



**Universidade Estadual de Campinas
UNICAMP**

Instituto de Física Gleb Wataghin

F 609A – Tópicos de Ensino de Física I (2º semestre – 2008)

Relatório Final II

TUBO DE INDUÇÃO – APRESENTANDO A LEI DE FARADAY



Aluna: Débora Princepe RA: 070601

Orientador: Prof. Dr. Jose Antonio Roversi

Coordenador: Prof. Dr. José J. Lunazzi

debpr@hotmail.com
roversi@ifi.unicamp.br

Relatório finalizado em 21 de Novembro de 2008

TUBO DE INDUÇÃO – APRESENTANDO A LEI DE FARADAY

Índice

<u>Resumo.....</u>	<u>3</u>
<u>Descrição.....</u>	<u>4</u>
<u>Esquema do experimento.....</u>	<u>4</u>
<u>Importância do trabalho.....</u>	<u>5</u>
<u>Resultados atingidos.....</u>	<u>6</u>
<u>Posição do orientador.....</u>	<u>10</u>
<u>Comentários do coordenador.....</u>	<u>10</u>
<u>APÊNDICE.....</u>	<u>11</u>

Resumo

A fim de desenvolver-se um projeto de um experimento didático na área de física, escolheu-se o tópico de indução eletromagnética, explorando os conceitos da lei de Faraday. A idéia do experimento consistiu inicialmente em um tubo com 5 bobinas com 1000 espiras cada uma, espaçadas por seu comprimento, às quais estão ligadas dois LEDs cada uma, um antiparalelo ao outro. Seria lançado um ímã pelo tubo, observando-se os LEDs acenderem, segundo os princípios da indução: quanto maior a velocidade, maior a variação do fluxo e, portanto, maior a corrente induzida e a intensidade da luz do LED, e um LED acende para a aproximação do ímã e o outro no afastamento.

Durante o desenvolvimento do projeto, algumas dificuldades foram encontradas, principalmente em relação ao número de espiras que seria necessário para criar uma corrente suficientemente forte para acender os LEDs e a necessidade de um ímã cujo campo magnético fosse relativamente alto, com o mesmo fim.

Fazendo uma bobina com 1000 espiras e um ímã razoavelmente forte, os LEDs não acenderam, mesmo lançando o ímã com velocidade inicial não nula e realizando o experimento no escuro. Ao realizar a medida da corrente, da ordem de $10 \mu\text{A}$, concluiu-se que ela não é suficiente para acender um LED, nem mesmo com uma intensidade baixa – essa corrente representa também que uma baixa tensão é produzida. Fez-se então a modificação do experimento: é observada diretamente em um medidor a passagem da corrente quando o ímã passa pela bobina; observa-se também que não há passagem de corrente para quando o ímã está em repouso. Ademais, pode-se discutir porque a corrente gerada é tão pequena, assim como as ordens de grandeza de correntes interfere no estudo do eletromagnetismo.

Uma variante do experimento, já realizada na disciplina de F 609 é o lançamento de um ímã em um tubo de cobre: devido à indução, o ímã é freado durante o percurso, chegando ao fim do tubo com uma velocidade menor do que a prevista pela equação de queda livre. Tomando por esse caminho, sabe-se que há dissipação de energia eletromagnética na desaceleração do ímã, o que também interfere no experimento, diminuindo a corrente gerada.

Palavras-chave: Indução eletromagnética, Lei de Faraday

Descrição

Dentro do conteúdo programático do Ensino Médio, um dos tópicos de maior dificuldade entre os alunos é o eletromagnetismo, tanto pela abstração necessária para se entender os conceitos, quanto pelo modo que é tratado nas salas de aulas – frequentemente focado na mera utilização de fórmulas, sem a abordagem conceitual nem aplicação prática. Dada a grande importância dessa área da física, a utilização de experimentos é recomendável ao ensino, pois se torna um atrativo aos alunos, despertando-lhes a curiosidade, ao mesmo tempo em que conceitos físicos não triviais são aprendidos.

O experimento proposto a seguir trata-se da Lei de Indução de Faraday, como uma demonstração desse fenômeno. Essencialmente, compõe-se de um tubo de PVC, que serve de base para cinco bobinas de espiras de cobre, apoiado longitudinalmente. As espiras devem estar conectadas a LEDs, que servirão como indicadores de corrente. Faz-se um ímã cair por dentro do tubo e, conseqüentemente, por dentro das espiras; o movimento relativo do ímã em relação às bobinas gera uma corrente induzida, o que faz acender os LEDs.

Originalmente, a idéia surgiu em realizar o experimento na direção horizontal, sendo necessário algum mecanismo para fazer o ímã se mover por dentro da bobina. Porém, durante a pesquisa realizada, encontrou-se em no site www.feiradeciencias.com.br a referência a essa experiência, realizada do modo como aqui se explica; optou-se por esse modo por ser de mais simples construção e, portanto, com maior facilidade de ser realizada nas escolas e com maior acesso dos alunos. Há referência também a um projeto semelhante já realizado em F 609, denominado “Queda de um ímã com velocidade v constante dentro de um cilindro condutor” (no site citado, essa experiência aparece como variante), em que o tubo era feito de material condutor, provocando correntes parasitas que exerciam forças de modo a anular o peso do ímã. Se comparados, o experimento aqui apresentado apresenta relativamente maior visualização do efeito desejado.

Esquema do experimento

Material:

- 1 tubo de PVC, com dimensões convenientes – cerca de 1,5m de comprimento, diâmetro de aproximadamente 3 cm
- 5 bobinas com núcleo de ar com 1000 espiras de fio de cobre esmaltado #28 ou #30
- 5 LEDs de cor vermelha e 5 LEDs de cor amarela
- 1 ímã – comprimento de cerca de 3 cm, largura deve ser inferior ao diâmetro do tubo.

