

# RELATÓRIO PARCIAL

## Balança Curie e Correntes de Foucault

Instrumentação para o Ensino - F 809  
Universidade Estadual de Campinas - UNICAMP  
Instituto de Física “Gleb Wataghin” - IFGW

**Aluno:** Rafael Derradi de Souza R.A.: 017125

**Orientador:** Prof. Dr. Antonio Manoel Mansanares

**Coordenador:** Prof. Dr. José Joaquim Lunazzi

## 1 Introdução

O magnetismo é um campo em que físicos, engenheiros, cientistas de materiais, químicos, metalúrgicos e outros trabalham juntos. Atualmente, constitui um dos objetos de estudo mais interessantes da ciência, além de apresentar um grande interesse econômico, o qual faz com que seja uma das maiores forças tecnológicas neste momento. Desde uma simples bússola até a geração de energia elétrica ou as memórias dos computadores, diversos fenômenos magnéticos estão envolvidos.

Neste trabalho pretende-se mostrar através de montagens simples dois fenômenos muito importantes ligados ao magnetismo: uma transição de fase magnética em um material ao ser aquecido e o surgimento de correntes parasitas, as correntes de Foucault, em condutores submetidos a um fluxo variável de campo magnético.

## 2 Um pouco de história

A história do magnetismo começou com um mineral chamado magnetita ( $\text{Fe}_3\text{O}_4$ ), a primeira substância com propriedades magnéticas conhecida pelo homem. Sua história anterior é obscura, mas seu poder de atrair ferro já era conhecido séculos antes de Cristo. A magnetita está amplamente distribuída. No mundo antigo, os depósitos mais abundantes ocorriam na região chamada Magnésia, localizada no que é hoje a Turquia, e a palavra magneto é derivada de uma similar grega, que se diz ter vindo do nome dessa região.

O primeiro a escrever sobre o magnetismo no Ocidente foi Peter Peregrinus, em um tratado datado de 1269 onde, além de descrever a magnetita e suas propriedades, definia a propriedade do ímã de apontar sempre para o Norte, mencionava pela primeira vez o termo pólo magnético e explicava como um ímã, quando partido em dois, se transforma em dois ímãs. Mas o trabalho mais significativo desse tempo e o mais completo desde o tempo de Peter Peregrinus foi o livro De Magnete, publicado em Londres, em 1600, por William Gilbert, na época médico da rainha Elizabeth I. O livro discutia

a bússola magnética, o comportamento do imã propriamente dito, com seus poderes de atração e repulsão, a distinção entre a ação magnética e a ação (elétrica) do âmbar e o envolvimento de cada imã por uma “órbita invisível de virtude”, que afetava qualquer pedaço de ferro que fosse colocado em sua vizinhança. O livro discutia, também, como um imã de forma esférica poderia desempenhar o papel da Terra e com o auxílio de pequenos imãs, demonstrava o comportamento daquilo que hoje chamamos de campo magnético terrestre, explicando a propriedade da agulha da bússola de sempre apontar para o Norte ou para o Sul, a declinação magnética e a inclinação magnética [6].

No século XIX, o professor dinamarquês Hans Christian Oersted conseguiu provar experimentalmente, em 1820, que quando uma corrente elétrica passava ao longo de um fio aparecia um campo magnético e André-Marie Ampère, na França, entre 1821 e 1825, esclareceu o efeito de uma corrente sobre um imã e o efeito oposto, de um imã sobre uma corrente.

Nos anos seguintes, Michael Faraday, na Inglaterra, iniciou suas pesquisas argumentando que se uma corrente num fio produzia efeitos magnéticos, como Ampère tinha demonstrado, o inverso poderia ser verdadeiro, isto é, um efeito magnético poderia produzir uma corrente elétrica. Para testar essa hipótese, Faraday enrolou duas espiras de fio num anel de ferro, uma ligada a uma bateria e a outra, ligada a um medidor de corrente elétrica, verificando a existência, na segunda espira, de uma corrente temporária quando ligava e desligava a bateria. Noutra experiência, Faraday usou uma espira enrolada em uma haste de ferro e dois imãs em forma de barra para demonstrar que os imãs, por si sós, podiam produzir uma corrente. Para explicar como a eletricidade e o magnetismo podiam afetar um ao outro no espaço vazio, Faraday propôs a idéia de um campo, imaginando linhas de força magnética tanto mais próximas umas das outras quanto mais intenso era esse campo e supondo que essas linhas tendiam a se encurtar sempre que possível e a se repelir mutuamente. Mais tarde, em 1837, Faraday introduziu também a idéia de linhas de força elétrica [6].

