www.k12albemarle.org/instruction/physics/teacher/eANDm/homopolarmotor/home.html> (possui uma animação mostrando o sentido da corrente, do campo magnético e da força resultante. Explica também a regra da mão direita).
- [9] [http://www.grand-illusions.com/articles/homopolar\\_roller/Stewart-homopolar-roller.pdf](http://www.grand-illusions.com/articles/homopolar_roller/Stewart-homopolar-roller.pdf) (artigo com explicação e uma foto).
- [10] [http://en.wikipedia.org/wiki/Lorentz\\_Force](http://en.wikipedia.org/wiki/Lorentz_Force) (site com explicação teórica sobre a força de Lorentz).
- [11] [http://www.practicalphysics.org/go/Experiment\\_765.html;jsessionid=a-wjL1jsBaD](http://www.practicalphysics.org/go/Experiment_765.html;jsessionid=a-wjL1jsBaD) (site que contém uma descrição de uma versão mais reduzida da montagem 1, com uma foto do aparato experimental, além de uma lista de materiais).
- [12] <http://www.magnet.fsu.edu/education/tutorials/java/faradaymotor/index.html> (site que contém uma interessante animação sobre a montagem 1, com as linhas do campo magnético).

Vamos agora colocar aqui uma cópia de algumas das páginas da internet que foram citadas nesse relatório, seguindo a ordem numérica na qual foram apresentadas:

[1]

---

Quanto as notas de aula, por serem vários arquivos do tipo .ppt, eu as salvei em meu computador, e estão a disposição se o coordenador da disciplina quiser copiá-las.

[2]

---

**Michael Faraday**, [FRS](#) ([September 22, 1791](#) – [August 25, 1867](#)) was an [English chemist](#) and [physicist](#) (or *natural philosopher*, in the [terminology](#) of that time) who contributed significantly to the fields of [electromagnetism](#) and [electrochemistry](#).

Faraday studied the [magnetic field](#) around a [conductor](#) carrying a DC [electric current](#), and established the basis for the magnetic field concept in physics. He discovered [electromagnetic induction](#), [diamagnetism](#) and [electrolysis](#). He established that [magnetism](#) could affect [rays](#) of [light](#) and that there was an underlying relationship between the two phenomena. <sup>[2]</sup> <sup>[3]</sup>

His [inventions](#) of [electromagnetic rotary devices](#) formed the foundation of electric motor technology.

As a chemist, Faraday discovered [chemical substances](#) such as [benzene](#), invented an early form of the [bunsen burner](#) and the system of [oxidation numbers](#), and popularized terminology such as [anode](#), [cathode](#), [electrode](#), and [ion](#).

Although he received little formal education and thus [mathematics](#) was always out of his reach, he went on to become one of the most influential [scientists](#) in history. Some historians <sup>[4]</sup> of science refer to him as the best [experimentalist](#) in the history of science. <sup>[5]</sup> It was largely due to his efforts that [electricity](#) became viable for use in technology. The [SI](#) unit of [capacitance](#), the [farad](#), is named after him, as is the [Faraday constant](#), the charge on a [mole](#) of [electrons](#) (about 96,485 [coulombs](#)). [Faraday's law of induction](#) states that a [magnetic field](#) changing in time creates a proportional [electromotive force](#).

He held the post of *Fullerian Professor of Chemistry* at the [Royal Institution of Great Britain](#). Faraday was the first, and most famous, holder of this position to which he was appointed for life.



# Contents

[\[hide\]](#)

- [1 Career outline](#)
- [2 Scientific achievements](#)
  - [2.1 Chemistry](#)
  - [2.2 Electricity](#)
- [3 Later life](#)
- [4 Miscellaneous](#)
- [5 Quotations](#)
- [6 See also](#)
- [7 Publications](#)
  - [7.1 Published Works by Michael Faraday](#)
  - [7.2 Biographies](#)
- [8 References, general](#)
- [9 References](#)
- [10 Further reading](#)
- [11 External links and articles](#)
  - [11.1 Biographies](#)
  - [11.2 Others](#)

## [\[edit\]](#) Career outline



 Michael Faraday, detail from portrait by [Thomas Phillips](#) c1841-1842<sup>[6]</sup>

Michael Faraday was born in [Newington Butts](#), near present-day [Elephant and Castle](#) in [South London, England](#). His family was extremely poor; his father, James Faraday, was a Yorkshire blacksmith who suffered ill-health throughout his life.<sup>[2]</sup> After the most basic of school educations, Faraday had to educate himself. At fourteen he became apprenticed to a local bookbinder and bookseller [George Riebau](#) and, during his seven-year apprenticeship, he read many books, including [Isaac Watts'](#) *The Improvement of the Mind*, the principles and suggestions contained therein he enthusiastically implemented. He developed an interest in science and specifically electricity. In particular, he was inspired by the book *[Conversations in Chemistry](#)* by [Jane Marcet](#).<sup>[7]</sup>

At the age of twenty, in 1812, at the end of his apprenticeship, Faraday attended lectures by the eminent English [chemist](#) and [physicist Humphry Davy](#) of the [Royal Institution](#) and [Royal Society](#), and [John Tatum](#), founder of the [City Philosophical Society](#). Many tickets for these lectures were given to Faraday by [William Dance](#) (one of the founders of the [Royal Philharmonic Society](#)). Afterwards, Faraday sent Davy a three hundred page book based on notes taken during the lectures. Davy's reply was immediate, kind and favorable. When Davy damaged his eyesight in an accident with [nitrogen trichloride](#), he decided to employ Faraday as a secretary. When John Payne, one of the Royal Institution's assistants, was sacked, the now Sir Humphry Davy was asked to find a replacement. He appointed Faraday as Chemical Assistant at the Royal Institution on [March 1](#) 1813. <sup>[2]</sup>

In the class-based English society of the time, Faraday was not considered a gentleman. When Davy went on a long tour to the continent in 1813-5, his valet did not wish to go. Faraday was going as Davy's scientific assistant, and was asked to act as Davy's valet until a replacement could be found in Paris. Davy failed to find a replacement, and Faraday was forced to fill the role of valet as well as assistant throughout the trip. Davy's wife, [Jane Apreece](#), refused to treat Faraday as an equal (making him travel outside the coach, eat with the servants, etc.) and generally made Faraday so miserable that he contemplated returning to England alone and giving up science altogether. The trip did, however, give him access to the European scientific elite and a host of stimulating ideas. <sup>[2]</sup>

His sponsor and mentor was [John 'Mad Jack' Fuller](#), who created the [Fullerian Professorship of Chemistry](#) at the Royal Institution.