Procedimento experimental:

O suporte do experimento é tubo de PVC, daí a serem escolhidas dimensões adequadas; aqui se propõe o comprimento de 1,5 m e o diâmetro de cerca de 3 cm; essas dimensões podem ser alteradas durante o desenvolvimento a fim de melhorar as condições do experimento. Ao redor do tubo serão fixadas as cinco bobinas igualmente espaçadas. Se necessário, as bobinas poderão ser confeccionadas pela própria aluna a partir de fio isolado. Serão ligados aos terminais de cada bobina 2 LEDs, um vermelho e um amarelo, de modo que o LED amarelo acenda quando a corrente tiver sentido para baixo e o LED vermelho acenda – ver esquema ilustrado na Figura 1. O objetivo desse tipo de ligação é que apenas um LED acenda para um dado sentido da corrente elétrica na bobina, ou seja, será um indicador do sentido da corrente e, portanto, da variação do fluxo – decorre diretamente da lei de indução de Faraday. Com o tubo na vertical, o ímã será abandonado em queda livre da extremidade superior. Conforme o ímã cai, passando pelos interiores das bobinas, deverão ser observadas 'piscadas' dadas pelos LEDs vermelhos e amarelos de cada bobina. Para maior evidência desse efeito, é interessante

que o ímã tenha um campo magnético apropriado, assim como suas dimensões – fatores que poderão ser melhorados durante o desenvolvimento.

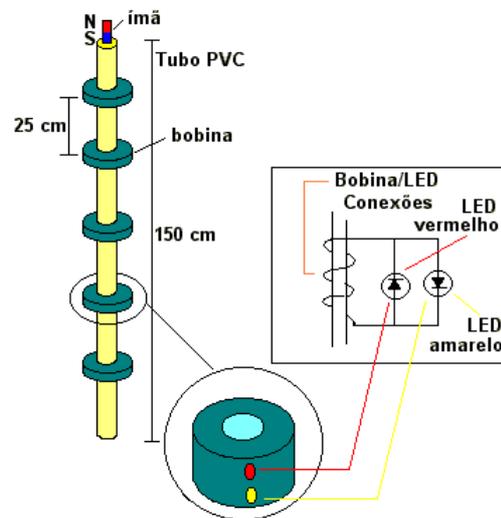


Figura 1. Esquema do experimento

Importância do trabalho

O projeto se aplica primeiramente a alunos de Ensino Médio, cujo programa de física inclui o eletromagnetismo no terceiro ano. Todavia, com o objetivo da demonstração do fenômeno físico e para aprendizado inicial dos conceitos de indução, pode-se pensar na aplicação também para salas de oitava série – nono ano do Ensino Fundamental, que tem parte das aulas de ciências cujo conteúdo é introdução à física.

Uma vantagem do experimento, como já dito, é a visualização de um fenômeno eletromagnético, a indução. A aprendizagem de conceitos relacionados a esse assunto exige sempre abstração, sendo necessário que o professor saiba despertar a curiosidade e interesse do aluno. Um experimento como esse é interessante aos olhos de um aluno e demonstra claramente o que se quer ensinar; se o objetivo é mostrar a indução e a Lei de Faraday, o experimento possui vários recursos que auxiliam na aprendizagem.

Resultados atingidos

Resultados até a entrega do relatório parcial

Conforme foi apresentado no projeto inicial, as bobinas foram feitas pela aluna, a partir de fio de cobre #28 esmaltado. Para um primeiro teste, com a finalidade de verificar a funcionalidade do experimento, foi utilizado um tubo de 5 cm de diâmetro (ao invés de 3 cm, como sugerido no projeto) e foi feita uma espira somente (a critério de teste), com cerca de 130 espiras; o ímã foi retirado de um HD sucateado, com as dimensões sugeridas. A foto da montagem encontra-se ilustrada na Figura 2. Com essa montagem, exatamente como ilustrada na Figura 2 (bobina na extremidade inferior do tubo, onde o ímã apresenta maior velocidade), não se conseguiu ter corrente suficiente para acender os LEDs. Algumas alterações foram pensadas: trocar o tubo por um de menor diâmetro (3 cm), aumentar o número de espiras – cerca de 150 – e possivelmente conseguir um ímã mais forte. Foram feitas essas alterações, obtendo-se uma segunda montagem, apresentada na Figura 3. Com essa montagem, ainda não se conseguiu a corrente necessária para acender os LEDs, ou seja, o experimento não funcionou.



Figura 2. Primeira montagem – teste

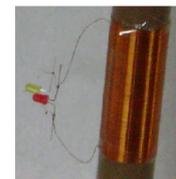
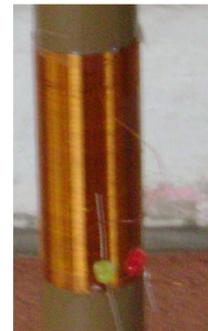


Figura 3. Segunda montagem

Alguns ajustes que foram sugeridos ao experimento: conseguir bobinas com um número maior de espiras, consultando a oficina de eletrônica do Instituto de Física; fazer a solda dos LEDs no fio de cobre, para que o contato fosse melhorado; observar o experimento no escuro, caso a intensidade da luz fosse muito baixa; lançar o ímã com a maior velocidade inicial possível. Se ainda assim não fosse observada emissão de luz, seria medida a tensão diretamente com um osciloscópio.

