

7 – A Energia Elétrica

Neste capítulo, veremos como podemos converter energia mecânica em elétrica. Essa forma de conversão está na essência da maior fonte de energia elétrica no Brasil, que são as usinas hidrelétricas. Nessas usinas, a energia de movimento da água é transformada em eletricidade. No caso da energia eólica, o movimento de massas de ar é transformado em eletricidade. Porém ainda mais relevante que isso, cerca de 80% da energia elétrica do mundo é produzida via turbinas a vapor que operam de acordo com o ciclo de Rankine, como vimos no Cap. 5, onde descrevemos em detalhe como a energia térmica pode ser convertida em mecânica. Resta-nos agora, como podemos converter energia mecânica em elétrica.

7.1 – Movimento mecânico e eletricidade

Há um experimento muito simples que pode ser realizado em sala de aula, ou até mesmo em casa, que ilustra de uma forma bastante fundamental a relação entre energia mecânica e a energia elétrica¹. Para realizar esse experimento, é preciso apenas de um tubo de material condutor e um ímã². A execução do experimento é simples: mantendo-se o tubo na vertical, deixar o ímã cair dentro dele. O resultado é fascinante: o ímã cai lentamente. Não à toa o termo “magnetismo” muitas vezes é associado ao “sobrenatural”. Ao observar o fenômeno, tem-se a impressão de que há alguma “magia antigravitacional” ocorrendo. Pois claramente a morosidade da queda não pode ser atribuída aos retardadores usuais, como a resistência ao ar ou o atrito com as paredes do tubo. Certamente, a queda do ímã dentro do tubo pouco se parece com uma queda-livre. Ao observar-se melhor, vê-se que o ímã se movimenta em velocidade constante dentro do tubo.

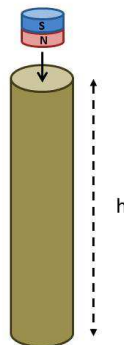


Fig. 7.1: Experimento de um tubo condutor e um ímã.

Analisando sob o ponto de vista da energia, vemos que no início do processo o ímã possui uma energia potencial gravitacional referente à altura h do tubo. Não fosse o tubo, o

¹ Recomenda-se a realização desse experimento no início da aula.

² Como qualquer experimento, os efeitos desejados serão mais evidentes com a escolha adequada do material. O tubo não pode ser de material ferromagnético, como a maior parte dos aços, pois o ímã simplesmente grudará no tubo. As dimensões do tubo e do ímã devem ser compatíveis, ou seja, evitar que o diâmetro do tubo seja muito maior do que o diâmetro do ímã. Além disso, quanto mais forte o ímã, mais evidentes os efeitos. Recomenda-se o uso dos chamados ímãs de neodímio (de composição NdFeB), também conhecidos como super-ímãs.

processo de queda livre ao longo de toda a distância h resultaria em uma grande energia cinética ao fim do percurso à custa da perda de energia potencial. Porém isso não ocorre com no tubo, uma vez que o ímã percorre o trajeto em uma velocidade baixa e constante. Ao final, sua energia cinética é pequena. O que ocorreu com toda a energia potencial gravitacional? Ela deve ter sido convertida em outra coisa.

Se realizarmos a experiência com um tubo com as mesmas dimensões, porém não condutor, de plástico por exemplo, o ímã seguiria em queda livre, praticamente da mesma forma, com ou sem o tubo. Isso indica que o tubo deve ser condutor, sugerindo que o fenômeno esteja relacionado com correntes elétricas. Porém, para aprofundarmos mais na explicação devemos entender um pouco mais sobre a relação entre os fenômenos magnéticos e elétricos.

7.2 – A relação entre magnetismo, eletricidade e força mecânica

Todos nós estamos bem familiarizados com a gravidade e aceitamos muito bem quando se fala em “campo gravitacional terrestre”. A ideia é que o espaço ao redor da Terra é influenciado por sua massa e qualquer outro corpo massivo sentirá uma força, mesmo não tendo contato direto com ela. Não havendo contato direto, entende-se que a influência da Terra em relação ao corpo ocorre devido à presença de um campo. Newton ficou famoso por descrever fenômenos aparentemente desconexos, como a queda de uma maçã e a órbita da Lua, sob o mesmo modelo da força da gravidade, embora ele pouco tenha avançado na questão da natureza desse campo. Na teoria de relatividade geral, Einstein propôs que o campo gravitacional é uma deformação do espaço-tempo. Mas essa não é a única forma de se compreender a natureza do campo gravitacional, pois existem também os defensores da teoria quântica da gravidade. Nesse ponto, não é necessário entender o que é “espaço-tempo” ou “teoria quântica da gravidade”, mas notar que existem diferentes formas de se modelar e descrever o campo gravitacional.

Ao tratarmos de fenômenos eletromagnéticos, fazemos uso de campos elétricos e magnéticos³. Da mesma forma que a gravidade, também estamos familiarizados com a atuação de campos elétricos, quando nossos pelos corporais ficam arrepiados na proximidade de objetos carregados eletricamente, ou de campos magnéticos, quando experimentamos a aproximação de dois ímãs que seguramos com as mãos.

Uma forma muito utilizada para representar campos se dá por meio de linhas de campo, também conhecidas como linhas de força. Linhas desse tipo são muito úteis quando se quer tornar mais intuitivo a compreensão de algo topológico. Em topografia por exemplo, existe um conceito que foi incorporado da matemática que se chama “curva de nível”, que nos ajuda a modelar com linhas a topografia de um relevo.

³ Muitas vezes lê-se o termo “campo eletromagnético”, mas o uso é mais coloquial, normalmente ao se descrever fenômenos eletromagnéticos como a luz. Formalmente, no eletromagnetismo os campos existem na forma de campo magnético e campo elétrico distintamente.

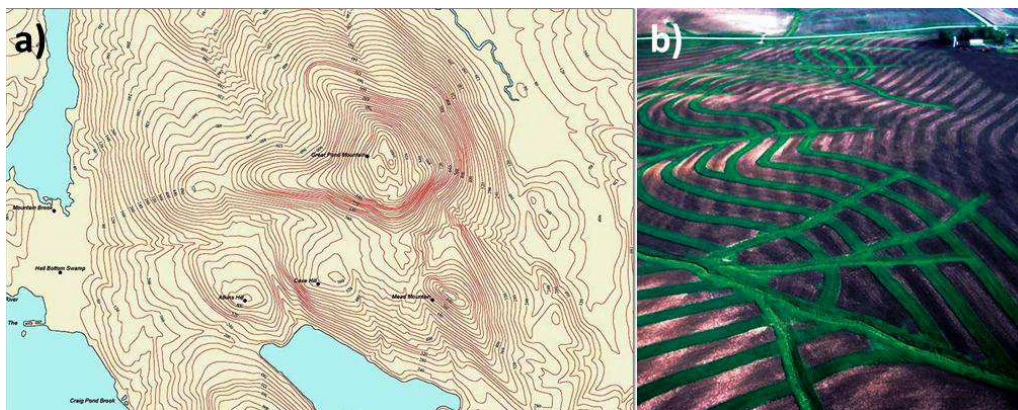


Fig. 7.2: **a)** Representação de relevo em termos de curvas de nível. **b)** Imagem de um terreno cultivado. Note que o processo de aragem deve seguir essencialmente paralelo às curvas de nível da topografia da área para evitar erosão do solo.

(a) By en:User:MapXpert - Public Domain, <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=3639059>

(b) Photo by Tim McCabe, USDA Natural Resources Conservation Service. (1999) Photo id: 137699 - Contour buffer strips in Tama County changed the row pattern. Public Domain.

A Fig. 7.2a mostra uma mapa de relevo em termos de suas curvas de nível. Cada linha corresponde a uma altitude determinada. Note que as linhas sempre formam caminhos fechados. Isso é bastante útil em termos de representação, pois podemos ter uma boa apreciação do terreno de forma quase imediata. Quando uma ampla região não possui linhas indica área plana enquanto que linhas bem juntas representam terrenos íngremes. Os menores caminhos fechados representam os picos do terreno. Curvas de nível são bastante úteis na agricultura, determinando a forma como a aragem é feita (Fig. 7.2b) de forma a evitar prejuízos com a erosão pluvial do solo. Curvas de nível isobáricas também são bastante utilizadas em mapas meteorológicos.

As linhas de força possuem função análoga. Elas também ajudam a indicar a distribuição de campo ao redor de um objeto, que nem sempre é simples, de forma a ser facilmente interpretada.

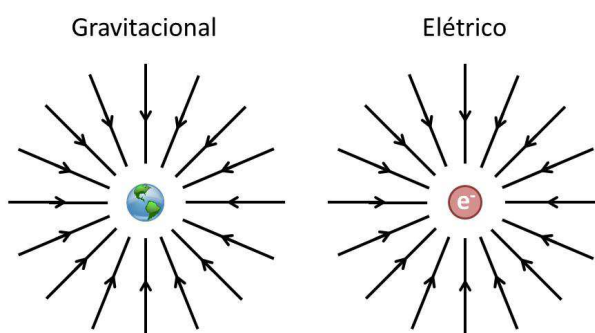


Fig 7.3: Representação por meio de linhas de força dos campos gravitacional, gerado pela Terra, e elétrico, gerado por um elétron.

A Fig. 7.3 mostra uma representação dos campos gravitacional, gerado pela Terra, e elétrico, gerado por um elétron por meio de linhas de força. Se uma massa (ou carga) se aproximar da Terra (ou elétron) as linhas de força indicam a direção em que a força de interação será exercida. Além disso, quanto mais próximas as linhas, umas das outras, mais forte é o campo. A Fig. 7.4 foi idealizada para representar bidimensionalmente a deformação

do espaço de acordo com a teoria da relatividade geral. Note novamente a importância das linhas para a percepção da deformação. Fazendo uma analogia aproximada, também podemos interpretar a imagem de outra forma, considerando que as linhas radiais representam bidimensionalmente as linhas de força do campo gravitacional terrestre. As linhas ortogonais às linhas de força (circulares) são curvas de nível do potencial gravitacional terrestre⁴. Isso mostra essencialmente a diferença entre linhas de força e curvas de nível: as forças são ortogonais a essas últimas⁵.

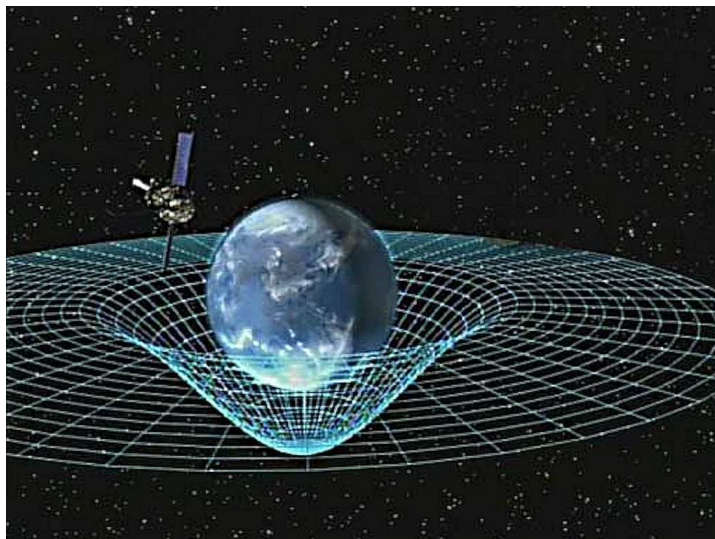


Fig. 7.4: Representação da deformação do espaço devido à presença da Terra.

By NASA - http://www.nasa.gov/mission_pages/gpb/gpb_012.html, Public Domain, <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=4072432>

No caso de uma massa ou carga isolada, a representação das linhas de força é bem simples. Mas essa representação pode ficar mais complexa para sistemas mais sofisticados. A Fig. 7.5 mostra as linhas de campo ao redor de quatro cargas, duas positivas e duas negativas, em um sistema conhecido como quadrupolo.

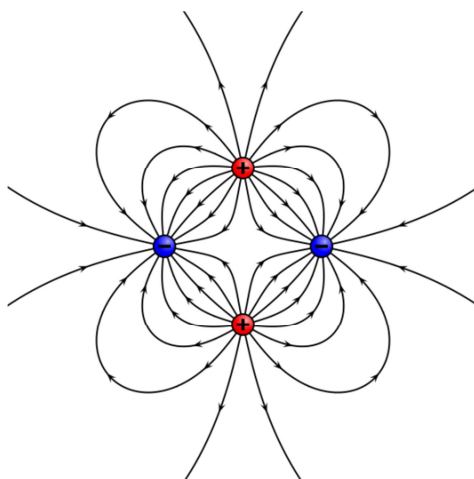


Fig. 7.5: Linhas de força elétricas geradas por um quadrupolo.