Faraday was a devout Christian and a member of the small [Sandemanian](#) denomination, an offshoot of the [Church of Scotland](#). He later served two terms as an elder in the group's church.

Faraday married Sarah Barnard (1800-1879) on June 2, 1821, although they would never have children. They met through attending the Sandemanian church.

He was elected a member of the Royal Society in 1824, appointed director of the laboratory in 1825; and in 1833 he was appointed Fullerian professor of chemistry in the institution for life, without the obligation to deliver lectures.

## [\[edit\]](#) Scientific achievements



Michael Faraday holding a glass bar of the type he used in 1845 to show that magnetism can affect light. Detail of an engraving by [Henry Adlard](#), based on an earlier photograph by Maull & Polyblank c 1857. <sup>[8]</sup>

## [\[edit\]](#) Chemistry

Faraday's earliest chemical work was as an assistant to Davy. He made a special study of [chlorine](#), and discovered two new chlorides of [carbon](#). He also made the first rough experiments on the diffusion of gases, a phenomenon first pointed out by [John Dalton](#), the physical importance of which was more fully brought to light by [Thomas Graham](#) and [Joseph Loschmidt](#). He succeeded in liquefying several gases; he investigated the alloys of [steel](#), and produced several new kinds of glass intended for optical purposes. A specimen of one of these heavy glasses afterwards became historically important as the substance in which Faraday detected the rotation of the plane of polarisation of light when the glass was placed in a magnetic field, and also as the substance which was first repelled by the poles of the magnet. He also endeavoured, with some success, to make the general methods of chemistry, as distinguished from its results, the subject of special study and of popular exposition.

He invented an early form of what was to become the [Bunsen burner](#), which is used almost universally in science laboratories as a convenient source of heat. <sup>[9]</sup>


Faraday worked extensively in the field of [chemistry](#), discovering chemical substances such as [benzene](#) (which he called bicarburet of hydrogen), inventing the system of [oxidation numbers](#), and liquefying gases such as chlorine. He obtained a composition of the chlorine [clathrate hydrate](#) discovered by Sir Humphrey Davy in 1810 (Makogon, 1997). Faraday also discovered the laws of [electrolysis](#) and popularized terminology such as [anode](#), [cathode](#), [electrode](#), and [ion](#), terms largely created by [William Whewell](#). For these accomplishments, many modern chemists regard Faraday as one of the finest experimental scientists in history.

## [\[edit\]](#) Electricity

His greatest work was with electricity. The first experiment which he recorded was the construction of a [voltaic pile](#) with seven halfpence pieces, stacked together with seven

disks of sheet zinc, and six pieces of paper moistened with salt water. With this pile he decomposed sulphate of magnesia (first letter to Abbott, July 12, 1812).



 *Michael Faraday* - statue in Savoy Place, London.  
Sculptor [John Henry Foley](#) RA

In [1821](#), soon after the Danish physicist and chemist, [Hans Christian Ørsted](#) discovered the phenomenon of [electromagnetism](#), Davy and British scientist [William Hyde Wollaston](#) tried but failed to design an [electric motor](#).<sup>[3]</sup> Faraday, having discussed the problem with the two men, went on to build two devices to produce what he called electromagnetic rotation: a continuous circular motion from the circular magnetic force around a wire and a wire extending into a pool of [mercury](#) with a magnet placed inside would rotate around the magnet if supplied with current from a chemical battery. The latter device is known as a [homopolar motor](#). These experiments and inventions form the foundation of modern electromagnetic technology. Faraday published his results without acknowledging his debt to Wollaston and Davy, and the resulting controversy caused Faraday to withdraw from electromagnetic research for several years.

At this stage, there is also evidence to suggest that Davy may have been trying to slow Faraday's rise as a scientist (or natural philosopher as it was known then). In 1825, for instance, Davy set him onto optical glass experiments, which progressed for six years with no great results. It was not until Davy's death, in 1829, that Faraday stopped these fruitless tasks and moved on to endeavors that were more worthwhile. Two years later, in [1831](#), he began his great series of experiments in which he discovered [electromagnetic induction](#), though the discovery may have been anticipated by the work of [Francesco Zantedeschi](#).<sup>[citation needed]</sup> His breakthrough came when he wrapped two insulated coils of wire around a massive iron ring, bolted to a chair, and found that upon passing a current through one coil, a momentary current was induced in the other coil.<sup>[3]</sup> The iron ring-coil apparatus is still on display at the Royal Institution. In subsequent experiments he found that if he moved a magnet through a loop of wire, an electric current flowed in the wire. The current also flowed if the loop was moved over a stationary magnet.



In his work on static electricity, Faraday demonstrated that the charge only resided on the exterior of a charged conductor, and exterior charge had no influence on anything enclosed within a conductor. This is because the exterior charges redistribute such that the interior fields due to them cancel. This shielding effect is used in what is now known as a [Faraday cage](#).

Despite his excellence as an experimentalist, his mathematical ability did not extend so far as trigonometry or any but the simplest algebra. However, his experimental work was consolidated by the able [James Clerk Maxwell](#), who developed his equations which lie at the base of all modern theories of electromagnetic phenomena. Faraday, nevertheless, was able to convey his ideas in clear and simple language.

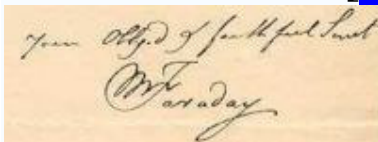
## [\[edit\]](#) Later life

In 1848, as a result of representations by the [Prince Consort](#), Michael Faraday was awarded a [Grace and favour](#) house in [Hampton Court, Surrey](#) free of all expenses or upkeep. This was the Master Mason's House, later called Faraday House, and now No.37 Hampton Court Road. In 1858 he retired to live there.<sup>[10]</sup>

During his lifetime, Faraday rejected a [knighthood](#) and twice refused to become [President of the Royal Society](#).

He died at his house at [Hampton Court](#) on [August 25, 1867](#). He has a memorial plaque in [Westminster Abbey](#), near [Isaac Newton](#)'s tomb, but he turned down burial there and is interred in the Sandemanian plot in [Highgate Cemetery](#).

## [\[edit\]](#) Miscellaneous



Michael Faraday's signature

Faraday gave a successful series of lectures on the chemistry and physics of flames at the [Royal Institution](#), entitled *[The Chemical History of a Candle](#)*. This was the origin of the [Christmas lectures](#) for young people, which are still given there every year and bear his name.