Resultados finais

Após a realização da segunda montagem, o primeiro ajuste feito foi em relação ao número de bobinas: foi feita uma bobina de 1000 espiras, sendo a montagem representada na Figura 4 – a bobina superior é a primeira, de 130 espiras, e a inferior é de 1000 espiras. Para o teste, os contatos foram feitos com solda, conforme pode ser observado na foto. Feito isso, o experimento ainda não funcionou, mesmo lançando o ímã com velocidade inicial a maior

possível, com a espira na posição de maior velocidade do ímã (embaixo, como na foto) e observando no escuro. Dada essa dificuldade, utilizando um multímetro, foi feita a medida direta da corrente gerada: um pico é observado, da ordem de $10 \mu\text{A}$. Com esse valor de corrente, que é decorrente de uma baixa força eletromotriz induzida, o LED não atinge a tensão mínima para poder emitir luz.



Figura 4. Terceira montagem - 1000 espiras

Dado esse impedimento, resolveu-se, com consentimento do orientador e do coordenador, utilizar-se o medidor (galvanômetro ou multímetro) para indicar a passagem da corrente. Utilizando um fio amarrado ao ímã, o experimento consiste então em mostrar que o ímã em repouso não provoca corrente alguma e em movimento há a indicação de corrente (Figura 5). Alguns pontos a serem discutidos com o experimento, para sua aplicação:

- Por que só há corrente para o ímã em movimento, e não no repouso?
- Por que a corrente é tão baixa?
- Por que a indicação é tão rápida, a oscilação da agulha é instantânea?
- A agulha oscila indicando corrente negativa e positiva; qual é o significado disso e por que isso ocorre?

Conforme foi proposto na primeira versão do relatório final, levou-se o experimento a uma escola de Ensino Médio, e algumas observações são apontadas a seguir.

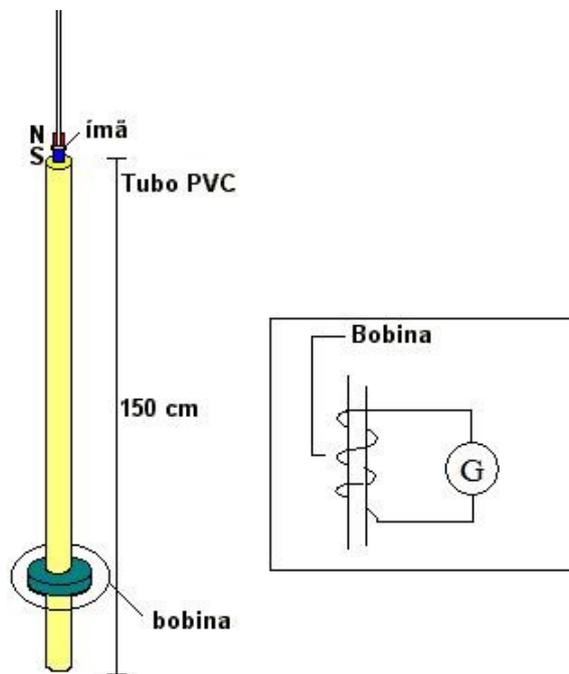


Figura 5. Montagem final

Apresentação do trabalho

No dia 11 de novembro de 2008, um dia antes da apresentação do painel (conforme a ementa), o experimento foi levado a uma escola de Ensino Médio da cidade de Itatiba – “Colégio Objetivo”, para ser apresentado aos alunos. A escola disponibilizou o horário da tarde, destinado aos plantões de dúvida de física, para a apresentação.



Figura 6. Apresentação no colégio

Algumas observações relevantes: os alunos de cursinho preparatório para vestibular mostraram certo conhecimento do fenômeno e esperavam o que podia acontecer; já os alunos de Ensino Médio se mostraram curiosos (muitos perguntavam “O que é isso? Pra que serve?”)

e até mesmo surpresos com o fenômeno. Alguns tiveram interesse em saber aplicações, mas a maioria já achou só o experimento interessante. Mesmo utilizando um instrumento de medida não tão comum do cotidiano deles, o multímetro, eles pareceram compreender bem o que era proposto com o experimento.

O saldo positivo da apresentação no colégio se deu com o cumprimento dos objetivos propostos inicialmente: aguçar a curiosidade dos alunos para um fenômeno tão importante, desmistificando a visão de eletromagnetismo que é dada no Ensino Médio. Talvez a maioria dos alunos não saiba dizer o que é campo ou fluxo ou que a variação de fluxo gera campo magnético; mas o que foi aprendido é o que é mostrado: um ímã em movimento dentro de uma bobina gera corrente.

Última modificação

Durante a apresentação do painel, surgiu uma sugestão para melhor apresentação do projeto, retomando a idéia inicial: deixar um potencial ligado aos LEDs, para que eles brilhassem com baixa intensidade, assim, com a passagem do ímã e conseqüente surgimento de corrente induzida, deveria ser observada uma maior intensidade na luz do LED. Foi feita essa montagem, ligando uma pilha AA (1,5 V) em série com a bobina e novamente foi feito um arranjo com LEDs. Com tal voltagem a pilha acende fracamente (como já visto no relatório parcial); como a corrente é muito baixa a variação de intensidade da luz também é, tornando-se imperceptível. Isso significa que a sugestão dada também não solucionou o problema, sendo o experimento dado por finalizado como foi apresentado: a bobina ligada a algum medidor (galvanômetro – o mais propício – ou multímetro de grande sensibilidade).

Trabalhos anteriores

Em anexo, como referência, se encontra o trabalho já feito na disciplina: a demonstração da desaceleração de um ímã que cai por um tubo condutor devido à força magnética gerada pelo campo induzido. Esse é um fator que também interfere nesse experimento: há a desaceleração do ímã, ou seja, um gasto de energia, o que faz com que a corrente seja inferior àquela sem a ação da força magnética (quanto maior a velocidade relativa entre o ímã e o indutor, maior a corrente gerada), o que cria um obstáculo ao acendimento dos LEDs. O cálculo da energia gasta é feita por uma fórmula, apresentada em um artigo, o qual é anexado como referência. Não foi feito esse cálculo para esse experimento, pelo desconhecimento de algumas variáveis, tal como o valor do campo do ímã, e mesmo porque não está no contexto do experimento, apenas vale ressaltar o efeito qualitativo.