Geek3 - Own work. CC BY-SA 3.0, <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=10510423>

⁴ Porém nesse caso, o intervalo entre as curvas de nível consecutivas varia.

⁵ Compare as Figs. 7.2 e 7.4 e reflita sobre isso.

O caso elétrico difere do gravitacional devido à carga. Massa sempre atrai massa, mas a interação de atração ou repulsão elétrica depende da carga. Note na Fig. 7.3b que as linhas de força apontam para o elétron, que possui carga negativa. Coloquialmente falando podemos dizer que as linhas de força apontam “para dentro” quando as cargas são negativas. No caso positivo as linhas de força apontam “para fora”, como podemos observar na Fig. 7.5. Outra forma de dizer é que as linhas de força “nascem” nas cargas positivas e “morrem” nas cargas negativas. As linhas de força nos ajudam então a compreender as forças de atração e repulsão entre as cargas.

Mais interessante ainda são as linhas de campo magnético. O magnetismo está intimamente relacionado com a eletricidade. Quando um elétron se move, ele produz campo magnético. Uma corrente elétrica passando por um fio condutor pode ser modelado como um fluxo de elétrons em uma direção e sentido determinados, gerando um campo magnético bem definido, conforme ilustrado na Fig. 7.6. Note que o campo circula ao redor do fio.

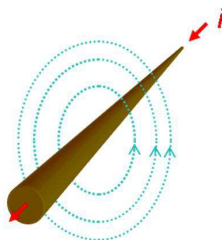


Fig. 7.6: Linhas de força magnéticas geradas pela corrente elétrica i em um fio condutor. Wikicomons.

Não existe o análogo à carga para este caso, ou seja, não há monopolo magnético. Por isso, as linhas de força magnética nunca nascem ou morrem, mas sempre se apresentam como um caminho fechado.

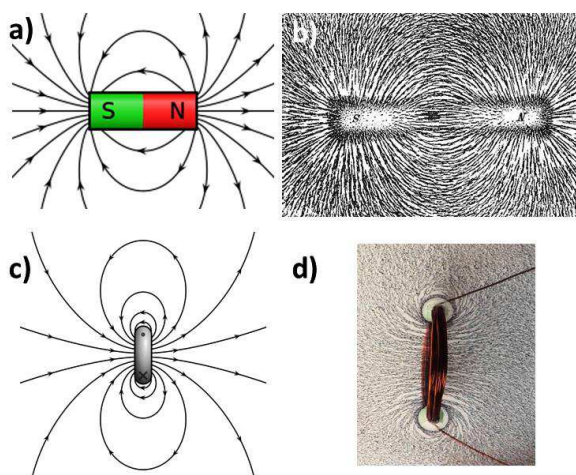


Fig. 7.7: Linhas de força magnética produzidas por um ímã representadas de forma **a)** esquemática e **b)** experimentalmente por meio de limalhas de ferro. **c)** e **d)** idem para uma espira de corrente elétrica. Note a semelhança do padrão gerado.)

(a) By Geek3 - Own workThis plot was created with VectorFieldPlot, CC BY-SA 3.0, <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=10587119>
 (b) By Newton Henry Black - Newton Henry Black, Harvey N. Davis (1913) Practical Physics, The MacMillan Co., USA, p. 242, fig. 200, Public Domain, <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=73846>
 (c) By Geek3 - Own work. This plot was created with VectorFieldPlot, CC BY-SA 3.0, <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=11621875>
 d) <https://www.youtube.com/watch?v=V-M07N4a6-Y> licenced under Creative Commons.

A Fig. 7.7a mostra de forma esquemática linhas de força geradas por um ímã. Por ser uma representação esquemática, é comum que os desenhos mostrem as linhas “nascendo” no polo norte e “morrendo” no polo sul. Em uma representação formal, as linhas continuam por dentro do corpo do ímã, formando caminhos fechados. Isso ajuda a explicar a magnetização do ímã, uma vez que todas as linhas se fecham dentro dele, há uma grande concentração dessas linhas em seu corpo e, portanto, um forte campo magnético. A Fig. 7.7b é uma imagem experimental que procura ilustrar o conceito de linhas de força magnética de um ímã permanente. O experimento é feito da seguinte forma: um ímã é mantido embaixo de uma folha de papel (ou outra superfície pouco susceptível a campos magnéticos) e limalhas de ferro são espalhadas sobre a folha. A folha é agitada levemente. Com a agitação, há uma acomodação das limalhas e o padrão resultante é fotografado gerando o aspecto da imagem. Note a grande semelhança entre esse padrão e a representação das linhas de força da Fig. 7.7a.

Podemos fazer aqui uma interessante observação do ponto de vista ontológico. Michael Faraday foi tão influenciado por esse tipo de experimento ilustrado na Fig. 7.7b que ele modelava seus experimentos utilizando as linhas de força⁶. Em contrapartida, James Maxwell, quando publicou seus trabalhos seminais em eletromagnetismo, acreditava que os campos elétrico e magnético eram diferentes manifestações do éter. Hoje existem modelos quânticos para os campos. Note que a contribuição de cada cientista continua sendo levada em conta, mesmo sendo baseados em ontologias distintas e muitas vezes incompatíveis. Já vimos isso quando discutimos sobre a teoria do calórico e a concepção atual de energia térmica no Cap. 2. Hoje aprendemos as teorias desenvolvidas por estes personagens, porém recontados de acordo com os valores epistemológicos dominantes atuais.

A Fig. 7.7c mostra de forma esquemática as linhas de força magnéticas geradas por uma espira de corrente elétrica. É evidente a semelhança com a representação das linhas de força de um ímã, e isso não é coincidência. De fato, se um elemento que produz campo magnético for ocultado dentro de uma caixa de papelão, de forma que apenas a sua manifestação seja perceptível, não é possível distinguir se o campo é originário de um material magnetizado ou de uma corrente elétrica. A fig. 7.7d mostra o experimento com as limalhas de ferro referente à distribuição de linhas de força representadas em 7.7c.

Interessante notar que em um fio condutor retilíneo, as linhas de força circulam o fio (Fig. 7.6), ao passo que se curvamos o fio na forma de uma espira circular, as linhas de força se alinham dentro da espira e, de forma coloquial, que se pode dizer que a corrente elétrica circula as linhas de força (Fig. 7.7c). Na verdade, os modelos mais aceitos do eletromagnetismo demonstram que uma coisa é consequência da outra.

O experimento do ímã caindo no tubo mostrado na Fig. 7.1 evidencia de forma bem clara a natureza interdependente dos fenômenos elétricos e magnéticos e justifica o termo comumente usado de “eletromagnetismo”. Muito se fala sobre a lei de “ação e reação” e o

⁶ Acreditar que, como no caso desse experimento, as limalhas se aglutinam ao longo de linhas de força reais, seria análogo a acreditar que as estrelas se aglutinam ao longo de “linhas de força gravitacionais” que definem os braços espirais de uma galáxia. Esses comportamentos são normalmente explicados sem o uso de linhas de força.

experimento pode ser interpretado sob esse ponto de vista. Mas antes de analisarmos o experimento em si, vamos analisar um caso mais simples, em que um ímã é aproximado de uma espira de corrente, como mostrado na Fig. 7.8a. O fenômeno envolvido no experimento do ímã caindo no tubo (Fig. 7.1) é praticamente o mesmo do ilustrado na Fig. 7.8, onde um ímã é aproximado de uma espira condutora. Sabe-se, a partir de experimentos realizados com a ajuda de um amperímetro, que há uma corrente elétrica gerada nesse caso. Em outras palavras, a aproximação do ímã induz uma corrente elétrica na espira conforme ilustra a Fig. 7.8b. A lei que descreve esse fenômeno é hoje conhecida por “lei de indução de Faraday”, em homenagem a Michael Faraday que foi um dos pioneiros no estudo desse fenômeno. Note que, conforme o ímã se aproxima da espira, aumenta o número de linhas de força que passa por dentro da espira. Para Faraday, a corrente elétrica é gerada à medida que as linhas de campo são cortadas pela espira, ou seja, quando há um aumento da quantidade de campo magnético passando dentro da espira. Formalmente, chamamos essa quantidade de campo magnético passando dentro da espira de “fluxo de campo magnético”. É a variação de fluxo que gera a corrente⁷. Deve-se levar em conta que a representação da Fig. 7.8 é simplificada, onde não representamos o campo gerado pela corrente na espira. Sabemos da Fig. 7.7c e 7.7d que uma corrente elétrica passando por uma espira gera um campo muito parecido com o campo gerado por um ímã. Nesse caso, as linhas de campo geradas passariam por dentro da espira na direção do ímã, gerando uma ação de repulsão entre o ímã e a espira⁸, ou seja, uma força que tende a resistir à aproximação do ímã. Esta é a força que faz com que o ímã caia em velocidade reduzida e constante no experimento do tubo e do ímã descrito na Fig. 7.1. Veremos mais adiante como esse efeito nos ajuda a explicar uma forma de levitação magnética.

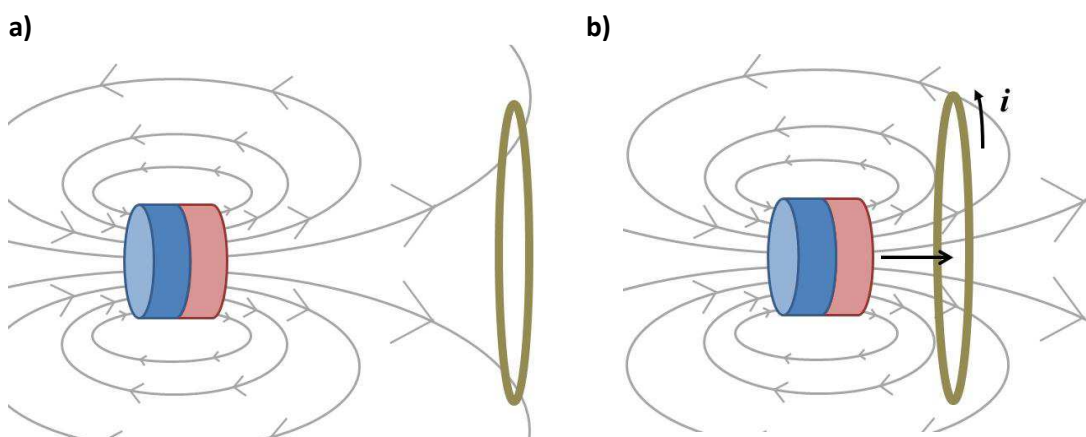


Fig. 7.8: A lei de indução de Faraday. As figuras (a) e (b) mostram a aproximação do ímã em relação à espira, intensificando o fluxo magnético nesta última. Esse aumento do fluxo induz uma corrente na espira.

A Fig. 7.9 representa uma forma de compreender a interação eletromagnética que ocorre no experimento descrito na Fig. 7.1.

⁷ Como ficará mais claro adiante, seria mais adequado dizer o aumento de fluxo induz uma tensão (diferença de potencial elétrica ou voltagem) na espira, e essa tensão gera a corrente. A lei de indução de Faraday correlaciona a variação de fluxo magnético com a tensão. Para o efeito prático nessa discussão, a corrente é induzida pela aproximação do ímã. Porém é importante chamar a atenção da forma estrita da lei, pois em uma espira aberta, a tensão se manifesta, mas a corrente não.

⁸ Semelhante a tentar aproximar polos iguais de dois ímãs diferentes.

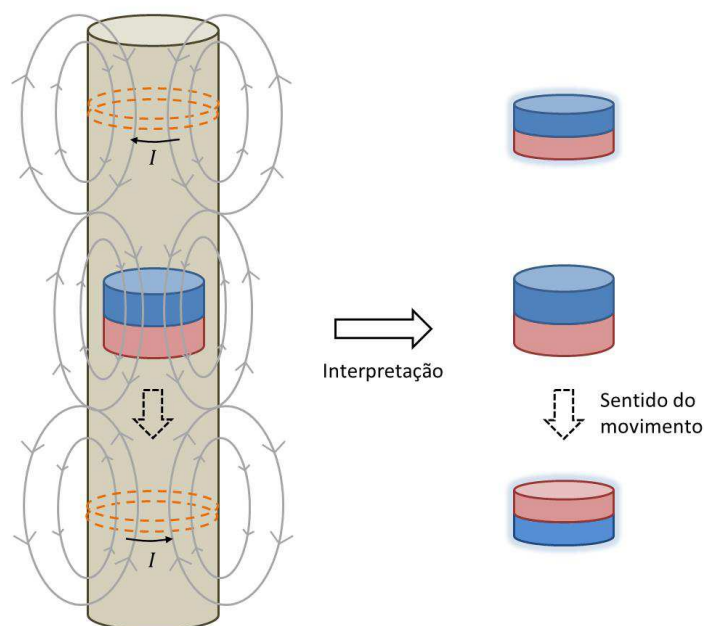


Fig. 7.9: Representação esquemática da interação eletromagnética que ocorre no experimento descrito na Fig. 7.1. À direita uma interpretação das forças magnéticas em atuação no fenômeno representadas apenas com ímãs. Lembrem-se, polos opostos se atraem e polos iguais se repelem.