Faraday and [William Whewell](#) were responsible for coining many familiar words including 'electrode', 'cathode', and 'ion'.

Faraday refused to participate in the production of chemical weapons for the [Crimean War](#) citing ethical reasons.

A statue of Faraday stands in Savoy Place, London, outside the [Institution of Electrical Engineers](#).

A recently built hall of accomodation at [Brunel University](#) is named after Faraday.

A hall at [Loughborough University](#) was named after Faraday in [1960](#). Near the entrance to its dining hall is a bronze casting, which depicts the symbol of an electrical [transformer](#), and inside there hangs a portrait, both in Faraday's honour.

Faraday's picture was printed on British £20 [banknotes](#) from 1991 until 2001.<sup>[11]</sup>

In the [video game Chromehounds](#) there is a ThermoVision Device named the Faraday.

The former UK [Faraday Atmospheric Research Station](#) in Antarctica was named after him.

## [\[edit\]](#) Quotations



[Wikiquote](#) has a collection of quotations related to:  
[\*Michael Faraday\*](#)

- "Nothing is too wonderful to be true."
- "Work. Finish. Publish." — his well-known advice to the young [William Crookes](#)
- "The important thing is to know how to take all things quietly."
- Regarding the hereafter, "Speculations? I have none. I am resting on certainties. I know whom I have believed and am persuaded that he is able to keep that which I have committed unto him against that day."
- "Next Sabbath day (the 22nd) I shall complete my 70th year. I can hardly think of myself so old."
- Above the doorways of the Pfahler Hall of Science at [Ursinus College](#) in Collegeville, Pennsylvania, there is a stone inscription of a quote attributed to Michael Faraday which reads "but still try, for who knows what is possible..."<sup>[4]</sup>

[3]

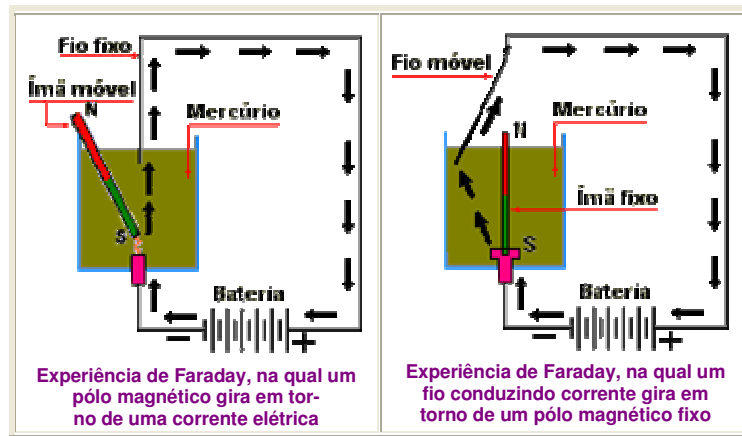
---

# Motor de Faraday

Prof. Luiz Ferraz Netto  
[leobarretos@uol.com.br](mailto:leobarretos@uol.com.br)

## O primeiro motor elétrico

Imediatamente após tomar conhecimento da descoberta de Oersted sobre a conexão entre a eletricidade dinâmica (em contraposição à eletricidade estática) e o magnetismo, **Michael Faraday** (1791 -1867) achou um meio de explorar a descoberta. Ele sabia que uma corrente elétrica exerce uma força sobre um pólo magnético que lhe fica próximo. Talvez essa força pudesse fazer um pólo magnético girar em torno de um fio conduzindo corrente. Faraday utilizou o aparelho ilustrado abaixo, à esquerda, para verificá-lo.



A corrente passa em um circuito fechado, como se indica pelas setas (veja comentário ao final dessa parte 2). O mercúrio, que é um bom condutor de eletricidade, forma uma parte do percurso que vai do fundo do vaso de vidro até o fio fixo. Quando passa uma corrente, o pólo norte do ímã desloca-se em uma trajetória circular em torno do fio fixo. Se os pólos magnéticos forem invertidos, ou o sentido da corrente, o sentido de rotação será também invertido.

Com o sucesso dessa experiência, Faraday prosseguiu para provar que um fio transportando uma corrente pode ser posto a girar em torno de um pólo magnético. O ímã fixo foi colocado em um adaptador, como na ilustração acima, à direita, e o fio mergulhado no mercúrio tornou-se capaz de mover-se livremente.

Logo que o circuito foi completado, o fio começou a girar em torno do pólo magnético. Uma vez mais, o sentido de rotação pôde ser invertido, bastando inverter os pólos magnéticos ou o sentido da corrente.

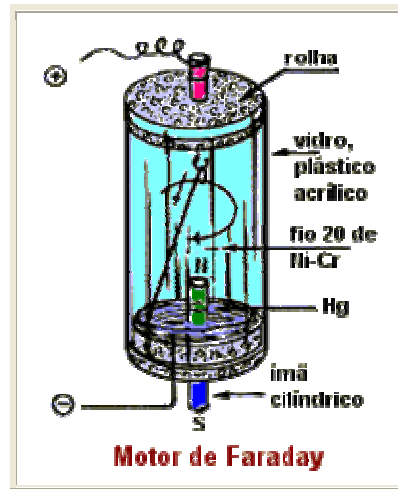
**Comentário:** Vê-se a corrente passando do terminal negativo (-) para o terminal positivo (+) através do circuito externo da bateria. Como sabemos, uma corrente elétrica em condutor metálico é realmente um fluxo de elétrons carregados negativamente que são 'repelidos' para fora da bateria, no terminal negativo, e 'atraídos' para a bateria, no terminal positivo. Alguns livros mostram a chamada "corrente convencional" que circula em sentido oposto. Isto é uma relíquia de tempos passados, quando se pensava que o fluido ou partículas de eletricidade tinha uma carga positiva. Mas, isso não encerra o tema sobre o sentido da corrente; verifique!

Sem dúvida, esse foi o primeiro motor da História das Ciências, apresentado por **Michael Faraday**. Vamos apresentá-lo só para o caso do fio móvel e ímã fixo (você poderá fazer a inversão para futuras demonstrações), em duas versões:

**Versão 1-** Essencialmente, consta de um tubo de vidro ou acrílico, de diâmetro cerca de 8 cm e altura 40 cm. Dois tampões de cortiça vedam seus extremos. Pelo tampão inferior penetra um ímã cilíndrico de ALNICO, ficando



com cerca de 6 cm dentro do tubo (apenas parte da extremidade Norte, conforme ilustração).