Conclusão

Pode-se concluir que, embora não tenha se conseguido o funcionamento do experimento tal como ele foi proposto, houve aproveitamento da montagem e, quanto aos objetivos mudados, a divergência não foi tão grande. Porém, um fator que se perdeu, e considera-se ter importância, é o efeito visual: o aluno observar o movimento do ímã gerar corrente para acender o LED – é uma visualização mais simples, direta e compreensível ao aluno do que a observação em um instrumento de medida, que não faz parte do seu dia-a-dia – mesmo com tal empecilho, a apresentação feita em escola pode ser considerada bem sucedida. Fica então em aberto a possibilidade de surgirem idéias que possam ter êxito no objetivo inicial: mostrar a Lei de Indução de Faraday de um modo simples e conceitual.

Posição do orientador

Meu orientador, o Prof. Dr. Jose Antonio Roversi, concorda com o expressado neste relatório final e realizou os seguintes comentários:

A Débora explorou neste experimento um conceito bastante importante em todo o eletromagnetismo e muito sutil. Explorou uma versão dos experimentos do próprio Faraday. O fato de ter apenas um sucesso relativo vem de encontro à intensidade de variação de fluxo necessária para obter uma força eletromotriz induzida, f_{em} , e portanto a corrente e tensão (3V no vermelho) necessárias para acender o LED. Porém isto não desmerece em nada o trabalho da Débora já que várias outras possibilidades de exploração do fenômeno pode igualmente ser atingida dentro das salas de aulas, como a própria montagem dela está sugerindo. Um trabalho muito bom.

Comentários do coordenador

Projeto:

O projeto será aprovado quando o recoloque com:

- *Retirada do comentário em Exeções, devia ter colocado "Nao ha" e colocou "Todo o material", entendo que errou, que do material voces dispoem.*
- *Referencia ao experimento mais próximo desse realizado em F 609 ou F 809: descubra lendo os RFs de eletromagnetismo.*

Relatório Parcial:

Aprovado com as seguintes objeções:

- *Falta citar o trabalho mais semelhante feito na disciplina.*
- *Desse trabalho, a referencia que indica a perda de velocidade do imã em função da energia elétrica que fornece.*
- *Para conseguir detectar inicialmente o efeito, tem as seguintes indicações:*
 - 1) *Observar no escuro.*
 - 2) *Lançar o imã com velocidade inicial a maior possível, se nada vê, medir a tensão com um osciloscópio.*

APÊNDICE

Referências

A seguir, encontram-se referências para o experimento, a fim de que seja explorado em diversos níveis. Para um nível básico – Ensino Fundamental –, o experimento é puramente ilustrativo; seria interessante então, nesse caso, trabalhar-se a idéia do trabalho do cientista, apresentado um resumo da historia de Faraday e mostrando aplicações – se possível, próximas do cotidiano do aluno – de seu trabalho científico.

Já em Ensino Médio, o tópico de eletromagnetismo faz parte do conteúdo, quase sempre apresentado no 3º ano. É interessante mostrar o fenômeno, comentando alguns conceitos de difícil entendimento do aluno, tais como campo (elétrico e magnético), corrente, a própria indução, sem citar ou apenas apresentar a lei de Faraday (fórmula matemática) – assim, foge-se da tradicional aula de física com fórmulas e aplicação matemática, muitas vezes desacompanhada dos conceitos físicos.

Em graduação, a abordagem já se caracteriza muito mais profunda, sendo conveniente a abordagem matemática do fenômeno; porém, a aplicação do experimento é também muito aproveitável, mesmo sem essa abordagem, pela visualização do fenômeno estudado. Para a abordagem mais profunda, é apresentado um artigo como referência onde é calculada a velocidade terminal de um ímã que cai por um tubo condutor, sendo desacelerado pela força magnética advinda do campo induzido; esse experimento, citado no relatório, foi realizado por um aluno dessa disciplina, também sendo referência – ambos os arquivos estão anexados.

Também está anexada a referência ao site de onde a idéia reformulada do experimento foi retirada. Todas as pesquisas foram feitas com as seguintes palavras-chave: Faraday, indução eletromagnética, lei de Faraday.

- Site www.feiradeciencias.com.br, onde se encontra a descrição do experimento:

Tubo de Indução (Lei de Faraday)

Prof. Luiz Ferraz Netto
leobarretos@uol.com.br

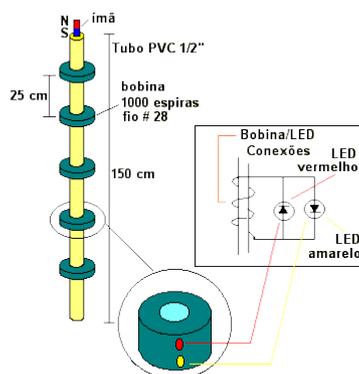
Objetivo

Destacar o fenômeno da indução eletromagnética e a Lei de Faraday.