Por volta de 1855 Jean Bernard Leon Foucault observou que quando um disco de cobre era colocado entre os pólos de um magneto era preciso mais força para fazê-lo girar do que quando não havia o magneto, fato que ocorre devido ao surgimento de correntes parasitas no interior do metal produzidas pela variação do fluxo, correntes estas que também ficaram conhecidas como correntes de Foucault [7].

A análise matemática completa dos fenômenos elétricos e magnéticos aceita hoje apareceu em 1873, quando o escocês James Clerk Maxwell publicou seu Tratado sobre Eletricidade e Magnetismo.

A partir de então, sobre a história mais recente, podemos citar alguns dos trabalhos mais importantes, sintetizadamente, começando com Oberlin Smith, que idealizou a gravação magnética e que, anos mais tarde, Valdemar Poulsen colocou em prática construindo o primeiro gravador magnético. No final do século XIX, Pierre Curie mostrou que as propriedades magnéticas de uma dada substância sofrem transformações em uma certa temperatura, que ficou conhecida como ponto de Curie. Em 1905, Paul Langevin apresenta seus estudos sobre o diamagnetismo e, em 1907, Pierre Weiss, sobre o ferromagnetismo.

Neste trabalho, destacam-se principalmente os nomes de Jean Bernard Leon Foucault e Pierre Curie. A seguir, apresentamos um breve resumo de suas biografias.

## 2.1 Jean Bernard Leon Foucault

Jean Bernard Leon Foucault nasceu em Paris em 18 de Setembro de 1819. No início de sua carreira estudou medicina; concluído o curso, cedo o abandonou para se dedicar à Física. Em 1851 ele constrói

o então famoso experimento que conhecemos como Pêndulo de Foucault, constituído por uma esfera metálica 28 kgf de peso, suspensa por um fio de aproximadamente 67 m, e que serve para demonstrar a rotação da Terra. Alguns anos após, inventa e constrói o giroscópio, um aparelho que lhe permitiu realizar novas experiências sobre o movimento da Terra. Foucault recebeu pela descoberta do giroscópio a medalha Copley, da Royal Society de Londres. Em 1855 se torna assistente de física do Observatório Imperial de Paris.

Junto com Armand Fizeau consegue aprimorar e medir a velocidade da luz no ar e na água, além de conseguir a primeira fotografia solar tirada depois de aprimorar o daguerreótipo, que foi um aparelho fotográfico criado por Daguerre.

Deve-se a Foucault, a descoberta das correntes induzidas em um condutor quando em movimento na presença de um campo magnético intenso. As Correntes de Foucault são utilizadas para amortecer oscilações em alguns aparelhos (balanças de precisão, medidores de corrente, tensão etc.), frenagens, fornos de indução etc. Foucault morreu em 11 de Fevereiro de 1868, em Paris [1].

## 2.2 Pierre Curie

Pierre Curie nasceu em Paris em 15 de maio de 1859. Licenciou-se em física em 1878 e assumiu o cargo de assistente no laboratório da Universidade de Sorbonne onde trabalhou juntamente com seu irmão mais velho, Jacques. Os dois jovens físicos anunciaram a descoberta de um importante fenômeno, a piezoelectricidade (eletricidade produzida pela tensão nos cristais). Em suas pesquisas em magnetismo, observou que quando um material ferromagnético era aquecido, acima de uma dada temperatura ele perdia suas propriedades magnéticas, temperatura esta que ficou conhecida como ponto de Curie. Pierre também deu importantes contribuições com suas pesquisas sobre radiação, que o levou, juntamente com sua esposa, Marie Curie, e Henri Becquerel, a ganhar o prêmio Nobel de 1903 [8].

## 3 Balança Curie

A balança Curie é uma montagem simples que se pretende fazer para ilustrar uma transição de fase magnética. Para entender um pouco melhor do que se trata uma transição de fase magnética é preciso falar um pouco sobre o magnetismo da matéria.

Cada elétron em um átomo possui um momento de dipolo magnético orbital e um momento de dipolo magnético de spin que se combinam vetorialmente. A resultante dessas duas grandezas vetoriais se combina vetorialmente com resultantes semelhantes de todos os outros elétrons no átomo, e a resultante para cada átomo se combina com aquelas para todos os outros átomos em uma amostra de um material. Se a combinação de todos estes momentos de dipolo magnético produz campo magnético, então o material é magnético. Existem 3 tipos gerais de magnetismo:

1. **Diamagnetismo:** manifestado por todos os materiais comuns, mas é tão fraco que é mascarado se o material exibir também magnetismo de um dos outros dois tipos. No diamagnetismo, fracos momentos de dipolo magnético são produzidos nos átomos do material quando este é colocado em um campo magnético externo  $\vec{B}$ ; a combinação de todos esses momentos de dipolo induzidos fornece ao material como um todo apenas um fraco campo magnético resultante. Os momentos de dipolo, portanto o seu campo resultante, desaparecem quando  $\vec{B}$  é removido [2].