O tubo na Fig. 7.1 pode ser entendido como uma espira alongada ao longo do seu eixo de simetria. Assim, conforme o ímã se movimenta ao longo do tubo ele vai produzindo continuamente correntes elétricas ao longo de diferentes sessões do tubo. Basicamente, o ímã gera correntes elétricas na sessão logo abaixo dele, praticamente da mesma forma em que descrevemos a geração de corrente elétrica no contexto da Fig. 7.8 para o caso da espira de corrente. Interessante notar que na parte imediatamente superior ao ímã, correntes são geradas no sentido contrário. Lembre-se, é a variação de fluxo que gera a corrente. Na parte superior, há uma variação no sentido de mais intenso para menos intenso. Em termos magnéticos, a corrente elétrica abaixo do ímã gera um campo que repele o ímã e a corrente acima gera um campo que atrai o ímã (veja a representação dessa interação no lado direito da Fig. 7.9). Ambas as correntes contribuem para resistir ao movimento no ímã. Há uma relação de equilíbrio entre a força peso do ímã, que o impele para baixo e as forças magnéticas entre o ímã e as correntes induzidas. Se por um lado, a gravidade tende a aumentar a velocidade de queda, esse aumento significaria uma intensificação da variação de fluxo, o que aumentaria as correntes e as forças magnéticas. Logo, o sistema atinge um equilíbrio e o ímã se movimenta em velocidade constante ao longo da queda dentro do tubo.

Interessante notar o aspecto energético do processo. Conforme o ímã cai, ele vai perdendo energia potencial gravitacional. Por outro lado, sua queda é lenta e em velocidade constante. Logo, ele não ganha energia cinética. O que está acontecendo com a energia? Note que correntes elétricas são geradas no tubo. Porém o tubo possui uma resistividade, ou seja, sua condutividade não é perfeita. Assim, apesar das correntes induzidas, a reação à queda no

ímã não é perfeita e a energia vai sendo dissipada eletricamente no tubo por aquecimento Joule⁹. O que aconteceria se o tubo fosse supercondutor? Veremos isso mais adiante.

Se você for procurar sobre a lei de indução de Faraday nos livros e na internet, muito provavelmente encontrará uma ilustração muito parecida com a Fig. 7.8, ou seja, a representação de um ímã interagindo com uma espira de corrente. Isso porque o fenômeno é descrito pela lei de indução de Faraday que está relacionada com o fluxo de campo magnético. Se uma variação de fluxo de campo ocorrer em um circuito condutor fechado, podemos observar uma corrente elétrica induzida. Vimos que podemos entender o fluxo de campo como o número de linhas de força que passa pela área interna delimitada pelo circuito. Podemos variar esse fluxo de diversas formas: variando a intensidade do campo magnético, variando o tamanho do circuito, ou mudando a orientação do circuito em relação ao campo, conforme ilustra a Fig. 7.10.

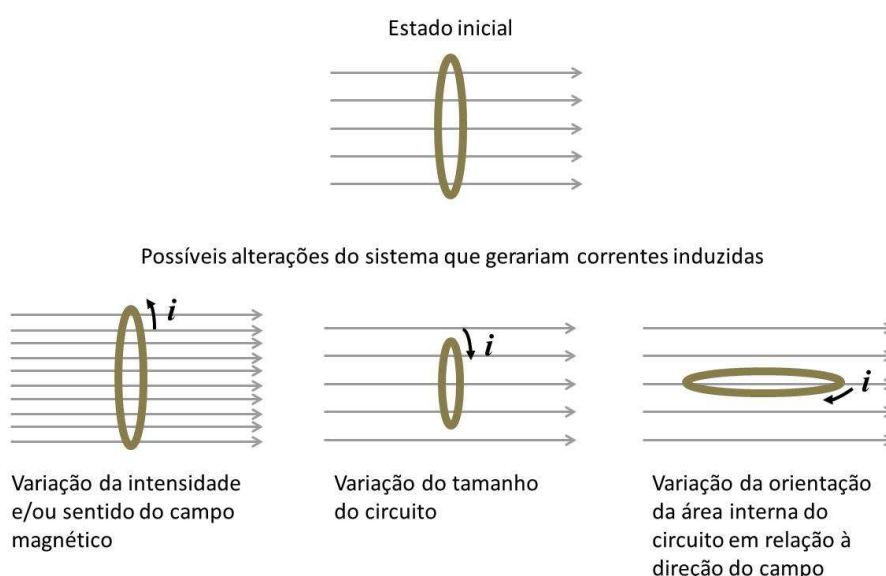


Fig. 7.10: Possíveis maneiras de obter uma variação de fluxo de campo magnético em um circuito condutor fechado de forma a gerar uma corrente induzida. Observe que na última alteração, apenas reorientar a espira em relação ao campo fez com que o fluxo de campo variasse do seu valor total para zero. Como veremos adiante, esse efeito é muito utilizado em motores e geradores elétricos.

A lei de indução de Faraday pode ser representada pela equação:

$$\varepsilon = -\frac{\Delta\phi}{\Delta t} \quad (7.1)$$

onde ε é a força eletromotriz gerada no circuito elétrico, $\Delta\phi$ é a variação de fluxo magnético que passa pelo circuito e Δt é a variação do tempo. Note que a variação de fluxo está relacionada com a área interna do circuito e com a intensidade do campo de forma que a ela

⁹ Um material que possui resistividade elétrica, quando atravessado por uma corrente elétrica, dissipa energia na forma de calor. Para uma dada corrente fixa, quanto maior a resistência, maior a dissipação de calor. Essa forma de dissipação energética é chamada de dissipação Joule, em homenagem a James Prescott Joule, que foi pioneiro no estudo desse fenômeno. O cobre é um material que possui ótima condutividade, por isso é usado na confecção de cabos elétricos. Mas mesmo assim possui uma resistividade não nula, apresentando dissipação Joule.

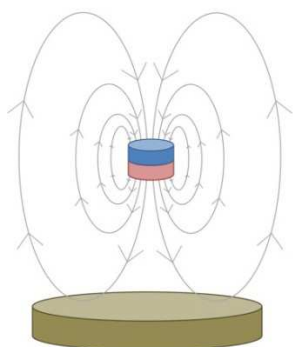
pode ser representada o produto da área interna do circuito (A) e a intensidade do campo magnético (B), ou seja, $\Delta\phi = \Delta AB$:

$$\varepsilon = - \frac{\Delta(BA)}{\Delta t} \quad (7.2)$$

Dizemos aqui que a lei de indução de Faraday pode ser representada dessa forma, pois a eq. 7.2 descreve de forma satisfatória apenas casos específicos, onde a área dos circuitos é facilmente conhecida, a distribuição de campo é uniforme, assim como a orientação entre o campo e o circuito. A eq. 7.2 é inútil para casos irregulares. A formulação mais geral de lei de Faraday faz uso de ferramentas de cálculo diferencial e integral que não é o foco desse livro. Além disso, existe uma ferramenta muito útil em física que trata área como um vetor. Nesse caso, o tratamento do terceiro caso da Fig. 7.10, em que a orientação do circuito muda em relação à direção do campo magnético pode ser elegantemente tratada com produtos escalares entre vetores correspondentes à área do circuito e ao campo magnético.

É interessante chamar a atenção novamente para o fato de que as ilustrações da lei de indução de Faraday normalmente fazem uso de uma espira de corrente circular. Como vimos, isso é útil do ponto de vista didático, pois o fluxo magnético está relacionado com a área interna do circuito e podemos determinar facilmente a área interna de um círculo. Mas isso também ilustra o caráter utilitário de ciência, ou seja, muitas vezes a ciência é vista como um processo em que adquirimos conhecimento sobre a natureza, de forma que podemos utilizá-la a nosso favor. Nesse sentido, as espiras de corrente das ilustrações da lei de Faraday, representam a quintessência de um circuito elétrico (ou parte dele), onde a corrente gerada será utilizada para um fim prático. Mas nem sempre as correntes geradas por indução ocorrem em um circuito determinado, é utilizada ou até mesmo desejada. A Fig. 7.11 mostra um caso muito semelhante ao mostrado na Fig. 7.8, onde a diferença essencial é que, ao invés do ímã se aproximar de uma espira de corrente, ela se aproxima de uma placa condutora. Ora, assim como o caso ilustrado na Fig. 7.1 onde podemos considerar o tubo de cobre como uma espira contínua ao longo do eixo vertical, podemos considerar uma placa de cobre como uma continuidade de circuitos elétricos distribuídos em um plano, dando possibilidades infinitas para a mobilidade eletrônica de reagir à variação de fluxo magnético. Seguindo os mesmos princípios físicos da lei de indução de Faraday, a variação de fluxo gerará correntes em forma de vórtices no material condutor.

a)



b)

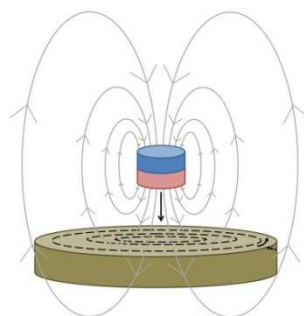


Fig. 7.8: Correntes de Foucault induzidas em uma chapa condutora devido a aproximação de um ímã.

As correntes induzidas não percorrem um circuito determinado, por isso, dificilmente essas correntes são aproveitadas. As correntes produzidas dessa forma são designadas pelo termo específico de “correntes de Foucault”¹⁰, e assim como no caso da espira, surgem de forma a gerar um campo magnético contrário ao campo do ímã, resultando em uma forma de repulsão. Nesse caso, se o ímã ilustrado na Fig. 7.11 estiver em queda livre, essa queda seria amortecida pelas correntes induzidas na placa condutora¹¹. Nesse sentido, lembrando o caso da queda do ímã no tubo ilustrado na Fig. 7.1, sendo este constituído de uma superfície condutora contínua, é possível assumir que parte do fenômeno observado seja também explicado pela geração de correntes de Foucault, e não somente as correntes induzidas que circundam o perímetro do tubo, como mostra o esquema simplificado da Fig. 7.9. Vemos que, tanto no caso do ímã em queda dentro do tubo, quanto o caso de um ímã em queda sobre uma placa condutora, as correntes induzidas tem uma ação de contrabalancear a força da gravidade, e as correntes induzidas dissipam a energia da queda. Mas agora voltamos a uma pergunta já formulada no caso do tubo. E se o material do tubo e da placa fossem supercondutores? Um material supercondutor não apresenta resistência elétrica e, portanto, não há transformação de energia em calor. Nesse caso, o contrabalanceamento entre as forças magnéticas e gravitacionais são estáveis e constantes. Essa é uma forma de entender porque um ímã flutua sobre um material supercondutor e o chamado efeito Meissner¹².

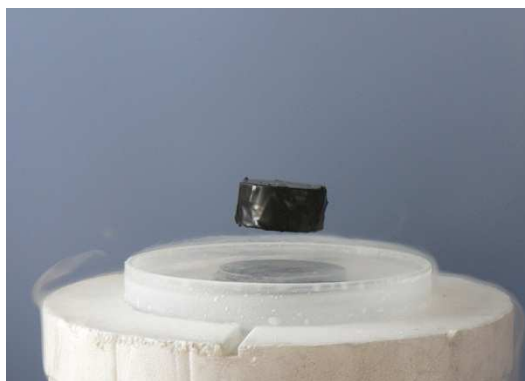


Fig. 7.11: Ímã levitando sobre um material em estado supercondutor.

By Mai-Linh Doan - self photo, CC BY-SA 3.0, <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=2911413>

As principais aplicações das correntes de Foucault estão relacionadas com a dissipação de energia, como sistemas de frenagem de trens e montanhas russas. A Fig. 7.12 mostra o sistema de frenagem Foucault de um trem bala japonês. Nesse sistema, um disco de material condutor não ferromagnético é acoplado ao eixo das rodas do trem (em cor marrom na figura). Envolvendo parcialmente o disco, podemos observar um eletroímã. No momento em que o condutor do trem aciona o freio, o eletroímã é acionado gerando um campo magnético no disco. Esse campo induz correntes de Foucault no disco dissipando a energia cinética do trem.