Material

tubo de PVC de diâmetro 1/2" e comprimento 1,5 m;
5 bobinas com núcleo de ar com 1000 espiras de fio de cobre esmaltado #28;
5 LEDs vermelho e 5 LEDs amarelos;
1 ímã cilíndrico de comprimento maior que 3 cm e diâmetro menor que 1/2"

Montagem



O tubo de indução consiste num tubo de PVC de 1/2" de diâmetro e 1,5 m de comprimento, ao redor do qual são fixadas (coladas) 5 bobinas de fio isolado. Cada bobina tem cerca de 1000 espiras de fio de cobre esmaltado # 28 ou # 30. Ligado aos terminais de cada bobina temos 2 LEDs (diodo emissor de luz), um vermelho e outro amarelo, conectados como se ilustra acima (em paralelo e em oposição). Com esse tipo de ligação dos LEDs, apenas um deles acenderá para um dado sentido da corrente elétrica na bobina.

Funcionamento

Com o tubo na vertical (depois, para minimizar a velocidade de queda do ímã, poderá ser colocado com certa inclinação) abandone o ímã pela extremidade superior. Conforme o ímã cai, passando pelos interiores das bobinas, você deverá observar as 'piscadas' dadas pelos LEDs vermelhos e amarelos de cada bobina. Quanto melhor for o ímã, mais evidente será o fenômeno.

Resumo teórico



Conforme o ímã desliza tubo abaixo seu campo magnético penetra na bobina, por cima, e sai por baixo. Para o professor, recomendamos que desenhe uma única espira fechada, na horizontal, e o ímã reto vertical em três posições: antes de entrar na espira; simétrico em relação à espira e depois de sair da espira --- como se ilustra ao lado ---; em cada caso examinar o comportamento da corrente induzida na espira, durante o movimento do ímã.

Um gráfico dessa intensidade de corrente induzida, função da posição do ímã, será bastante ilustrativo. Nesse gráfico, destacar como o aumento da velocidade de queda do ímã afeta a f.e.m. induzida na espira.

Durante a aproximação ocorrerá uma variação do fluxo de indução concatenado com a bobina, dando nascimento a uma d.d.p. induzida nos terminais dessa bobina, com uma dada polaridade. Essa d.d.p. é aplicada ao circuito externo representado pelos LEDs em paralelo e em oposição e fará circular uma corrente elétrica induzida apenas naquele LED diretamente polarizado, o qual acenderá. Quando o centro do ímã estiver passando pelo centro da bobina o fluxo de indução total é nulo e não haverá d.d.p. induzida. Durante o afastamento do ímã ocorrerá nova variação de fluxo, agora em sentido inverso, dando, portanto, nascimento a uma nova d.d.p. de polaridade invertida em relação à anterior. Uma corrente de sentido oposto percorrerá o circuito e apenas o outro LED (agora diretamente polarizado) acenderá.

A d.d.p. induzida na bobina (em circuito aberto) pela variação do fluxo no decorrer do tempo é dada pela Lei de Faraday da Indução:

$$\varepsilon = - N(d\phi/dt)$$

onde ε é a força eletromotriz (d.d.p. induzida nas partes do enrolamento), N é o número de espiras da bobina, $d\phi$ é a variação do fluxo de indução e dt é o breve intervalo de tempo no qual ocorre a variação $d\phi$.

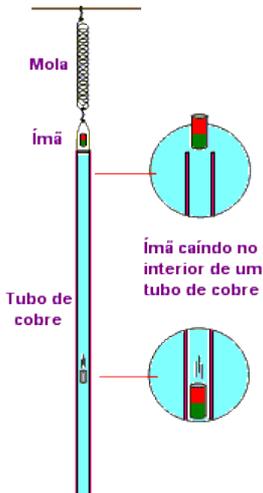
O fluxo útil aumenta conforme o ímã se aproxima da bobina e, após passar pelo centro da bobina, diminui. A d.d.p. induzida nos terminais da bobina é razoavelmente 'senoidal' e essa é a causa primeira do porque primeiro um LED acende e depois o outro. Com um ímã suficientemente longo (recomendamos um ímã cilíndrico de comprimento maior que 3 cm) a mudança de polaridade da bobina é relativamente lenta e isso permite ao olho perceber facilmente que os dois LEDs piscam em seqüência (se os ímãs forem pequenos os dois 'flashes' parecerão simultâneos).

Sabemos que durante a queda do ímã, sua velocidade aumenta e, então, o intervalo de tempo de passagem do ímã pelo interior de uma bobina diminuirá. Quanto menor for esse intervalo de tempo maior será o fluxo de indução, a d.d.p. induzida e, conseqüentemente, a intensidade

de corrente em cada LED. Os brilhos dos LEDs (potência) nas bobinas mais baixas serão mais intensos.

Variante do experimento

A ficha a seguir descreve uma variante simples para a constatação das correntes parasitas:

CORRENTES PARASITAS		5K20.25
Ímã cai lentamente no interior de um tubo de cobre (ou alumínio), na vertical.		
	<p>O experimento requer, além de um tubo de cobre ou alumínio (1,5 m) e uma mola, dois cilindros de mesmas dimensões; um deles é apenas um cilindro de aço, o outro é um ímã permanente. Quando o cilindro de aço é abandonado no interior do tubo vertical, ele 'gasta' cerca de meio segundo para sair do tubo (que está suspenso na extremidade de uma mola).</p> <p>O ímã, ao ser solto nas mesmas condições, leva alguns segundos para sair do tubo.</p> <p>Devido à variação do fluxo magnético durante a queda do ímã, é induzida uma corrente elétrica no tubo e essa, por sua vez, produz um campo magnético no sentido oposto ao do ímã. Assim, o tubo exerce uma força sobre o ímã, opondo-se ao seu movimento, fazendo-o cair mais lentamente que o cilindro de aço.</p> <p>Assim como o tubo exerce força no ímã, o ímã exercerá força contrária no tubo (ação e reação) e o efeito dessa pode ser facilmente observado pela deflexão extra que se origina na mola que sustenta o tubo.</p>	

- Site http://pt.wikipedia.org/wiki/Michael_Faraday



Michael Faraday (Newington, Surrey, 22 de setembro de 1791 — Hampton Court, 25 de agosto de 1867) foi um físico e químico britânico, sendo considerado um dos cientistas mais influentes de todos os tempos. Suas contribuições mais importantes e seus trabalhos mais conhecidos foram nos intimamente conectados fenômenos da eletricidade e magnetismo, mas ele também fez contribuições muito importantes em química.