2. **Paramagnetismo:** manifestado por materiais contendo elementos de transição, elementos terras-raras e elementos actinídeos. Cada átomo de um material deste tipo possui um momento de dipolo resultante permanente, mas os momentos estão orientados aleatoriamente no material apresentando um campo magnético resultante nulo. Entretanto, um campo magnético externo  $\vec{B}$  pode alinhar parcialmente os momentos de dipolo magnético atômicos dando ao material um campo magnético resultante. O alinhamento e portanto o seu campo desaparecem quando  $\vec{B}$  é removido [2].
3. **Ferromagnetismo:** é uma propriedade do ferro, do níquel, do cobalto e alguns outros elementos. Alguns dos elétrons nestes materiais possuem seus momentos de dipolo magnético resultante alinhados, que produzem regiões com fortes momentos de dipolo magnético. Um campo externo  $\vec{B}$  pode então alinhar os momentos magnéticos de tais regiões, produzindo um forte campo magnético para uma amostra do material; o campo persiste parcialmente quando  $\vec{B}$  é removido [2].

Por definição, o momento de dipolo magnético por unidade de volume é denominado magnetização  $\vec{M}$ . A magnetização de uma amostra pode ser obtida multiplicando-se o momento magnético  $\vec{m}$  pelo número  $N$  de átomos por unidade de volume. Dessa forma, um ferromagneto pode ser caracterizado por possuir uma magnetização permanente, que não se anula quando o campo externo é removido. Quando a temperatura de uma amostra ferromagnética é elevada, chega-se à um ponto em que a agitação térmica quebra toda a ordenação magnética, ou seja, os momentos magnéticos passam a orientar-se aleatoriamente, e a amostra deixa de ser ferromagnética passando a ser paramagnética. Este fenômeno caracteriza uma transição de fase magnética e a temperatura em que isto acontece é denominada como ponto de Curie. A tabela 1 mostra os valores do ponto de Curie para o ferro, níquel e cobalto.

Substância	$T_C$ (K)
Fe	1043
Co	1388
Ni	627

Tabela 1: Pontos de Curie para alguns materiais (referências [3, 5]).

A montagem proposta neste trabalho é uma forma bem simples de mostrar que, ao aquecer um material ferromagnético, este perde suas propriedades magnéticas em uma certa temperatura. Esta montagem, chamada de balança Curie, consiste em um pêndulo de um material ferromagnético que é liberado para oscilar somente quando o material atinge sua temperatura de Curie. A figura 1 mostra como deve ser a balança.

O material magnético que se pretende utilizar como pêndulo é uma pequena barra de níquel (Ni), pois este, como pode ser visto na tabela 1, possui um ponto de Curie mais baixo e portanto mais fácil de ser alcançado. Este material está sendo providenciado já tendo sido solicitado auxílio aos técnicos da oficina mecânica do Departamento de Eletrônica Quântica. O suporte e os fios para a construção do pêndulo são de fácil obtenção e ainda não foi possível conseguir um bico de Bunsen ou algo parecido para realizar o aquecimento. O tubo de vidro mostrado na figura 1 é simplesmente para

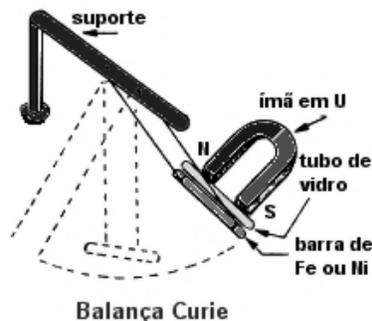


Figura 1: Esquema simplificado da montagem da balança Curie.

isolar termicamente a barra do ímã. Trata-se de um experimento simples e, portanto, assim que todo material necessário estiver em mãos, serão feitos testes para ajustar o experimento da melhor maneira possível para a apresentação.

## 4 Correntes de Foucault

Antes de começarmos a tratar sobre o que significam as correntes de Foucault, é conveniente que façamos uma introdução sobre a lei da indução de Faraday e sobre a lei de Lenz. Faraday percebeu que uma f.e.m. e uma corrente podem ser induzidas em uma espira quando o fluxo de linhas de campo magnético  $\phi_B$  passando através da área limitada pela espira é variado. Quantitativamente, esta relação pode ser escrita como:

$$\epsilon = -\frac{d\phi_B}{dt} \quad (1)$$

Segundo a lei de Lenz, qualquer corrente induzida tem um sentido tal que o campo magnético que ela gera se opõe à variação do fluxo magnético que a produziu. Matematicamente, a lei de Lenz é expressa pelo sinal negativo que aparece na fórmula da Lei de Faraday [6]. A lei de Lenz está diretamente vinculada ao princípio de conservação de energia [3].