¹⁰ Nos países de língua inglesa, como os EUA, essas correntes são conhecidas como “eddy currents” que é um termo derivado da mecânica de fluídos, onde o termo “eddy” pode ser traduzido por “vórtice” (não é o nome de uma pessoa).

¹¹ Veja vídeo no youtube XXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXX (em preparação)

¹² A supercondutividade possui diferentes formas e o efeito Meissner é um efeito complexo. Aqui a explicação do efeito é apresentada apenas de forma simplificada.

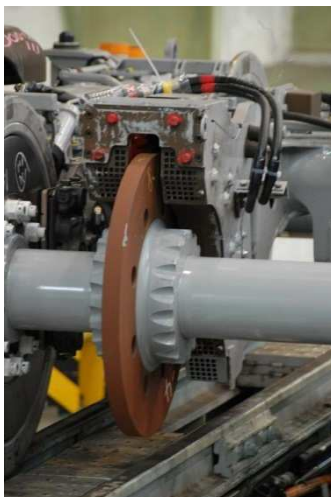


Fig. 7.11: Foto de um freio do tipo Foucault em um trem bala japonês da marca Shinkansen série 700. Esse sistema de freios foi atualmente substituído por freios regenerativos.

By Take-y at the Japanese language Wikipedia, CC BY-SA 3.0, <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=5188379>

Até agora, vimos a relação entre magnetismo, corrente elétrica e força mecânica no tratamento da lei de indução de Faraday. Esta trata o fenômeno focando mais no contexto de circuitos elétricos sob a manifestação da força eletromotriz. Mas podemos focar nossa análise no aspecto da força mecânica como na Fig. 7.12. Em uma análise preliminar, o importante é notar que, quando cargas elétricas se movimentam (corrente elétrica) em uma região do espaço onde existe campo magnético, há uma força resultante¹³, e a relação entre essas grandezas não é trivial.

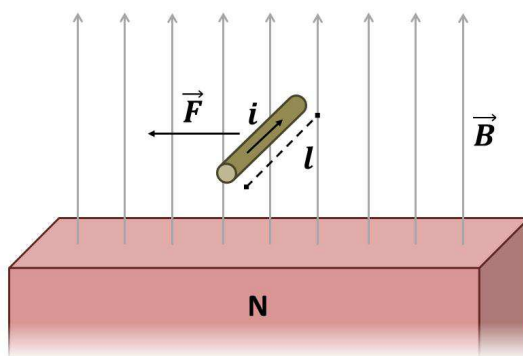


Fig. 7.12: Força de Lorentz agindo em um fio elétrico de comprimento l com corrente i passando sobre um polo de um ímã que gera um campo B .

De forma mais detalhada, Fig. 7. 12 ilustra um fio condutor de comprimento l por onde passa uma corrente elétrica i que se encontra muito próximo ao polo norte de um ímã. Analisamos o caso de um fio próximo ao polo do ímã para que possamos considerar o campo magnético \vec{B} uniforme. Nesse caso também, consideramos que a corrente elétrica flui em uma direção ortogonal ao campo magnético. Todas essas condições especiais são necessárias para que possamos simplificar o modelo e dispensar cálculos mais complexos e desnecessários

¹³ Salvo configurações específicas onde a força resultante é nula.

conceitualmente. Podemos quantificar essa força por meio de uma lei física denominada força de Lorentz, cuja expressão, para esse caso, é dada por

$$F = ilB \quad (7.3)$$

É interessante notar que em muitos casos é razoável considerar que a corrente elétrica i é formada por uma quantidade de elétrons que formam, em conjunto, uma carga total q que se desloca no espaço com uma velocidade v . Sendo assim, a força de Lorentz também pode ser escrita da forma abaixo, indicada aqui pois se aproxima um pouco mais da forma geral da expressão geral da força de Lorentz e será útil mais adiante:

$$F = qvB \quad (7.4)$$

Indicados na Fig. 7.12 estão a direção e sentido da força resultante, bem como sua relação com as direções e sentidos da corrente elétrica e do campo magnético. Estas relações são previstas pela expressão geral da força de Lorentz e mostram como o eletromagnetismo pode ser não intuitivo¹⁴. É compreensível que o leitor não se sinta confortável com a eq. 7.3. Para muitos, trata-se de uma informação sem qualquer suporte em conhecimentos tácitos ou prévios, mas trata-se de um fenômeno que pode ser facilmente demonstrado em um experimento caseiro, como veremos adiante.

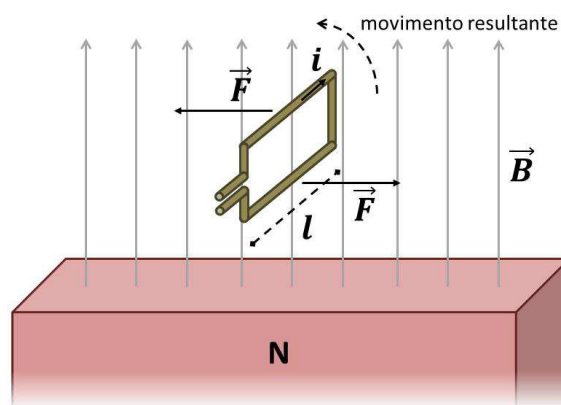


Fig. 7.13: Diagrama esquemático que ilustra o princípio de funcionamento de um motor elétrico. Mostramos apenas as partes conceitualmente relevantes. Por exemplo, suprimimos parte do circuito ao qual a espira está ligada, e fonte da corrente não é indicada, bem como os mancais e suportes que determinariam e sustentariam o eixo de rotação do motor.

A Fig. 7.13 sofisticava o sistema mostrado na Fig. 7. 12, mostrando uma espira retangular de comprimento l , por onde passa uma corrente i . A partir do que aprendemos com a força de

¹⁴ A dedução da eq. 7.3 a partir de pressupostos mais básicos foge do escopo desse livro. Normalmente essa dedução passa pela eq. 7.4 para depois chegar na eq. 7.3. Como já dito, um dos objetivos desse livro é fornecer uma narrativa alternativa, que permita o aluno ingressante correlacionar o conteúdo do livro com seu conhecimento do mundo mesmo que este ainda não seja adequadamente formalizado. Dito de outra forma, é importante que o estudante viva intuitivamente as explicações do livro. Entender é diferente de aceitar uma informação. Porém, quando o assunto é eletromagnetismo isso é bem mais difícil. Por isso, a sugestão de que nesse caso, se o leitor não conseguir respaldo em seu conhecimento previamente adquirido ou tácito, ele apenas aceite neste momento, e permita que as informações dadas aqui se conectem à sua teia de conhecimentos posteriormente.

Lorentz, podemos concluir que a corrente passando em sentidos opostos na parte superior e inferior da espira resulta em forças em direções opostas gerando um torque, ocasionando o movimento de rotação da espira¹⁵. Podemos dizer que a Fig. 7.13 mostra o princípio de um motor elétrico, onde aplicamos uma corrente elétrica em um circuito e obtemos força mecânica como resultado¹⁶. Apesar de o princípio de um motor estar apresentado na Fig. 7.13, este seria bastante ineficiente. Note, por exemplo, que a espira tem apenas uma volta. Se fizéssemos uma espira com duas voltas, teríamos duas vezes a corrente i , e a força resultante seria dobrada. Então, porque não 10 ou 100 voltas? Daí entendemos porque vemos grande volume de cobre nos motores elétricos, normalmente na forma de enrolamentos com grande número de voltas. Além disso, materiais magnéticos especiais podem ser incluídos para que o campo magnético B seja intensificado, de onde entendemos porque os motores elétricos são tão massivos (pesados). Como regra geral, espaços vazios em um motor elétrico significam perda de eficiência.

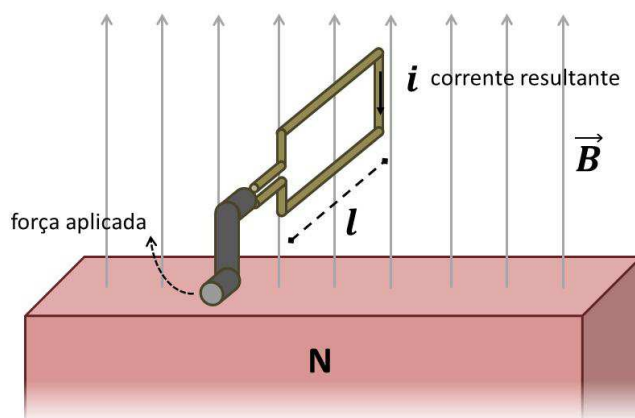


Fig. 7.14: Diagrama esquemático ilustrando um gerador elétrico simples. Assim como na Fig. 7.13, mostramos apenas as partes conceitualmente relevantes.

Como já havíamos visto na Fig. 7.10, no contexto da lei de indução de Faraday, uma das formas de se obter corrente induzida em uma espira de corrente é girá-la em relação a um campo magnético. Nesse ponto é interessante ressaltar a comparação entre o motor e o gerador elétrico. O princípio básico em que funcionam pode ser mostrado usando-se sistemas muito parecidos, como pode ser verificado comparando-se a Fig. 7.14 com a Fig. 7.13. A Fig. 7.14 ilustra o princípio básico de um gerador. De forma representativa, a manivela indica que a espira é submetida, por força externa, a uma rotação na presença do campo magnético. A rotação da espira faz com que haja uma variação de fluxo de campo, gerando uma corrente induzida no circuito. Note a semelhança entre o motor e o gerador (Fig. 7.13 e Fig. 7.14). No primeiro, aplicamos corrente e obtemos força mecânica, enquanto que no segundo, aplicamos

¹⁵ O leitor mais atento pode argumentar que o mesmo raciocínio pode ser aplicado nas laterais menores da espira, onde a corrente sobe e desce. Nesse caso, também ocorre o aparecimento de forças em direções opostas, porém nesse caso não há torque resultante (as forças são coplanares).

¹⁶ Veja o vídeo que mostra uma montagem simples de um motor elétrico que pode ser considerado um experimento caseiro para corroborar a força de Lorentz descrita na eq. 7.3 e nas Figs. 7.12. e 7.13. youtube XXXXXXXXXXXXXXXXXXXX (em construção).

força mecânica e obtemos corrente¹⁷. Vemos dessa forma que existe uma relação bastante íntima entre a lei de indução de Faraday e a força de Lorentz.

7.3 – A relação entre força de Lorentz e lei de indução de Faraday

O que veremos aqui pode ser interpretado como uma evidência de que os modelos físicos e as leis da física fazem parte do empreendimento humano. Cabe ao cientista, usando a observação do mundo e a experimentação, verificar se o modelo é adequado ou não. Como vimos em capítulos anteriores, muitos modelos foram criados baseados em pressupostos como o do éter ou calórico e depois abandonados frente a novas evidências observacionais. Outros são adaptados.

Pretendemos mostrar aqui a relação que existe entre a força de Lorentz e a lei de indução de Faraday. Como já mencionamos, uma envolve a força eletromotriz e a outra a força mecânica. Mas a análise que faremos aqui vai além de comparar essas duas leis. Chamaremos a atenção para o aspecto da construção das leis da física. Se os modelos que geram essas leis são bons, os resultados são consistentes entre si. Essa é uma das principais razões para o sucesso da física.

Mas para que essa análise seja possível, se faz necessário esclarecer a relação entre força mecânica e força eletromotriz. Essa relação foi estabelecida no séc. XIX, quando os cientistas trabalhavam com a premissa da lei de conservação de energia, onde esta poderia se manifestar de várias formas e ser convertida de uma forma para a outra.

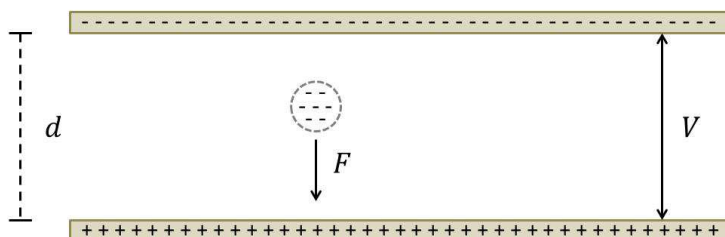


Fig. 7.15: Duas placas carregadas eletricamente gerando uma diferença de potencial elétrica V . Um objeto carregado negativamente seria repellido pela placa negativa e atraído pela positiva, gerando uma força resultante F . Para facilitar o argumento, supomos que a carga do objeto é de 1 coulomb.