Faraday foi principalmente um experimentalista, de fato, ele foi descrito como o "melhor experimentalista na história da ciência", embora não conhecesse matemática avançada, como cálculo. Tanto suas contribuições para a ciência, e o impacto delas no mundo, são certamente grandes: suas descobertas científicas cobrem áreas significativas das modernas física e química, e a tecnologia desenvolvida baseada em seu trabalho está ainda mais presente. Suas descobertas em eletromagnetismo deixaram a base para os trabalhos de engenharia no fim do século XIX por pessoas como Edison, Siemens, Tesla e Westinghouse, que tornaram possível a eletrificação das sociedades industrializadas, e seus trabalhos em eletroquímica são agora amplamente usados em química industrial.

Na física, foi um dos primeiros a estudar as conexões entre eletricidade e magnetismo. Em 1821, logo após Oersted ser o primeiro a descobrir que a eletricidade e o magnetismo eram associados entre si, Faraday publicou seu trabalho que chamou de "rotação eletromagnética" (princípio por trás do funcionamento do motor elétrico). Em 1831, Faraday descobriu a indução eletromagnética, o princípio por trás do gerador elétrico e do transformador elétrico. Suas idéias sobre os campos elétrico e magnético, e a natureza dos campos em geral, inspira-

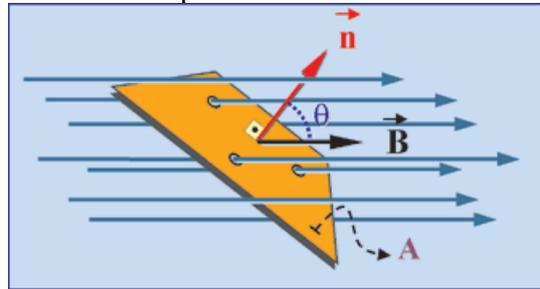
ram trabalhos posteriores nessa área (como as equações de Maxwell), e campos do tipo que ele fitou são conceitos-chave da física atual.

Na química, descobriu o benzeno, produziu os primeiros cloretos de carbono conhecidos, ajudou a estender as fundações da metalurgia e metalografia, além de ter tido sucesso em liqüefazer gases nunca antes liquefeitos (dióxido de carbono, cloro, entre outros), tornando possível métodos de refrigeração que foram muito usados. Talvez sua maior contribuição foi em virtualmente fundar a eletroquímica, e introduzir termos como eletrólito, ânodo, catodo, eletrodo, e íon.

- Site <http://www.cocemsuacasa.com.br/ebook/pages/9737.htm>

1. Fluxo Magnético

A figura representa uma superfície plana imersa num campo magnético. Nela observamos que três linhas de indução atravessam a superfície e outras quatro não, dessa forma dizemos que há um *fluxo magnético* através dessa superfície.



Esse fluxo é tanto maior quanto mais linhas de indução estiverem atravessando a superfície.

Para tanto, podemos:

- aumentar a intensidade B do campo de indução magnética, o que condiz com uma diminuição do espaço entre as linhas de indução, ou seja, estando mais próximas entre si, maior o número de linhas que atravessam a superfície;
- aumentar a área A da superfície, o que aumenta o número de linhas de indução que a atravessam;
- girar a superfície, variando o ângulo θ entre o vetor \vec{B} e um vetor \vec{n} (sempre perpendicular à superfície) que serve como orientador da posição dela em relação ao vetor \vec{B} .

A expressão que relaciona essas três variáveis e que permite o cálculo do fluxo magnético é:

$$\phi = B \cdot A \cdot \cos \theta$$

Sua unidade no SI é o weber (Wb).

$1 \text{ Wb} = 1 \text{ T} \cdot 1 \text{ m}^2$ e, dessa forma, temos $1 \text{ T} = 1 \text{ Wb/m}^2$ e isto significa que o campo de indução magnética pode ser medido também em weber por metro quadrado.

Para um campo magnético uniforme e uma superfície de área constante, vamos estudar dois casos extremos, decorrentes da variação do ângulo θ .

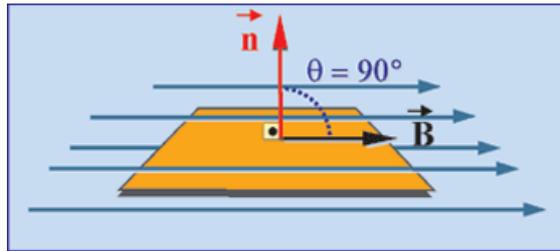
1º caso: Fluxo magnético nulo

Quando o ângulo θ for igual a 90° , temos:

$\phi = B \cdot A \cdot \cos 90^\circ$ e, como $\cos 90^\circ = 0$, então o fluxo é nulo.

$$\phi_{\text{NULO}} = 0$$

Observe na figura abaixo que nenhuma linha de indução magnética atravessa a superfície.