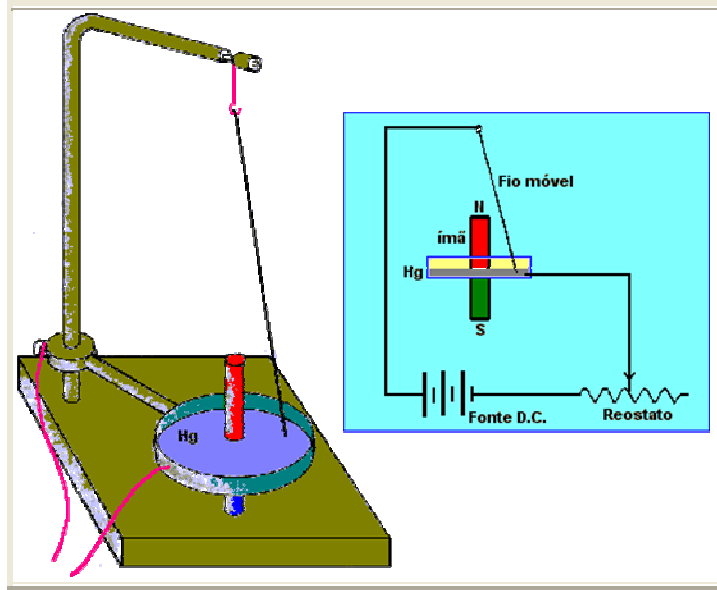
No centro do tampão superior coloca-se um contato elétrico que termina por um gancho ou argola. Nesse gancho, suspende-se um fio de platina ou níquel-cromo. A extremidade inferior desse fio mergulha 1 ou 2 mm no mercúrio colocado no tubo. A montagem é ilustrada acima.

Ligando-se a fonte de tensão (uma ou duas pilhas em série ou uma fonte de 1,5 a 3,0VCC, 2 A), a corrente elétrica passa a circular pelo fio. O campo magnético do ímã permanente age sobre essa corrente dando origem a uma força magnética perpendicular ao fio.

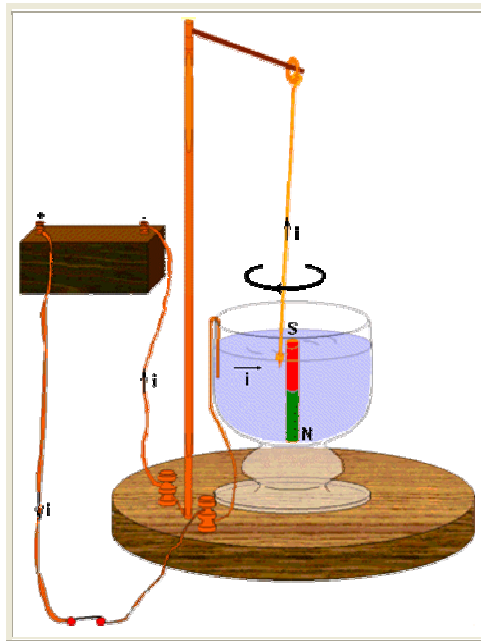
Essa força magnética (força de Lorentz) determina um torque que manterá o fio girando em torno do ímã.

**Versão 2-** Essa versão dispensa o tubo de vidro e os tampões. Agora utilizamos um suporte metálico, comum nos laboratórios escolares. Para suportar o ímã (e o mercúrio) usamos um receptáculo raso de plástico (o autor usou um cinzeiro) no qual foi praticado um orifício central que permite a passagem do ímã cilíndrico (um ligeira camada de cola epóxi ao redor do ímã garante sua fixação no copinho plástico).

Eis um visual da montagem e o esquema elétrico do motor de Faraday:



A fonte de alimentação pode ser para 12 VCC. Inicia-se a operação com o cursor do reostato de 50 a 100 ohms na posição de máxima resistência. Após iniciado o movimento do fio ao redor do ímã ajusta-se o cursor do reostato para que não ocorra excessivo aquecimento do fio móvel. Usar o dispositivo em curtos intervalos de tempo. Eis uma ilustração para outra variante dessa montagem acima:



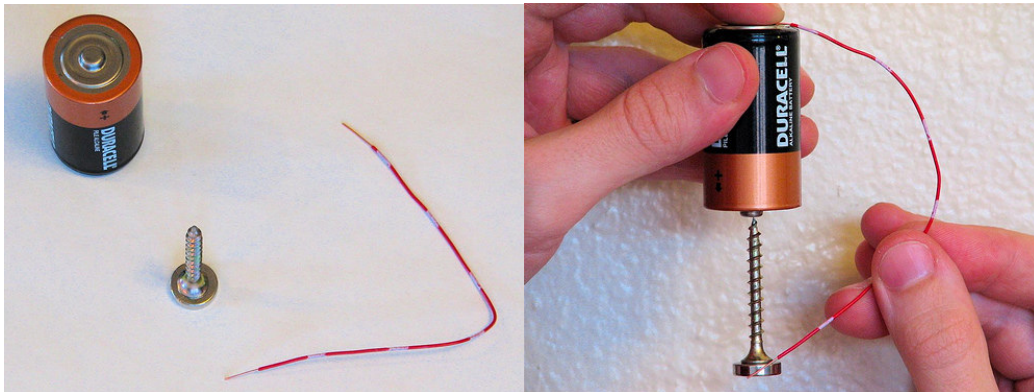
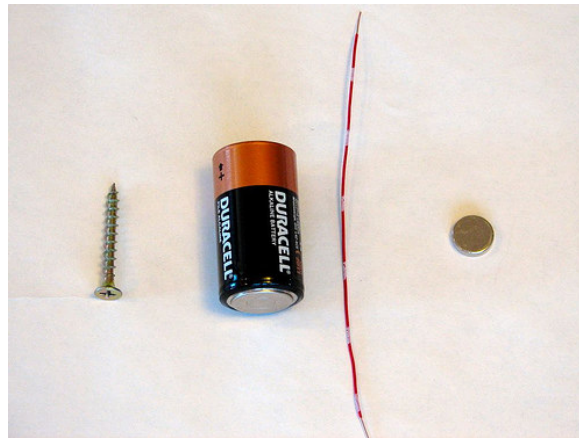
## [Criando o motor elétrico mais simples possível](#)

Agosto 8th, 2006

[Direto do laboratório do Maligno Cientista Louco:](#)

Material: Parafuso, pilha 1,5V alcalina, fio, 1 pequeno imã em forma de disco.