Dessa forma, quando variamos os fluxo de campo magnético sobre uma placa condutora, correntes induzidas deverão surgir no interior da placa de modo a produzir um campo que cancele a variação do fluxo, da mesma maneira que acontece em uma espira. Essas correntes induzidas que surgem em condutores devido à variação do fluxo do campo magnético são chamadas de correntes parasitas ou correntes de Foucault.

Para ilustrar este fenômeno, propomos duas montagens clássicas, onde na primeira um pêndulo formado por uma placa condutora de material não magnético é posto a oscilar entre os pólos de dois ímãs e, na segunda um disco condutor é colocado no lugar do pêndulo. A figura 2 mostra um esquema simplificado de cada montagem.

Pretende-se observar os efeitos provocados pelo surgimento das correntes de Foucault quando colocamos o pêndulo para oscilar ou o disco para girar. Na montagem com o disco, será interessante notar a existência de um freamento ao movimentá-lo, semelhante à ação de uma força de atrito viscoso. No caso do experimento com os pêndulos, o fenômeno é o mesmo, o pêndulo é freado ao passar pelos

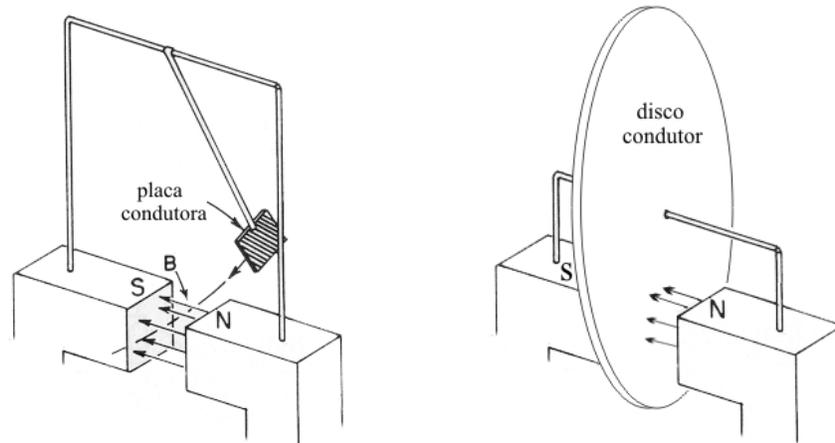


Figura 2: Esquema simplificado mostrando as montagens para observar as correntes de Foucault com pêndulos e com disco, respectivamente.

ímãs, mas neste caso, existem três tipos de pêndulos: um formado por uma placa retangular inteira e outros dois formados por placas retangulares com fendas. O efeito devido às correntes de Foucault é fortemente reduzido quando são produzidas fendas nas placas, uma vez que se reduz o fluxo nas partes metálicas e, ao mesmo tempo, obriga-se cada corrente a percorrer um caminho mais longo, aumentando a resistência e diminuindo a intensidade das correntes de Foucault induzidas. Em vários tipos de equipamentos elétricos com partes móveis, as correntes de Foucault constituem um fator de perda de potência, de forma que se procura minimizá-las utilizando artifícios análogos aos da introdução de fendas.

O disco e o suporte estão sendo construídos com auxílio de técnicos da oficina mecânica do Departamento de Eletrônica Quântica. O aparato incluindo os ímãs com os pêndulos já existe no laboratório de ensino de física básica e foi emprestado para a realização de experimentos preliminares (veja figura 3).



Figura 3: Aparato para a realização das montagens para verificar as correntes de Foucault.

Estão sendo realizados experimentos colocando-se uma espira junto ao pêndulo e medindo-se a

corrente induzida através de um multímetro, com o objetivo de mostrar, não apenas com um efeito, que é a freagem do disco ou do pêndulo, mas também com uma medida. É importante ressaltar que não se tem objetivo de fazer qualquer análise quantitativa, e sim, apenas demonstrar qualitativamente o surgimento das correntes.

## Referências

- [1] <http://www.feiradeciencias.com.br>
- [2] Halliday, D., Resnick, R., Walker, J., *Fundamentos de Física*, v.3, 6 ed., LTC, Rio de Janeiro, 2002;
- [3] Nussenzveig, H. M., *Curso de Física Básica*, v.3, 2 ed., Edgard Blucher, São Paulo, 1992;
- [4] Feynman, R. P., Leighton, R. B., Sands, M., *The Feynman Lectures on Physics: Mainly Electromagnetism and Matter*, v.2, Addison-Wesley Publishing Company, Massachusetts, 1977;
- [5] O'Handley, R. C., *Modern Magnetic Materials: Principles and Applications*, John Wiley and Sons, New York, 2000;
- [6] <http://www.ufsm.br/gef/>
- [7] <http://www.1911encyclopedia.org/>
- [8] <http://nobelprize.org/physics/laureates/1903/pierre-curie-bio.html>