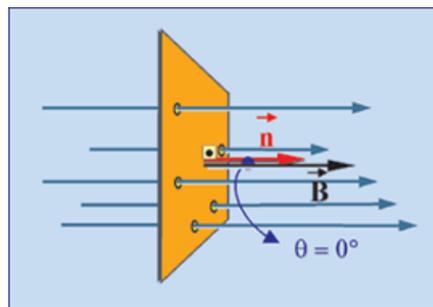
2º caso: Fluxo magnético máximo

Quando o ângulo θ for igual a 0° , temos:

$\phi = B \cdot A \cdot \cos 0^\circ$ e, como $\cos 0^\circ = 1$, então o fluxo é máximo.

$$\phi_{MÁX} = B \cdot A$$

Observe na figura abaixo que o número de linhas de indução magnética que atravessam a superfície é máximo.

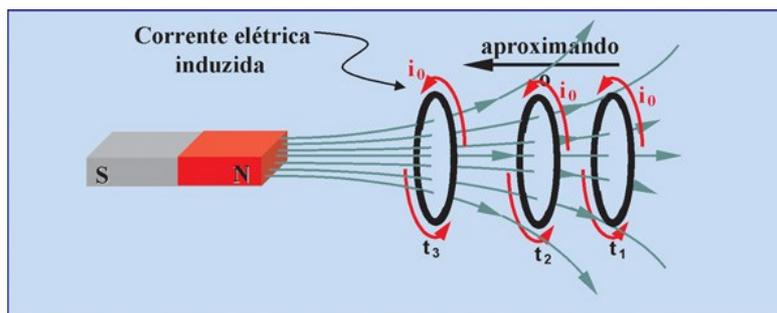


2. Indução Eletromagnética

Com base no efeito Oersted (1820), em que uma corrente elétrica gera campo de indução magnética, alguns físicos do início do século XIX começaram a pesquisar a possibilidade de que o inverso ocorresse, ou seja, de que um campo magnético podia ocasionar corrente elétrica.

A questão era saber como isso poderia ser feito e foi Faraday que, em 1831, descobriu como fazê-lo, ao perceber que o segredo estava na variação do fluxo magnético através de uma superfície condutora.

Vejam os seguintes experimentos realizados com uma espira circular que se aproxima de um ímã.



Temos três linhas de indução atravessando a espira no instante t_1 , cinco no instante t_2 e sete no instante t_3 .

Verificamos, então, que o número de linhas de indução que atravessam a espira está variando com o tempo, ou seja, está ocorrendo uma variação de fluxo magnético com o tempo e é justamente esta variação que acarreta o surgimento na espira de uma corrente elétrica denominada corrente induzida.



2.1. Lei de Faraday

Essa corrente induzida é decorrente de uma força eletromotriz induzida na espira que pode ser expressa como sendo a rapidez com que acontece essa variação de fluxo.

A lei que descreve essa rapidez de variação, proposta por Faraday, é:

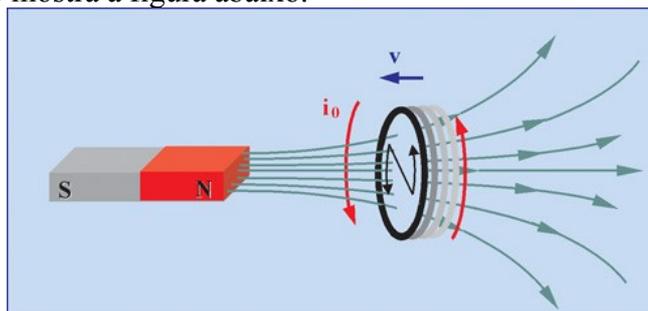
A força eletromotriz média induzida (ε) é diretamente proporcional à variação de fluxo magnético ($\Delta\phi$) através de uma espira e inversamente proporcional ao intervalo de tempo (Δt) em que isso acontece.

$$\varepsilon = - \frac{\Delta\phi}{\Delta t}$$

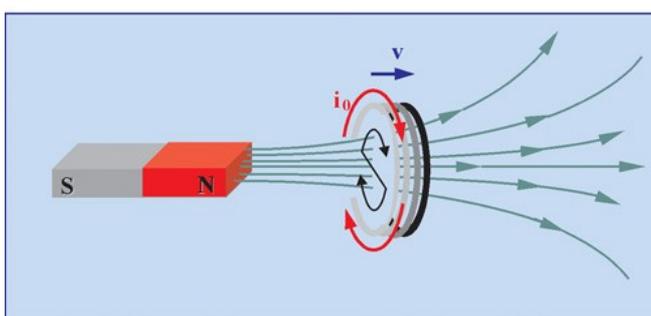
Se verificarmos as unidades dessas grandezas no Sistema Internacional de Unidades, podemos escrever: volt = Weber/segundo, ou seja, $1V = 1Wb/1s$.

2.2. Lei de Lenz

Em 1834, o físico russo Heinrich Friedrich Emil Lenz, baseando-se em experimentos de Faraday e após tê-los repetido, completou-os com uma lei que leva o seu nome e que justifica o sinal de menos na expressão da lei de Faraday. Lenz percebeu que, ao aproximar a espira do pólo norte do ímã, surge na mesma uma corrente elétrica contínua, no sentido anti-horário, de modo a gerar um campo magnético cujo pólo norte está voltado para o pólo norte do ímã em forma de barra, como mostra a figura abaixo.



Se agora afastarmos a espira, a corrente elétrica induzida inverte de sentido, passando a ser no sentido horário, ocasionando um campo magnético cujo pólo sul agora está voltado para o pólo norte do ímã.



A corrente elétrica induzida num circuito gera um campo magnético que se opõe à variação do fluxo magnético que induz essa corrente.