Como fazer:



Resultado final: Um [motor homopolar](#).

Explicação rápida: No corpo do imã, o campo magnético aponta na maior parte perpendicularmente à parte “chata” do mesmo. Quando fechamos o circuito com o fio, uma corrente passa pelo imã no sentido radial do mesmo. E pela [regra da mão direita](#), há uma força resultante que gera a rotação.

How does this work?

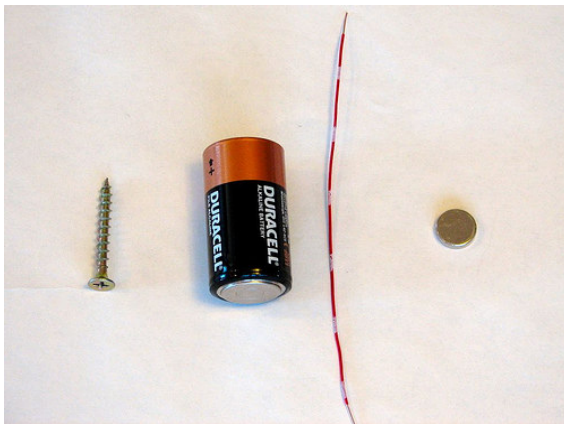
When you touch the wire to the side of the magnet, you complete an electric circuit. Current flows out of the battery, down the screw, sideways through the magnet to the wire, and through the wire to the other end of the battery. The magnetic field from the magnet is oriented through its flat faces, so it is parallel to the magnet's axis of symmetry. Electric current flows through the magnet (on average) in the direction from the center of the magnet to the edge, so it flows in the radial direction, perpendicular to the magnet's axis of symmetry. If you took physics at some point, it's possible that you'll remember the effect that a magnetic field has on moving electric charges: they experience a force that is perpendicular to both their direction of movement and the magnetic field. Since the field is along the symmetry axis of the magnet and the charges are moving radially outward from that axis, the force is in the tangential direction, and so the magnet begins to spin. Neat!

It's called a homopolar motor because you never need to reverse the polarity of any motor component during operation, unlike the other types of motors that we've described. I first learned about homopolar motors in an article by David Kagan, in the magazine *The Physics Teacher*, February 2005. It turns out that it's been around longer than that: it was invented in 1821 by Michael Faraday. Somewhat surprisingly, this is more than just a curiosity: motors of this design are currently being developed for quiet, high-power applications.

[6]

---

### How to make the simplest electric motor



You have one drywall screw, one 1.5 V alkaline cell, six inches of plain copper wire, one small neodymium disk magnet, and no other tools or supplies. You have 30 seconds to make an electric motor running in excess of ten thousand RPM. Can you do it? Surprisingly enough, you can.

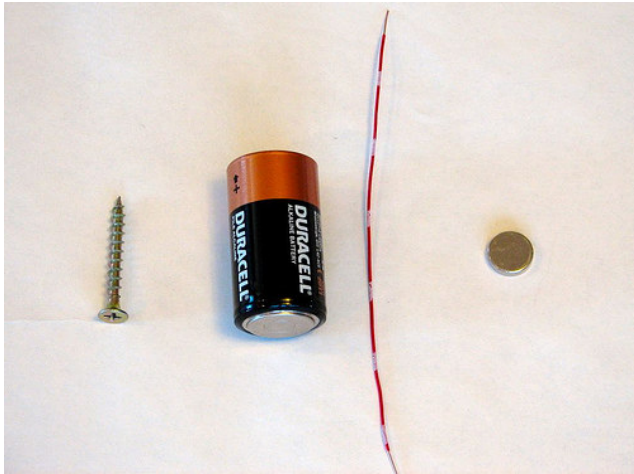
Let's take a step back. The most common type of [electric motor](#) is the brushed dc electric motor. This is the kind that you'll find inside essentially everything that moves (or shakes) and runs on batteries. This type of motor attracts an electromagnet towards a permanent magnet. When the two are close enough, the polarity of the current through the electromagnet is reversed, so that it now repels the permanent magnet, and thus keeps turning. It's quite easy to build a working model;

Christian built [this example](#) for his third-grade science project.

A simpler yet motor (sometimes sold as the sold as the "[world's simplest motor](#)") just switches off the current for half of the cycle, letting the angular momentum of the spinning motor armature carry it through. In [Make Magazine Volume I](#), the [Howtoons comic](#) shows how to make an electric motor that works that way.

None of these is really the simplest motor. The real champion is the *homopolar motor*.

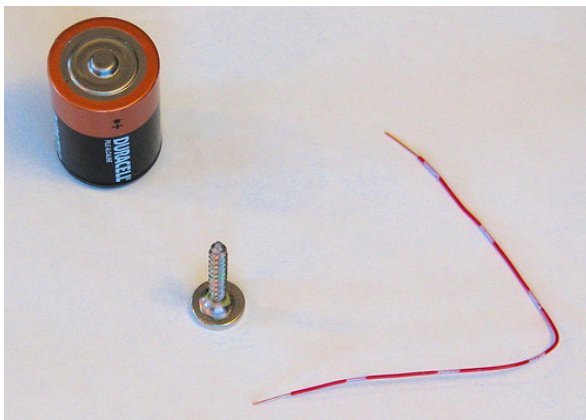
**Ready to build one? Let's get started:**



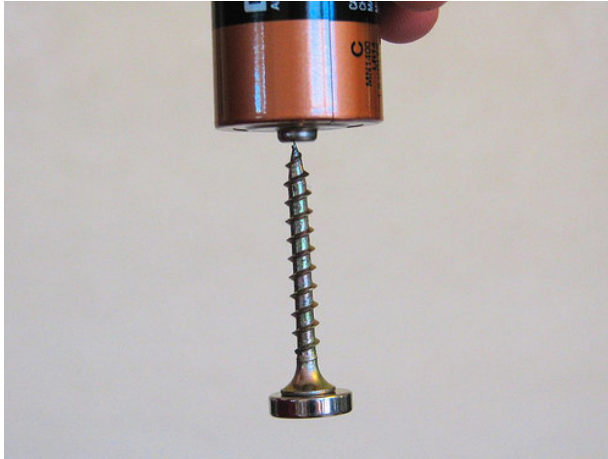
The ingredients (L-R): One ferromagnetic screw, one battery cell, a few inches of copper wire, and a neodymium disk magnet.