A Fig. 7.15 considera o caso de duas placas carregadas eletricamente com cargas opostas e que estão próximas uma da outra. Sabemos que nesse caso há uma tensão elétrica ϵ entre as duas placas. Considere um objeto carregado negativamente posicionado entre as placas¹⁸. Pela própria natureza das interações elétricas, esse objeto será repellido pela placa negativa e atraído pela placa positiva, gerando uma força F que atua no objeto na direção

¹⁷ Existe uma sutileza para quem se especializa na área de física ou engenharia elétrica: a lei de indução de Faraday envolve a força eletromotriz (tensão elétrica), enquanto que a força de Lorentz é proporcional a corrente. No texto falamos apenas em correntes elétricas de forma a facilitar a assimilação fenomenológica, uma vez que tensão e corrente elétrica são proporcionais em circuitos simples.

¹⁸ Suponha que a massa desse objeto é desprezível de forma que as forças gravitacionais possam ser desprezadas. Estamos focando apenas no fenômeno elétrico.

desta última. Note que se alguém quisesse levar esse objeto da placa positiva até a carga negativa, teria que exercer trabalho mecânico de uma força F ao longo de uma distância d . Pois a definição de tensão elétrica se baseia justamente nesse trabalho realizado, sedimentando a ponte entre energia elétrica e mecânica. A tensão elétrica ε é o trabalho realizado para levar 1 coulomb (C) de carga de uma placa a outra, ou seja,

$$\varepsilon = Fd \quad (7.5)$$

Mas note que consideramos o caso especial onde a carga do objeto é de 1 C^{19} . Existe a sutileza de que a tensão elétrica é definida em termos de trabalho por unidade de carga q . Portanto, de forma mais geral,

$$\varepsilon = \frac{1}{q}Fd \quad (7.6)$$

Onde fica evidente a relação entre tensão elétrica²⁰, trabalho (energia) e força mecânica.

Agora que essa relação está estabelecida, vamos analisar outro problema, ilustrado na Fig. 7.16. No sistema em questão, há um condutor elétrico (como um fio de cobre) em forma de um “c” comprido e de ângulos retos. Sobre esse fio existe uma barra condutora “ab” de forma a fechar uma espira retangular de largura d e comprimento l . A barra desliza sobre o condutor em “c” com uma velocidade constante v , de forma que o comprimento l da espira esteja variando com o tempo. Além disso, esse circuito está sob a influência de um campo magnético uniforme e constante B que é ortogonal ao plano do circuito e aponta para “fora da página” conforme ilustração da Fig. 7.16²¹.

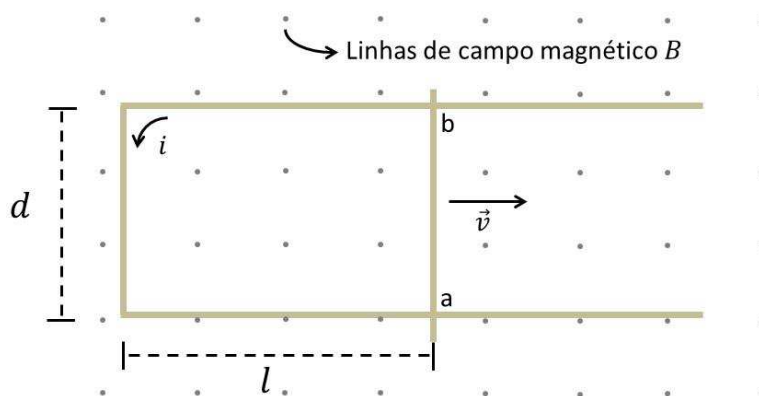


Fig. 7.16: Diagrama esquemático de um sistema formado por uma espira retangular cuja área interna varia com o tempo e que está sob influência de um campo magnético.

Podemos analisar esse sistema sob o ponto de vista, tanto da lei de Faraday quanto da força de Lorentz. O objetivo é mostrar que os resultados são consistentes entre si.

¹⁹ 1 coulomb equivale a uma quantidade enorme de elétrons. Para ser mais específico, $6,242 \times 10^{18}$ ($1,036 \times 10^{-5}$ mol) de elétrons.

²⁰ Tensão elétrica, voltagem são sinônimos. Outro sinônimo é força eletromotriz, e o exemplo discutido ilustra bem a origem do termo.

²¹ A escolha dos parâmetros como um circuito retangular, um campo magnético uniforme e ortogonal, uma velocidade constante etc, é motivada para que os cálculos sejam simples. Pode-se demonstrar o mesmo princípio a partir de parâmetros mais gerais.

Do ponto de vista da lei de indução de Faraday, podemos notar que o sistema apresenta uma espira com uma variação de fluxo magnético, de forma análoga ao caso da Fig. 7.10 onde há uma variação do tamanho do circuito, que possui um formato retangular de largura d e comprimento l . Podemos dizer que a área do circuito A é dado por:

$$A = ld \quad (7.7)$$

Como a área está mudando, temos que o fluxo de campo magnético também está. Logo uma tensão elétrica é induzida do circuito retangular dando origem a uma corrente elétrica i ilustrada na Fig. 7.16. Usando a lei de indução de Faraday como expressa na eq. 7.2, temos:

$$\varepsilon = -\frac{\Delta(BA)}{\Delta t} = \frac{\Delta(Bld)}{\Delta t} \quad (7.8)$$

Dos parâmetros B , d e l , apenas o parâmetro l varia com o tempo, então podemos reescrever a eq. 7.8 da forma:

$$\varepsilon = -Bd \frac{\Delta l}{\Delta t} \quad (7.9)$$

Ou seja, a tensão induzida depende da taxa de variação do comprimento l com o tempo definido pela razão $\Delta l / \Delta t$. Nós sabemos que essa taxa de variação é dada pela própria construção de nosso sistema é representada pela velocidade v . Logo:

$$\varepsilon = -Bdv \quad (7.10)$$

Agora vamos analisar o sistema sob o ponto de vista da força de Lorentz deixando de lado o desenvolvimento feito a partir da lei de Faraday que se expressa pelo desenvolvimento das eq. 7.7 à 7.10.

Como vimos na eq. 7.4, a força de Lorentz pode modelar o caso de cargas elétricas que se deslocam na presença de campo magnético. Ao observarmos o sistema em questão, podemos notar que há uma coisa que se desloca com velocidade v em relação ao campo magnético: a barra condutora. Em nossa concepção, qualquer material é composto por átomos, íons, moléculas, que possuem prótons e elétrons, ou seja, cargas elétricas. Há que se levar em conta que, nesse caso, temos uma barra condutora (como uma barra de cobre, por exemplo), que possui elétrons livres. Não observaríamos qualquer efeito se a barra fosse de material isolante, pois, apesar de os prótons e elétrons estarem sob o efeito da força de Lorentz, essa força não é suficiente para romper as ligações entre os prótons e elétrons do material (não há elétrons livres). Sendo assim, suponha que na barra há uma quantidade de elétrons livres que, em conjunto formem uma carga $-q$. Note que, estas cargas possuem uma velocidade v em relação ao campo magnético B . Logo, haverá uma força Lorentz dada por:

$$F = -qvB \quad (7.11)$$

Em analogia a Fig. 7.12, podemos notar que a força resultante fará com que os elétrons se movam na barra na direção do ponto a para o ponto b dando origem a corrente elétrica indicada da Fig. 7.16. Daí, podemos notar que tanto a lei de Faraday quanto a força de Lorentz dão conta de fornecer uma explicação para o surgimento de uma corrente elétrica no circuito. Porém, a compatibilidade vai além da concordância qualitativa da questão do surgimento da

corrente elétrica, dando conta também da concordância quantitativa. Isso porque sabemos a correlação entre energia elétrica e energia mecânica dada pela eq. 7.6. Sabemos que a força em questão é dada pela força de Lorentz expressa pela equação 7.11 e ela atua ao longo da barra desde o ponto a até o ponto b, cuja distância é dada por d . Sendo assim,

$$\varepsilon = \frac{1}{q}Fd = -\frac{1}{q}qvBd = -Bvd \quad (7.12)$$

Note que o resultado da eq. 7.12, obtido a partir da força de Lorentz é idêntico ao resultado da eq. 7.10, obtido a partir da lei de indução de Faraday. Isso ilustra um dos aspectos mais belos da ciência. Dois modelos físicos distintos, manifestados em leis distintas são utilizados para interpretar um mesmo sistema. Partindo de pressupostos estabelecidos ao fim do séc. XIX e início do séc. XX, de que existe algo que conhecemos por energia, e que esse algo se manifesta de diferentes formas e apresenta o princípio de conservação. E que o princípio de conservação é operado a partir de convenções estabelecidas por esse paradigma. Temos que esses dois modelos físicos distintos apresentam resultados compatíveis. E isso tem se mostrado assim para diversos outros sistemas onde há conversão de energia. Muitos resumiriam este parágrafo com a sentença: a ciência funciona!

7.4 – Materiais Magnéticos

É quase impossível falar de conversão entre energia mecânica e energia elétrica sem mencionar os materiais magnéticos. Eles são onipresentes nos motores, geradores e transformadores elétricos. Note que desde o início desse capítulo discutimos a interação entre ímãs, circuitos condutores, campos etc.

Há pouca compreensão dos materiais magnéticos pelo público leigo. Um ímã gruda em uma geladeira e também em uma chave de fenda. Mas a chave de fenda não gruda na geladeira. Da mesma forma, chaves de fenda normalmente não grudam em parafusos. Por quê? Poucos sabem a resposta. Outra situação que as pessoas mais observadoras já podem ter notado. Você pode grudar um parafuso e uma chave de fenda no ímã da parte traseira de um alto falante. É comum que, logo após esse processo, a chave de fenda passe a atrair o parafuso magneticamente, como se fossem ímãs²². Por que esse comportamento passa a se manifestar? E por que ele desaparece depois de um tempo? Nessa seção, procuramos responder a essas perguntas, além de justificar a presença dos materiais magnéticos em geradores, motores, e transformadores.

Primeiramente é necessário entender como os cientistas e engenheiros definem as diferentes formas do campo magnético. O campo magnético pode simplesmente estar presente em um dado volume do espaço, como o campo magnético terrestre em um dado ponto da órbita terrestre. Ou, de outra forma, o magnetismo pode ser percebido pelo estado magnetizado de um ímã. Ou ainda, um dado material pode apresentar um estado magnético por estar sob influência do campo magnético terrestre ou por um ímã estar em sua vizinhança.

²² Se você nunca observou esse efeito veja o vídeo XXXXXXXXXXXXXXXX (em construção)

De forma simples, vamos considerar uma região do espaço onde há um campo magnético. Denominamos esse campo pelo símbolo \vec{H} e a unidade no sistema internacional é o Ampere por metro (A/m).

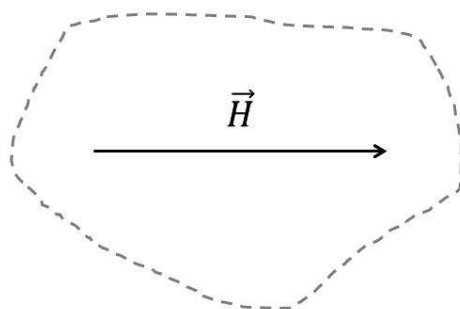


Fig. 7.17: Campo magnético presente em uma região do espaço onde não há material algum (vácuo). A unidade do campo \vec{H} é dada em A/m.

Agora imagine que nessa região do espaço onde há o campo \vec{H} , introduzimos um corpo composto de um dado material. Qualquer corpo, de qualquer material que seja, reage ao campo de alguma forma. Essa reação ao campo é chamada de magnetização, que é representada pelo símbolo \vec{M} e também possui a unidade de A/m no SI.

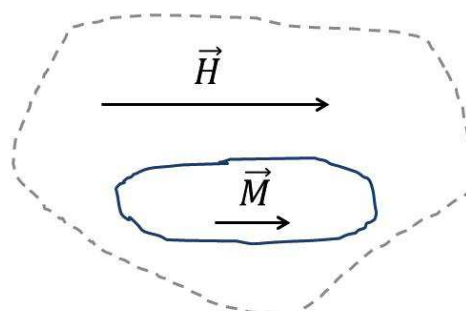


Fig. 7.18: Um corpo de um material é colocado em uma região com campo \vec{H} . Com o processo de magnetização do corpo, surge um campo \vec{M} no interior do material.