- Site <http://educacao.uol.com.br/fisica/ult1700u15.jhtm>

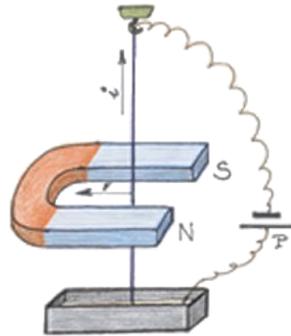
Eletromagnetismo
Ímãs e indução eletromagnética

*Carlos Roberto de Lana

Especial para a Página 3 Pedagogia & Comunicação

Faraday descobriu que uma corrente elétrica era gerada ao posicionar um ímã no interior de uma bobina de fio condutor. Deduziu que se movesse a bobina em relação ao ímã obteriamos uma corrente elétrica contínua, efeito que após comprovado recebeu o nome de indução eletromagnética. A indução eletromagnética é o princípio básico de funcionamento dos geradores e motores elétricos, sendo estes dois equipamentos iguais na sua concepção e diferentes apenas na sua utilização. No gerador elétrico, a movimentação de uma bobina em relação a um ímã produz uma corrente elétrica, enquanto no motor elétrico uma corrente elétrica produz a movimentação de uma bobina em relação ao ímã.

A seguir, a ilustração representa o efeito de indução eletromagnética, como pesquisado por Faraday:



A movimentação de um campo elétrico próximo a uma bobina produz a corrente elétrica i

O princípio da indução eletromagnética é também a base de funcionamento dos eletroímãs, equipamentos que geram campos magnéticos apenas, enquanto uma corrente elétrica produz o efeito de indução. Uma vez desligados perdem suas propriedades, ao contrário dos ímãs permanentes.

Hoje, as leis do eletromagnetismo fundamentam boa parte da nossa tecnologia mecânica e eletroeletrônica. Os campos magnéticos e suas interações elétricas fazem funcionar desde um secador de cabelos até os complexos sistemas de telecomunicações, desde os poderosos geradores elétricos das usinas nucleares até os minúsculos componentes utilizados nos circuitos eletrônicos. Mages, o lendário pastor grego, ficaria muito impressionado com o que se descobriu fazer possível com os poderes da pedra que encontrou por acaso.

- Site <http://www.colegiosaofrancisco.com.br/alfa/eletricidade-e-magnetismo/lei-de-faraday.php>

Faraday, baseando-se nos trabalhos de Oersted (1777-1851) e Ampère, em meados de 1831, começou a investigar o efeito inverso do fenômeno por eles estudado, onde campos magnéticos produziam correntes elétricas em circuitos. Faraday descobriu que um campo magnético estacionário próximo a uma bobina, também estacionária e ligada a um galvanômetro, não acusa a passagem de corrente elétrica. Observou, porém, que uma corrente elétrica temporária era registrada no galvanômetro quando o campo magnético sofria uma variação. Este efeito de produção de uma corrente em um circuito, causado pela presença de um campo magnético, é chamado de indução eletromagnética e a corrente elétrica que aparece é denominada de corrente induzida.

O fenômeno de indução eletromagnética está ilustrado na simulação abaixo. Existem vários modos de se obterem correntes induzidas em um circuito, os quais enumeramos a seguir:

- O circuito pode ser rígido e, no entanto, pode mover-se como um todo em relação a um campo magnético, de modo que o fluxo magnético através da área do circuito varia no decorrer do tempo.

- Sendo o campo B estacionário, o circuito pode ser deformável de tal modo que o fluxo de B através do circuito varie no tempo.

- O circuito pode ser estacionário e indeformável, mas o campo magnético B, dirigido para a superfície é variável no tempo.

Em resumo, em todos os três experimentos, verificamos que o ponto chave da questão está na variação do fluxo magnético com o tempo. Isto se $d\Phi_B / dt$ é diferente de zero, então uma corrente elétrica será induzida no circuito. Estes resultados experimentais são conhecidos como lei de Faraday, a qual pode ser enunciada da seguinte forma: a força eletromotriz induzida (fem) em um circuito fechado é determinada pela taxa de variação do fluxo magnético que atravessa o circuito. Esta lei é representada matematicamente pela equação:

$$\varepsilon = - \frac{\Delta\phi_B}{\Delta t}$$

onde ε é a força eletromotriz induzida (fem) e ϕ_B é fluxo magnético dado por:

$$\Delta\phi_B = \vec{B} \cdot \Delta\vec{S}$$

sendo S a superfície por onde flui o campo magnético. Sabendo que a força eletromotriz pode ser expressa em função do campo elétrico temos que:

$$\varepsilon = \vec{E} \cdot d\vec{l} = - \frac{\Delta\phi_B}{\Delta t} = - \frac{\Delta(\vec{B} \cdot \Delta\vec{S})}{\Delta t}$$

O sinal negativo que aparece na equação acima lembra-nos em qual direção a fem induzida age. O experimento mostra que a fem induzida produz uma corrente cujo sentido cria campo um campo magnético cujo sentido se opõe a variação do fluxo magnético original. Este fenômeno é conhecido como lei de Lenz e justifica o sinal negativo na equação. A lei de Lenz é a garantia de que a energia do sistema se conserva. Isto significa que a direção da corrente induzida tem que ser tal que se oponha as mudanças ocorridas no sistema. Caso contrário, a lei de conservação de energia seria violada.

- **Relatório final do projeto apresentado pelo aluno Sandinei Ugo da Silva Santos, orientado pelo Prof. Dr. Mário Noboru Tamashiro, para essa disciplina: “Queda de um ímã de neodímio num cilindro de cobre”. Disponível em www.ifi.unicamp.br/vie.**

Arquivo anexo em pdf.

- **Y. Levin, F.L. da Silveira and F.B. Rizzato; “Electromagnetic braking: A simple quantitative model”. Am. J. Phys; 74(9): 815-817 (2006). Disponível em http://arxiv.org/PS_cache/physics/pdf/0603/0603270v2.pdf.**

Arquivo anexo em pdf.