I used a drywall screw both because it has a flat head and because it's easy to tell when it's turning. You can use a nail instead. The battery needn't be any particular type; an alkaline C-cell works fine and is easy to hold. Just about any copper wire will work fine for this application. I used some wire with partially stripped (and partially striped) red insulation that is easy to see in the photos. Bare copper will work just as well.

The magnet came from an [LED throwie](#) with a dead battery. The best magnets for this job are neodymium disc magnets with a conductive plating. You can get them from [plastic toys](#) or buy them from a number of [magnet discount and surplus shops](#).

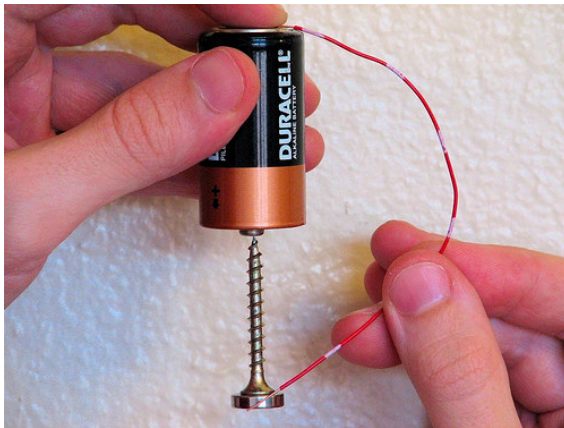


Set the screw on the magnet, bend the wire.

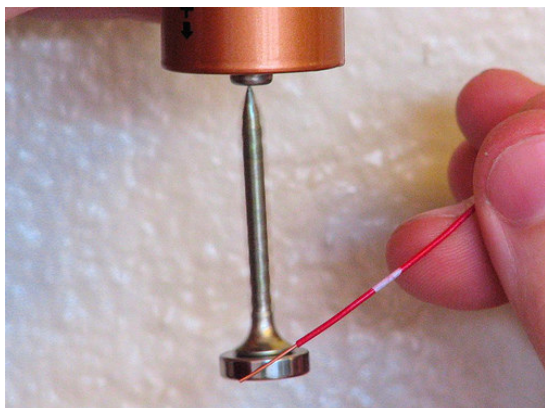


Attach the magnet to one end of the battery. The weak, single-point contact that you are making serves as a low-friction bearing. I like to attach it to the bottom end, but the other end will work as well. (If you do so, the motor will spin the opposite direction. You can also reverse the direction by flipping the magnet upside down.)

(Note to physics geeks: The heavier your magnet plus screw system is, the lower the friction will be, right up to the point that magnet isn't strong enough to hold them any more. This is because the friction force is proportional to the normal force. In other words, a bigger magnet is usually better.)



Press and hold the top end of the wire to the top end of the battery, making an electrical connection from the top battery end to the wire.



Here we go: Lightly touch the free end of the wire to the *side* of the magnet. The magnet and screw start to spin immediately. We can get ours up to 10,000 RPM in about fifteen seconds.

Watch out: The screw and magnet can easily fly out of control, and you *do not* want that screw ending up in your eye. Also note that some of the components, like the wire, can get very warm while you're doing this. Wear safety glasses and use common sense!

**Short movie** (25 s): spinning up the motor (Choose your format)

[Download](#) high-res quicktime movie (1.6 MB)

Watch the low-res version on [YouTube](#)

**Wondering what to try next?** You may also like [this project](#), which is about building a similar sort of motor that spins *water* instead of a magnet.

---

### How does this work?

When you touch the wire to the side of the magnet, you complete an electric circuit. Current flows out of the battery, down the screw, sideways through the magnet to the wire, and through the wire to the other end of the battery. The magnetic field from the magnet is oriented through its flat faces, so it is parallel to the magnet's axis of symmetry. Electric current flows through the magnet (on average) in the direction from the center of the magnet to the edge, so it flows in the radial direction, perpendicular to the magnet's axis of symmetry. If you took physics at some point, it's possible that you'll remember the effect that a magnetic field has on moving electric charges: they experience a force that is perpendicular to both their direction of movement and the magnetic field. Since the field is along the symmetry axis of the magnet and the charges are moving radially outward from that axis, the force is in the tangential direction, and so the magnet begins to spin. Neat! For a slightly more thorough explanation, have a look at the end of [this article](#), which is about a magnetohydrodynamic homopolar motor.

It's called a homopolar motor because you never need to reverse the polarity of any motor component during operation, unlike the other types of motors that we've described. I first learned about this type of motor in an article by David Kagan, in the magazine *The Physics Teacher*, February 2005. It turns out that it's been around longer than that: it was invented in 1821 by [Michael Faraday](#). Somewhat surprisingly, this is more than just a curiosity: motors of this design are currently [being developed](#) for quiet, high-power applications.



Final note: How do we measure the rotational speed of the motor?

You can get an optical tachometer for \$20 or less, intended for use with model airplanes. I have model LXPT31 from [Tower Hobbies](#), which is expecting to see an airplane propellor with two blades. I added two wide black stripes to the magnet with a Sharpie, which allow the tachometer to read the rotational speed of the motor. Pointing the tachometer at the magnet and spinning up the motor, we were able to clock a speed above 10,000 RPM after spinning up for about fifteen seconds. Spiffy.

[7]

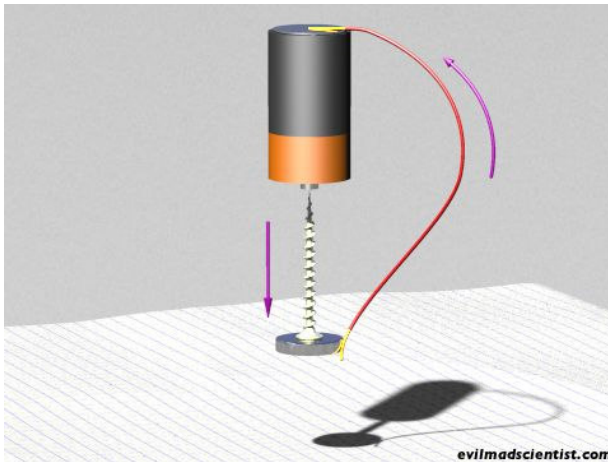
---

### OK, so how the bleep does it work?

Last month we showed how to make a [homopolar motor](#), which is the oldest and simplest type of electric motor. In the example motor that we made there, a magnet hanging on a screw is spun up to high speed. Here, we have constructed a magnetohydrodynamic "motor" that spins salt water. The dynamics of these two systems are exactly equivalent; both are fundamentally examples of homopolar motors.