A forma mais simples de representar essa relação entre campo aplicado e magnetização se dá por meio da expressão:

$$\vec{M} = \chi \vec{H} \quad (7.13)$$

Onde χ é chamada de susceptibilidade magnética do material. Embora cada material apresente uma magnetização distinta, por experiência, os cientistas notaram que as formas de magnetização poderiam ser divididas em tipos diferentes de magnetismo, sendo os mais comuns o diamagnetismo, o paramagnetismo e o ferromagnetismo²³. Entendendo-se essas

²³ O leitor mais informado pode sentir falta das menções ao ferrimagnetismo e ao antiferromagnetismo. Para os efeitos desse livro, consideramos estas como “formas irmãs do ferromagnetismo” não sendo necessário entrar no mérito da diferenciação nesse ponto. De fato, a diferenciação entre ferromagnetismo e ferrimagnetismo é recente e ocorreu devido aos trabalhos de Louis Néel em 1948, o

três formas pode-se ter uma boa compreensão da relevância dos materiais magnéticos em inúmeras facetas da tecnologia. Aqui apresentaremos a descrição dessas formas de magnetismo de maneira simples e fenomenológica.

A Fig. 7.19 mostra de forma esquemática a diferença entre os três principais tipos de magnetismo. Os materiais diamagnéticos apresentam magnetização muito pequena e na direção oposta ao campo aplicado. Em outras palavras, a susceptibilidade magnética dos materiais diamagnéticos é negativa e muito pequena. Já a susceptibilidade dos materiais paramagnéticos é pequena e positiva. Já a susceptibilidade do material ferromagnético, além de positiva, é ordens de grandeza maior (muito, muito maior) do que os materiais paramagnéticos, e é esse um dos principais motivos pelos quais esses materiais são importantes para a tecnologia das máquinas elétricas. A susceptibilidade é tão maior, que mesmo pequenas intensidades de campo aplicado são capazes de causar intensa magnetização do material.

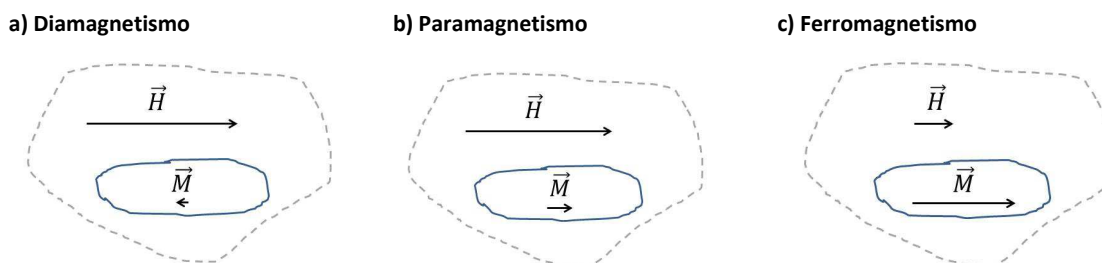


Fig. 7.19: Diagrama esquemático ilustrando os três principais tipos de magnetismo. **a)** Diamagnetismo: a magnetização é muito pequena e no sentido oposto ao campo aplicado. **b)** Paramagnetismo: a magnetização pequena e no mesmo sentido do campo aplicado. **c)** Ferromagnetismo: a magnetização é muito grande e no mesmo sentido do campo aplicado.

Os materiais ferromagnéticos são mais do que materiais “paramagnéticos muito bons”. Seu comportamento de magnetização é essencialmente diferente dos demais. Enquanto as susceptibilidades dos materiais diamagnéticos e paramagnéticos possuem comportamentos essencialmente lineares, a susceptibilidade dos materiais ferromagnéticos, além de ser muito maior, não é linear, e apresenta um fenômeno muito interessante denominado histerese que veremos em detalhes mais adiante. A efetividade dos materiais ferromagnéticos em suas aplicações tecnológicas, que vão além das máquinas elétricas, sendo também essenciais para sensores e atuadores, sem mencionar toda a tecnologia de armazenamento de dados digitais de computadores, pode ser resumida na engenharia de seus processos de magnetização e histerese. Mas antes de conversarmos sobre isso, é importante definirmos outro tipo de campo magnético. Embora fundamentalmente não seja necessário, do ponto de vista prático faz sentido a definição desse novo campo.

Já sabemos como definir o campo no espaço e como um dado material reage ou ser submetido a esse campo. O que mais resta? Do ponto de vista fundamental, mais nada. Acontece que há um terceiro campo magnético denominado campo de indução magnética \vec{B} que representa a soma das contribuições de \vec{H} e \vec{M} . Esse campo ajuda na compreensão das

que mostra que do ponto de vista fenomenológico, as duas formas de magnetismo são muito semelhantes. O mesmo pode ser dito do antiferromagnetismo.

máquinas elétricas, pois, como vimos é o campo considerado na lei de indução de Faraday. Por motivos históricos, no sistema internacional sua unidade não é o A/m, mas o Tesla (T). Para dar conta dessa diferença de unidade, a soma das contribuições de \vec{H} e \vec{M} deve ser multiplicada por uma constante denominada permeabilidade magnética do vácuo μ_0 .

$$\vec{B} = \mu_0(\vec{H} + \vec{M}) \quad (7.14)$$

A definição do campo \vec{B} é útil, pois não importa se o magnetismo provém de um campo externo ou da magnetização de um material, ele sempre é capaz de induzir correntes elétricas em circuitos. Logo, as duas contribuições devem ser levadas em conta. Assim como a definição de entalpia, que leva em conta diferentes contribuições energéticas, ajuda na compreensão de máquinas térmicas, a definição de \vec{B} leva em conta diferentes contribuições de magnetismo e ajuda no modelamento de máquinas elétricas. Mas a introdução de \vec{B} obriga ao aprendiz de magnetismo a se familiarizar com outras definições e pode adicionar alguns elementos que costumam causar certas confusões. Podemos usar a eq. 7.13 e reescrever a eq. 7.14 da forma:

$$\vec{B} = \mu_0(\vec{H} + \chi\vec{H}) = \mu_0(1 + \chi)\vec{H} \quad (7.15)$$

Se definirmos

$$\mu = \mu_0(1 + \chi) \quad (7.16)$$

Como sendo a permeabilidade magnética do material, temos

$$\vec{B} = \mu\vec{H} \quad (7.17)$$

O fato da eq. 7.17 ser muito parecida com a eq. 7.13 não é coincidência. Isso porque não há fundamentalmente uma nova física ocorrendo. Note que ainda estamos descrevendo um campo no espaço e a magnetização de um material submetido a esse campo. Mas há certas sutilezas relacionadas às definições dos campos \vec{B} , \vec{H} e \vec{M} .

Vamos rever o comportamento dos diferentes tipos de magnetismo, mas agora sob o ponto de vista do campo \vec{B} ao invés de \vec{M} . Vamos reanalisar o simples caso do campo magnético presente no vácuo, como ilustrado na figura 7.17, uma vez que não há material presente temos:

$$\vec{B} = \mu_0\vec{H} \quad (7.18)$$

Ou seja, podemos conceber o campo no vácuo como um campo \vec{B} ou \vec{H} , mas temos que tomar o cuidado para alterarmos a unidade de A/m para T usando μ_0 . Uma boa forma de visualizar isso é por meio de um gráfico da relação entre essas grandezas como mostrado na Fig. 7.20. A relação entre os campos \vec{B} e \vec{H} sem a presença de qualquer material é mostrado pela linha reta cinza onde podemos considerar μ_0 como o coeficiente linear da reta. Ou, dito de outra forma:

$$\mu = \mu_0(1 + \chi) = \frac{\Delta B}{\Delta H} \quad (7.19)$$

Onde nesse caso χ é nulo. Agora, o que acontece com \vec{B} quando adicionamos diferentes materiais magnéticos, ou seja, χ não nulos à região com campo \vec{H} ?

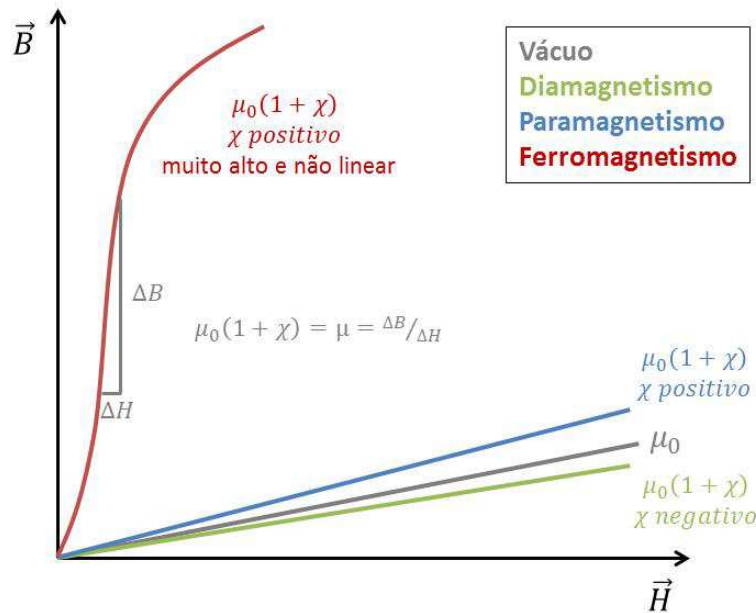


Fig. 7.20: Gráfico correlacionando as relações entre os campos \vec{B} e \vec{H} para os diferentes tipos de magnetismo.

Vimos que no caso de materiais diamagnéticos, χ é pequeno e negativo e apresentando um comportamento essencialmente linear, o que resulta na linha verde da Fig. 7.20. Se o material é paramagnético (em azul na Fig. 7.20) o resultado é análogo, com a única diferença que χ é positivo. O caso ferromagnético é representado pela linha vermelha, onde χ é muito alto e não linear.

Para entendermos um dos motivos da relevância dos materiais ferromagnéticos, vamos reescrever a equação da lei de indução de Faraday (eq. 7.2), multiplicando por ΔH em cima e embaixo e supondo uma área constante:

$$\varepsilon = A \left(\frac{\Delta B}{\Delta t} \right) = A \left(\frac{\Delta B}{\Delta H} \frac{\Delta H}{\Delta t} \right) = A \left(\mu \frac{\Delta H}{\Delta t} \right) \quad (7.20)$$

Portanto, materiais com alta permeabilidade magnética (μ), tais como os materiais ferromagnéticos, potencializam a tensão elétrica induzida em um ambiente onde existe variação temporal de campo magnético aplicado. Daí a grande utilização dos chamados “aços elétricos”, que são materiais com altas permeabilidades magnéticas. Isso também explica porque circuitos de corrente alternada são úteis para se construir máquinas elétricas, uma vez que correntes elétricas variantes produzem campos magnéticos variantes. A tabela 7.1 mostra a permeabilidade magnética típica de alguns materiais para comparação. Note que a permeabilidade magnética depende da pureza e do processo de fabricação do material e também do regime de campo aplicado (intensidade e frequência) no qual é medido.

Tabela 7.1: Permeabilidade magnética típica de alguns materiais. A permeabilidade relativa é normalizada para o valor da permeabilidade magnética do vácuo μ_0 .

Meio	Permeabilidade μ (H/m)	Permeabilidade relativa μ_r
vácuo	$1,256637 \times 10^{-6} = \mu_0$	1 (por definição)
Ar		1,00000037
Fe	$\sim 6 \times 10^{-3}$	~ 5000
Ni	$\sim 7 \times 10^{-4}$	~ 600
Aço elétrico FeSi (3% de Si)	5×10^{-3}	~ 4000
Permalloy ($\text{Fe}_{20}\text{Ni}_{80}$)	1×10^{-2}	~ 8000

Observe que, para efeitos práticos, o ar possui a mesma permeabilidade magnética que o vácuo. Isso explica em parte a confusão que existe entre os campos \vec{B} e \vec{H} e a troca de unidades entre eles, até mesmo nas comunidades especializadas.

7.5 – Histerese

Como seu computador “se lembra” (armazena) daquela foto que você baixou semana passada? A resposta está relacionada com a histerese. Ela também é fundamental para a tecnologia dos aços elétricos usados em motores e transformadores, mas de maneira quase oposta. Isso porque histerese também está relacionada com a dissipação de energia. Qual é a diferença essencial entre o aço da sua geladeira e o ímã que está grudado nela? Afinal, ambos os materiais apresentam uma propriedade magnética especial. A resposta também está na histerese.

Quem já brincou com ímãs ou consertou alto-falantes pode ter notado um fenômeno interessante. Os alto-falantes possuem um forte ímã em sua parte posterior. É sabido que chaves de fenda e parafusos normalmente são constituídos de aços ferromagnéticos. Uma chave de fenda, ao ser aproximada de um alto-falante acaba grudando nele. Logo após isso ocorrer ela passa a atrair os parafusos como se a chave de fenda se tornasse, ela mesma, um ímã permanente²⁴. Por que isso ocorre?