[Michael Faraday](#)'s original 1821 homopolar motor was somewhere between these two examples. Rather than using a rotating magnet, he used a pool of liquid mercury (an excellent conductor) sitting atop a magnet. In his Popular Science column this month, Theodore Gray [recreated](#) that original motor, using a genuine pool of mercury. Among the different designs that have evolved from that original are those (like the one with the screw) that rotate a mechanical object, but also the magnetohydrodynamic version, which can propel a ship through the ocean.

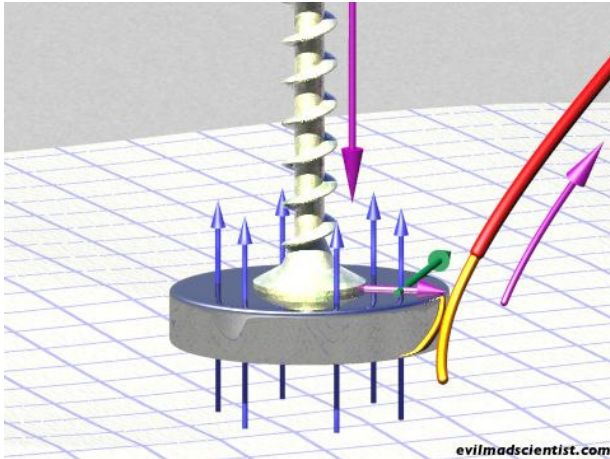
Sure, you say, but *how does it work*? Let's back up for a moment and first look at how the (rigid) mechanical homopolar motor works. For the sake of concreteness, we'll use the example of the motor that we [wrote about](#) previously.



A simple, "rigid" homopolar motor. Electrical current flows in the direction indicated by the purple arrows: from the bottom end of the battery, down the screw, through the magnet, up the wire, and back to the top of the battery.

(By the way, I made these drawings in [POV-Ray](#). Someday, I'll put the rest of my [tutorial](#) on line.)





Zooming in on the magnet, we now illustrate the magnetic field lines (blue) sticking up through the magnet. The magnetic field above the magnet essentially points upwards. Again, the direction of current flow is given by the purple arrows. The horizontal current arrow is the important one. The electric charges moving through the magnet feel a [Lorentz force](#) whose strength is determined by the angle between the magnetic field orientation and the direction of current flow; the force is strongest if they are 90 degrees apart. The direction of the resulting force is perpendicular to those two directions.

For the currents that flow in the screw and wire, the forces are minimal since the current direction is parallel to that of the magnetic field. However, there is a substantial force on the electric charges that flow horizontally through the magnet, at 90 degrees to the (vertical) magnetic field orientation. Thus, a force (green arrow) is generated in the third direction, which gives rise to the magnet spinning.

[10]

## Lorentz force

From Wikipedia, the free encyclopedia  
 (Redirected from [Lorentz Force](#))  
 Jump to: [navigation](#), [search](#)

In [physics](#), the **Lorentz force** is the [force](#) exerted on a [charged](#) particle in an [electromagnetic field](#). The particle will experience a force due to electric field of  $q\mathbf{E}$ , and due to the magnetic field  $q\mathbf{v} \times \mathbf{B}$ . Combined they give the [Lorentz](#) force equation (or law):

$$\mathbf{F} = q(\mathbf{E} + \mathbf{v} \times \mathbf{B}),$$

where

$\mathbf{F}$  is the [force](#) (in [newtons](#))  
 $\mathbf{E}$  is the [electric field](#) (in [volts per meter](#))  
 $\mathbf{B}$  is the [magnetic field](#) (in [webers](#) per square meter, or equivalently, [teslas](#))  
 $q$  is the [electric charge](#) of the particle (in [coulombs](#))  
 $\mathbf{v}$  is the instantaneous [velocity](#) of the particle (in meters per [second](#))  
 and  $\times$  is the [cross product](#).

Thus a positively charged particle will be accelerated in the *same* linear orientation as the **E** field, but will curve perpendicularly to the **B** field according to the [right-hand rule](#).

## Contents

[\[hide\]](#)

- [1 The Significance of the Lorentz Force](#)
- [2 Lorentz force in special relativity](#)
- [3 Covariant form of the Lorentz force](#)
  - [3.1 Derivation](#)
- [4 Applications](#)
- [5 See also](#)
- [6 Reference](#)
- [7 External links](#)

### [\[edit\]](#) The Significance of the Lorentz Force

The Lorentz force is one of the original eight [Maxwell's equations](#) (equation D) and it is the solution to the differential form of [Faraday's law](#). Nowadays, [Faraday's law](#) is used instead of the Lorentz force in [Maxwell's equations](#). [Faraday's law](#) and the **Lorentz force** both express the same physics. The discovery of the **Lorentz force** was before Lorentz's time. It can be seen at equation (77) in Maxwell's 1861 paper [On Physical Lines of Force](#).

### [\[edit\]](#) Lorentz force in special relativity

When particle speeds approach the speed of light, the Lorentz force equation must be modified according to [special relativity](#):

$$\frac{d(\gamma m \mathbf{v})}{dt} = \mathbf{F} = q(\mathbf{E} + \mathbf{v} \times \mathbf{B}),$$

where

$$\gamma \stackrel{\text{def}}{=} \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{|\mathbf{v}|^2}{c^2}}}$$

is called the [Lorentz factor](#) and  $c$  is the [speed of light](#) in a vacuum.

This expression differs from the expression obtained from the Lorentz force by a factor of  $\gamma$ .

The change of energy due to the fields is

$$\frac{d(\gamma mc^2)}{dt} = q\mathbf{E} \cdot \mathbf{v}.$$

## **[edit]** Covariant form of the Lorentz force

Main article: [Formulation of Maxwell's equations in special relativity](#)

The Lorentz force equation can be written in [covariant form](#) in terms of the field strength tensor.

$$\frac{dp^\alpha}{d\tau} = qu_\beta F^{\alpha\beta}$$

where

$\tau$  is  $c$  times the [proper time](#) of the particle,

$q$  is the [charge](#),

$u$  is the [4-velocity](#) of the particle, defined as:

$$u_\beta = (u_0, u_1, u_2, u_3) = \gamma (c, v_x, v_y, v_z) \text{ and}$$

$F$  is the [field strength tensor](#) (or electromagnetic tensor) and is written in terms of fields as:

$$F^{\alpha\beta} = \begin{bmatrix} 0 & -E_x/c & -E_y/c & -E_z/c \\ E_x/c & 0 & -B_z & B_y \\ E_y/c & B_z & 0 & -B_x \\ E_z/c & -B_y & B_x & 0 \end{bmatrix}$$

The fields are transformed to a frame moving with constant relative velocity by:

$$\acute{F}^{\mu\nu} = \Lambda^\mu_\alpha \Lambda^\nu_\beta F^{\alpha\beta},$$

where  $\Lambda^\mu_\alpha$  is a [Lorentz transformation](#).