A histerese é importante não só para os materiais magnéticos, mas também existe o análogo elétrico para o fenômeno, sendo fundamental para a tecnologia dos materiais piezelétricos. Além disso, podem-se fazer analogias com outras áreas, inclusive sociais. Vamos focar aqui na histerese do ponto de vista magnético, e de uma forma fenomenológica.

Como vimos na seção anterior, todos os materiais se magnetizam de alguma forma sob a ação de um campo magnético externo. Procuramos mostrar os diferentes tipos de magnetização, distinguindo os materiais diamagnéticos, paramagnéticos e ferromagnéticos. O que não mencionamos, é que certos materiais podem estar magnetizados sem a presença de um campo externo. Esse é o caso de um ímã. Não é mesmo? Pense bem. Ele possui uma magnetização manifesta, atraindo parafusos e grudando na geladeira, mesmo sem a presença de outras fontes de campo magnético. Ele está permanentemente magnetizado. Isso só é possível devido à histerese, que é uma característica dos materiais ferromagnéticos²⁵.

²⁴ Se você tem ímã, chave de fenda e parafusos em casa, faça o teste. Veja também nota de rodapé 21.

²⁵ Ou de suas “formas irmãs”, os materiais ferrimagnéticos e antiferromagnéticos.

Para entendermos o que é a histerese, vamos reconstruir na Fig. 7.21, passo a passo a curva de magnetização dos materiais ferromagnéticos mostrada na Fig. 7.20 em vermelho.

Vamos considerar um material ferromagnético inicialmente desmagnetizado. Ao aplicarmos um pequeno campo magnético H_1 em uma dada direção, o material se magnetiza e apresenta uma indução B_1 , como mostrado na Fig. 7.21a. Se aumentarmos o campo aplicado para H_2 a magnetização aumentará e o material apresentará uma indução B_2 (Fig. 7.21b). Podemos continuar o processo até obter uma curva similar à curva vermelha da Fig. 7.20. Note que a indução B aumenta indefinidamente com o aumento da intensidade do campo H pois B é proporcional a soma de M e H .

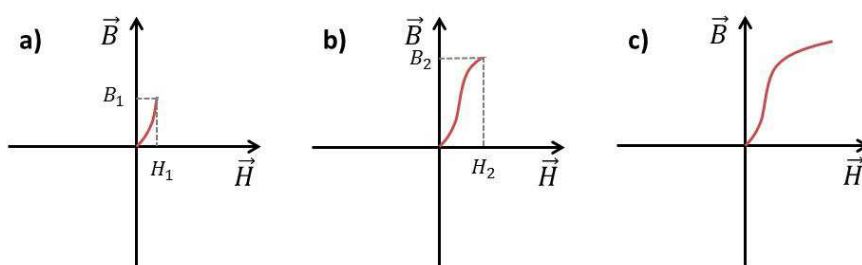


Fig. 7.21: Construindo a curva de magnetização de uma amostra ferromagnética partindo do estado desmagnetizado.

Podemos representar o mesmo processo, construindo um gráfico da magnetização M em função do campo aplicado, que fica da forma mostrada na Fig. 7.22.

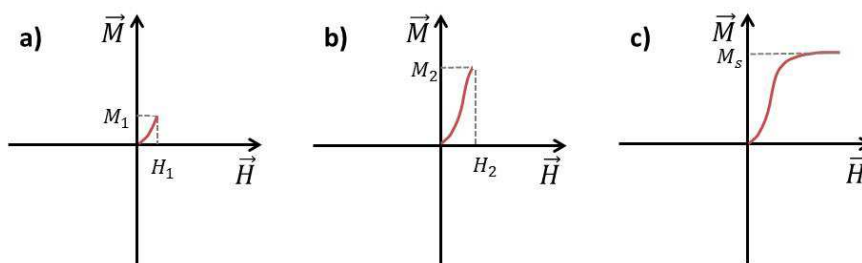


Fig. 7.22: O mesmo processo de magnetização da Fig. 7.21, porém representado em gráficos de M em função de H . Note que agora a magnetização de saturação é evidente em (c).

Note que a partir de um dado valor do campo aplicado, o aumento deste não implica em um aumento da magnetização atingindo a magnetização de saturação M_s (Fig. 7.22c). Isso é uma característica dos materiais ferromagnéticos. Apesar de apresentarem alta susceptibilidade e altas intensidades de magnetização, essa capacidade satura a partir de um dado campo. Os valores do campo e da magnetização de saturação variam para cada amostra e depende de muitos fatores como composição, processo de fabricação, temperatura etc.

Agora chegamos à questão da histerese. Suponha que, após saturar o material magneticamente, como na situação da Fig. 7.22c, eu passe a diminuir o campo aplicado H até zero, sempre registrando a magnetização M . A princípio, eu posso imaginar que a magnetização diminuirá com a diminuição do campo aplicado seguindo a mesma curva de ida

(a curva de magnetização quando o campo estava aumentando). Mas isso não é o que acontece com um material ferromagnético típico. Nesse caso, a amostra tenderá a permanecer magnetizada em certo grau até o ponto em que, quando H chega a zero, a amostra ainda apresenta uma magnetização remanente M_r , como destacado na Fig. 7.23a. Isso explica porque a chave de fenda passa a atrair parafusos (a se comportar como um ímã) depois de grudada no alto falante. Em seu estado inicial, quando está longe do alto falante, a chave de fenda se encontra desmagnetizada. No momento em que ela gruda no ímã do alto falante, ela passa pelo processo de magnetização descrito na Fig. 7.22. Após isso, quando ela é novamente afastada do alto falante, o campo magnético aplicado sobre ela volta a ser nulo, mas ela passa a apresentar uma magnetização remanente, como mostrado na Fig. 7.23a, passando a agir como um ímã. A diferença básica entre a chave de fenda magnetizada e o ímã do alto falante é que a primeira perderá seu estado magnetizado depois de um tempo (podem ser horas, semanas ou milhares de anos dependendo do material) por fatores essencialmente térmicos, enquanto que o segundo foi desenvolvido, sob o ponto de vista de engenharia de materiais, para que nunca (em princípio) perca sua magnetização depois de sofrer o processo de magnetização durante sua fabricação.

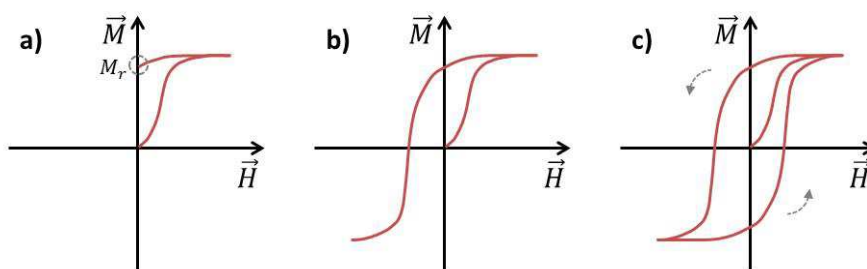


Fig. 7.23: A obtenção de uma curva de histerese de uma amostra ferromagnética.

Na Fig. 7.23a podemos ver a essência da histerese, cujo significado da palavra está relacionado com “atraso”. Ou seja, mesmo com o campo aplicado já ausente, o material ainda se encontra magnetizado, como se seu estado representasse uma memória de seu estado anterior com a presença do forte campo aplicado.

Como vimos no início deste capítulo, o campo magnético possui direção e sentido. Assim, a amostra é magnetizada em uma direção e sentido. A magnetização remanente apresenta a mesma direção e sentido do campo aplicado. A curva de histerese completa envolve a magnetização da amostra em sentidos opostos, ou seja, depois de magnetizar a amostra em um dado sentido, o campo é continuamente levado a zero e aplicado progressivamente no sentido oposto. A Fig. 7.23b mostra a curva realizada até o ponto em que a amostra é saturada no sentido oposto. Se o campo é novamente diminuído até zero, a amostra apresentará uma magnetização remanente no sentido oposto ao inicial. Novamente, é como se a amostra se lembrasse “de onde veio”.

Retornando ao exemplo da chave de fenda, o processo análogo ao ilustrado na Fig. 7.23b seria, após encostar a chave no ímã, afastar a chave de fenda, girar a chave (ou o ímã) em 180° e reaproximar a chave, encostando-a ao ímã novamente. Na primeira aproximação, a magnetização ocorre em um sentido. Quando a chave é afastada a magnetização remanente se encontra nesse sentido inicial. No momento em que a chave é invertida e reaproximada,

ocorre uma reorientação total na magnetização da chave no sentido oposto e a magnetização remanente refletirá este novo sentido de magnetização.

A curva de histerese é concluída retornando o campo novamente a zero e saturando novamente a amostra no sentido inicial. Note que a curva de magnetização segue uma trajetória distinta da curva original, mostrando que o processo de magnetização depende do estado anterior da amostra. No caso, depende se a amostra encontra-se inicialmente desmagnetizada ou saturada no sentido oposto.

A Fig. 7.24 ilustra todo o processo de obtenção de uma curva de histerese em gráficos da indução magnética B em função de H .

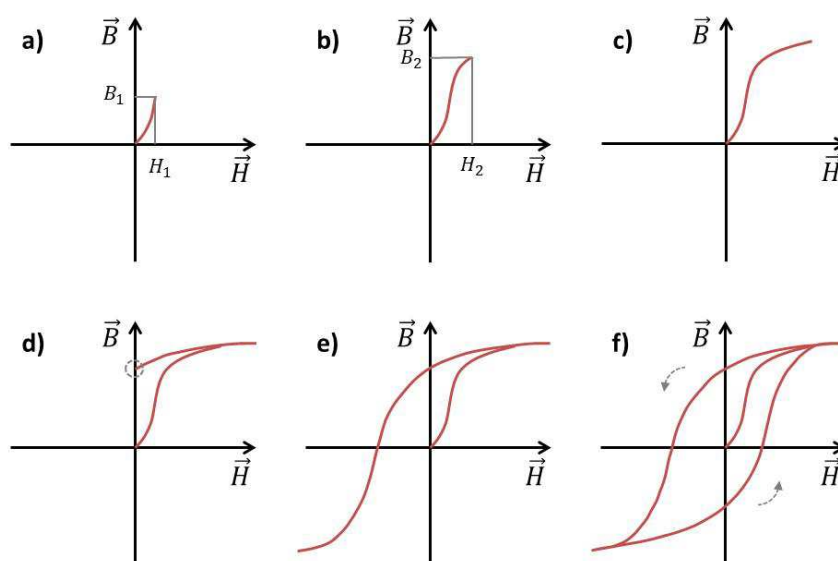


Fig. 7.24: Curva de histerese representada em gráfico de B em função de H .

Devido às suas características, materiais ferromagnéticos são os materiais mais usados atualmente para armazenamento de dados. Como é sabido, as informações são geralmente armazenadas em uma linguagem binária, representada normalmente por uma sequência de estados denominados “0” e “1”, que são os bits de informação. Estes bits podem ser fisicamente determinados por uma variedade de estados discretos: sem buraco ou com buraco (CDs e DVDs), com carga ou sem carga elétrica (memória flash), com corrente e sem corrente elétrica (processadores) etc. A parte funcional de um disco rígido de computador é um filme fino magnético, e neste caso, os bits são correlacionados com direções opostas de magnetização (Fig. 7.25). Note que, quanto maior a magnetização remanente do filme fino, mais fácil se torna a leitura da informação gravada. Além disso, quanto mais larga a curva total, ou seja, quanto mais distante o caminho de ida da curva estiver do caminho de volta, significa maior estabilidade da informação gravada, pois maior é o campo necessário para reverter a magnetização do material. Por isso, os filmes finos para gravação magnética são desenvolvidos de forma a terem a maior área interna possível.