## **[edit]** Derivation

The  $\mu = 1$  component (x-component) of the force is

$$\gamma \frac{dp^1}{dt} = \frac{dp^1}{d\tau} = qu_\beta F^{1\beta} = q \left( -u^0 F^{10} + u^1 F^{11} + u^2 F^{12} + u^3 F^{13} \right).$$

Here,  $\tau$  is the [proper time](#) of the particle. Substituting the components of the electromagnetic tensor  $F$  yields

$$\gamma \frac{dp^1}{dt} = q \left( -u^0 \left( \frac{-E_x}{c} \right) + u^2 (B_z) + u^3 (-B_y) \right)$$

Writing the [four-velocity](#) in terms of the ordinary velocity yields

$$\gamma \frac{dp^1}{dt} = q\gamma \left( c \left( \frac{E_x}{c} \right) + v_y B_z - v_z B_y \right)$$

$$\gamma \frac{d\mathbf{p}^1}{dt} = q\gamma (\mathbf{E}_x + (\mathbf{v} \times \mathbf{B})_x).$$

The calculation of the  $\mu = 2$  or  $\mu = 3$  is similar yielding

$$\gamma \frac{d\mathbf{p}}{dt} = \frac{d\mathbf{p}}{d\tau} = q\gamma (\mathbf{E} + (\mathbf{v} \times \mathbf{B})),$$

which is the Lorentz force law.

## [\[edit\]](#) Applications

The Lorentz force is a principle exploited in many devices including:

- [Cyclotrons](#) and other circular path [particle accelerators](#)
- [Homopolar generators](#)
- [Magnetrons](#)
- [Magnetoplasmadynamic thrusters](#)
- [Mass spectrometers](#)
- Velocity Filter

The Lorentz force can also act on a current carrying conductor, in this case called [Laplace Force](#), by the interaction of the conduction electrons with the atoms of the conductor material. This force is used in many devices including :

- [Railguns](#)
- [Electrical generators](#)
- [Electric motors](#)
- 

[11]

---

## Faraday's motor

### Demonstration

To demonstrate the motor effect in a wire carrying an electric current.

This was the first motor ever produced repeatedly by Michael Faraday in his laboratory at the Royal Institution London.

Recent developments in magnet technology have made this possible using brine or copper sulfate solution as the liquid conductor, instead of mercury (used by Faraday).

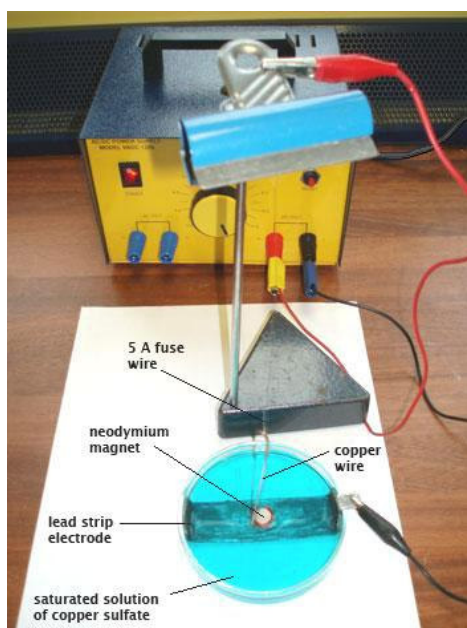
### Apparatus and materials

*Shallow dish, 80 mm diameter and 20 mm high (petri dish)*

*Sheet of conducting metal, i.e. lead or copper approx 30 mm by approx 100 mm placed*

*in base of dish with one end folded at right angles to clear top of dish and form electrode terminal*  
*Neodymium magnet (10 mm diameter) glued to top face of metal sheet and placed centrally*  
*Insulate side of magnet with glue or ring of adhesive tape*  
*Copper sulfate solution, saturated*  
*Fuse wire, 5 amp. Use rheostat to limit current.*  
*Copper rod, 16 swg or thicker, approx 100 mm long*  
*Stand and clamp*  
*Crocodile clips, 2*  
*Power supply (0-12v DC), 5 amps*  
*Reversing switch (optional)*  
*Ammeter(optional) to keep current to around 5 amps*

### Technical notes



Neodymium magnets are available from [Rapid Electronics](#) or [Middlesex University teaching resources](#).

If you use copper sulfate solution, the device will deposit copper from solution so can only be operated for short periods. Brine does not prevent the problem.

Copper wire can be salvaged from offcuts of electrical earthing cable or use a nail / toy car axle etc.

### Safety

The apparatus can produce some gassing if current is too high.

Fuse wire may rupture if the current is too high so the demonstration should be done

behind a screen. Why not use a rheostat and ammeter to adjust the current? (Copper sulfate is toxic.)

The copper sulphate should not be left in the dish after the experiment is complete since it tends to attack the iron of the magnet.

[Read our standard health & safety guidance](#)

### Procedure

- a** Connect the lead strip electrode, using a crocodile clip to the reversing switch.
- b** Wrap or solder fuse wire to one end of the copper rod. Suspend the copper pendulum rod from clamp with a 5 amp fuse wire so that the rod just clears the lead strip and can rotate freely around magnet without fouling the magnet or strip.
- c** Connect the free end of fuse wire, using a crocodile clip to the reversing switch.
- d** Pour sufficient copper sulfate into dish to just cover the magnet.
- e** Starting at zero increase the voltage until the copper wire starts to rotate around the magnet (may need a helping hand to start). Reduce voltage once rotation established in order to keep current to around 5 amps.
- f** Reversing the polarity will reverse the direction of rotation.

### Teaching notes

- 1** The copper sulfate solution forms an electrical conductor since it has free ions and completes the electrical circuit.
- 2** An interesting but unwanted side effect is the reduction of copper sulfate by electrolysis to copper metal. This can be seen forming like iron filings at end of copper rod as it rotates.

*This experiment was submitted by Richard Walder from Eastbourne College.*