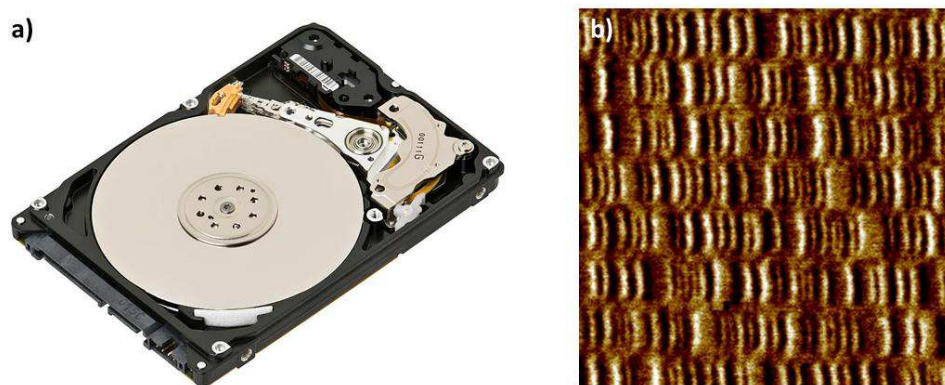


Fig. 7.25: **a)** Foto de um disco rígido de computador da marca Western Digital com capacidade de 500 GB, com a mídia magnética exposta. **b)** Imagem de microscopia de força magnética (MFM) da superfície de um disco rígido de computador onde os bits estão visíveis. As regiões claras e escuras representam magnetizações em sentidos opostos. A imagem se refere a uma área de $7 \times 7 \mu\text{m}^2$ e foi obtida pelo autor no laboratório de pesquisa multiusuário da UFABC. OBS: o disco rígido de (b) não é o mesmo do ilustrado em (a). ((a) Foto de Evan-Amos disponível via Creative Commons 3.0. <https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Laptop-hard-drive-exposed.jpg>

Os materiais magnéticos são também largamente usados em máquinas elétricas, representadas principalmente por geradores, transformadores e motores elétricos. A aplicação de materiais magnéticos nessa área é diversificada e complexa, mas em geral, ao contrário dos filmes finos para gravação magnética, os materiais desenvolvidos devem apresentar o mínimo de histerese. Isso porque, de forma geral, a histerese representa perda de energia nas máquinas elétricas. Pode-se demonstrar formalmente que a perda de energia é proporcional a área interna da curva de histerese. Dessa discussão podemos depreender que há uma relação fundamental entre informação, aqui contextualizado na análise sobre a memória de computador, e dissipação de energia. Essa relação possui grande alcance na ciência, abrangendo a termodinâmica, passando pela tecnologia da informação e está até sendo bastante discutida atualmente no campo da cosmologia dentro do contexto de buracos negros e do universo holográfico.

Podemos ilustrar essa relação com um experimento simples, que se identificará quem já pegou um garfo com dentes desalinhados e tentou realinhá-los. Imagine uma barra metálica. Sabe-se que para pequenas deformações, os metais em geral apresentam comportamentos elásticos. Quando a deformação é maior, deformações plásticas passam a ocorrer. A Fig. 7.26 ilustra o experimento. Imagine duas situações distintas. Na primeira (Fig. 7.26a), a barra é deformada levemente, ficando dentro do regime elástico. Nesse caso, quando a barra se encontra novamente livre das forças de deformação, ela volta ao seu estado inicial. Como o comportamento é elástico, não há dissipação de energia. Além disso, nada na barra indica que ela tenha passado por essa deformação, ou seja, não há memória do processo. Na segunda situação (Fig. 7.26b) as forças são mais significativas e a barra apresenta deformação plástica. Quando as forças são removidas a barra permanece torta, tendo uma memória do processo. Note que nesse caso há dissipação de energia. A histerese se comporta de forma análoga. Quando há histerese, há dissipação de energia e memória.

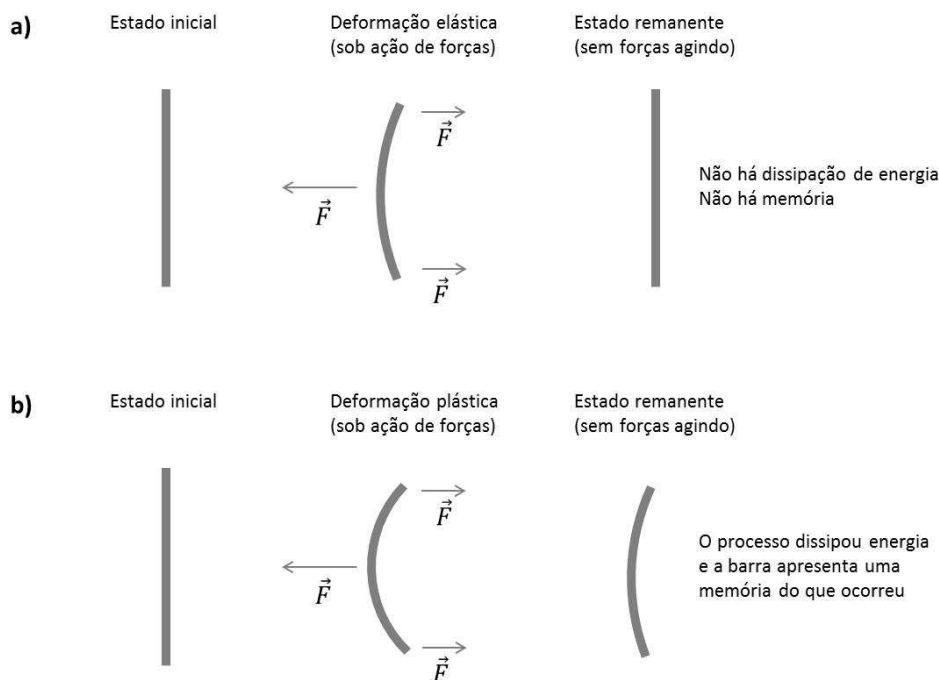


Fig. 7.26: Experimento com uma barra metálica ilustrando a relação entre dissipação de energia e memória. **a)** Quando a deformação se encontra dentro do regime elástico, não há memória do processo de deformação e nem dissipação de energia. **b)** No caso da deformação plástica, o estado final da barra apresenta uma memória do processo submetido, que está relacionada com a dissipação de energia.

A Fig. 7.27 mostra um possível gráfico relacionando a força aplicada na barra e sua deformação nos diferentes regimes discutidos na Fig. 7.26. Note que enquanto a barra está no regime elástico (Figs. 7.26a e 7.27a) o gráfico não apresenta histerese. Já no regime onde há deformação plástica e energia dissipada, surge um comportamento histerético da curva (Figs. 7.26b e 7.27b).

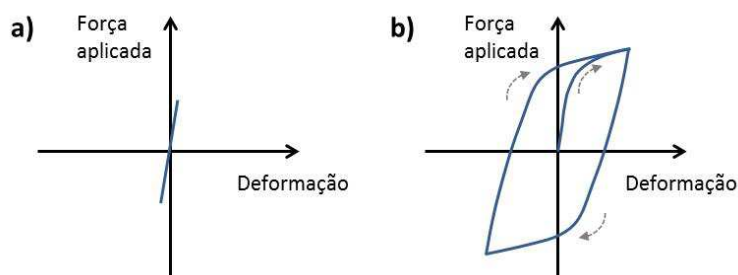


Fig. 7.27: Diagramas de curvas de histerese relacionadas ao processo de deformação de uma barra de metal ilustrado na Fig. 2.26. A representação nesse caso é esquemática e apela ao bom senso intuitivo do leitor e se inspira nos estabelecidos ensaios de tração muito utilizados na engenharia de materiais. **a)** curva referente a situação descrita na Fig. 7.26a onde a deformação se restringe ao regime elástico. **b)** curva referente a situação descrita na Fig. 7.26b onde há deformação plástica e dissipação de energia.

Até aqui, procuramos consolidar a relação entre histerese, dissipação de energia e memória (informação). Mas também já foi mencionado que os materiais magnéticos também são muito utilizados em motores, geradores e transformadores. Para que não haja dissipação de energia nas máquinas elétricas, há uma engenharia de processos na produção dos materiais

magnéticos para que estes apresentem o mínimo de histerese, como ilustra a Fig. 7.28, comparando com o comportamento histerético dos materiais magnéticos para armazenamento de dados. Ou seja, quando estamos interessados em tecnologias para geração, transmissão e uso da energia elétrica, desejamos dispositivos que tenham o mínimo de perdas.

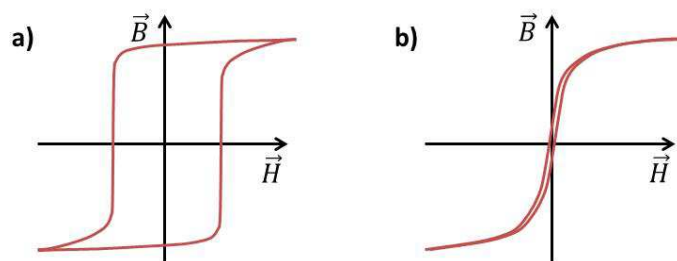


Fig. 7.28: Aspecto geral de uma curva de histerese de um material ferromagnético usado em **(a)** discos rígidos de computador e **(b)** em máquinas elétricas.

7.6 – Porque a permeabilidade é importante: o caso dos transformadores elétricos

Já discutimos com certa profundidade a relevância dos materiais magnéticos para as tecnologias da informação e para as máquinas elétricas. Com relação a esta última, vamos estudar em especial o caso dos transformadores para compreendermos melhor o papel destes materiais.

Quando discutimos sobre a Fig. 7.20, vimos como o aumento da permeabilidade magnética pode implicar em maior eficiência de dispositivos baseados na lei de indução de Faraday. A Fig. 7.29 mostra outra forma de entender como a alta permeabilidade magnética pode ajudar no funcionamento destes dispositivos. A Fig. 7.29a mostra uma região do espaço onde há presença de um campo magnético, representado na forma de linhas de força. Já a Fig. 7.29b ilustra que, ao colocarmos um material de alta permeabilidade magnética nessa região, as linhas tendem a passar pelo material. Daí é possível dizer que um material de alta permeabilidade magnética pode ser entendido como um material bastante “permeável para as linhas de força”, ou seja, estas linhas preferem passar por regiões mais permeáveis a estas.

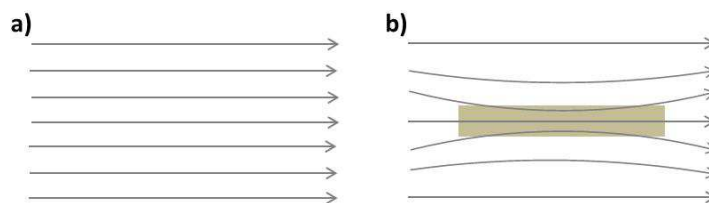


Fig. 7.29: **a)** Campo magnético em uma região do espaço representado por meio de linhas de força. **b)** Distorção das linhas de força na presença de um material com alta permeabilidade magnética (μ) como, por exemplo, um material ferromagnético. Note que o campo se intensifica dentro do material.

Vamos estudar o caso do transformador elétrico para entender como isso pode ser útil para o funcionamento de um dispositivo. Para isso, vamos recordar o que discutimos com relação a Fig. 7.7c e 7.7d, onde vimos que uma espira de corrente gera um campo magnético

muito parecido com o de um ímã permanente. Vamos considerar o sistema ilustrado na Fig. 7.30, onde temos à esquerda uma espira de corrente, denominada espira primária “P”, que é alimentada por uma fonte de tensão alternada, gerando uma corrente elétrica alternada. Essa corrente produz um campo magnético que também varia no tempo, na mesma frequência da tensão aplicada. A Fig. 7.30 representa uma situação instantânea, onde o polo norte está para cima. Se considerarmos a fonte de tensão a rede elétrica, teríamos uma inversão dos polos magnéticos com uma frequência de 60 vezes por segundo (60 Hz). Isso produz uma incessante variação da distribuição do campo magnético em toda a vizinhança da espira P.

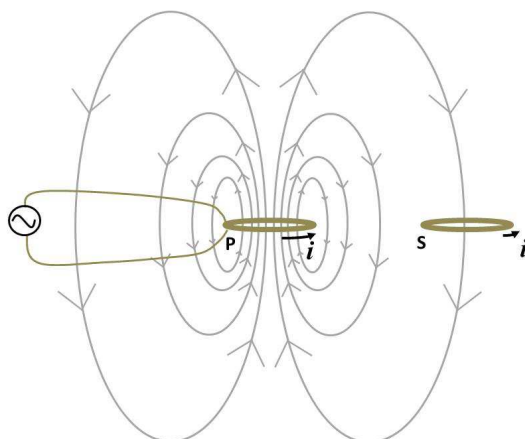


Fig. 7.30: Acoplamento indutivo entre duas espiras de corrente. Na espira primária (P) é aplicada uma tensão alternada. Uma tensão alternada de pequena intensidade é induzida na espira secundária que se manifesta na forma de uma corrente elétrica alternada.

A Fig. 7.30 também ilustra uma espira de corrente secundária “S” que é colocada próxima da espira “P”. Note que uma parte do campo magnético produzido pela espira “P” passa por dentro da espira “S”. Porém, como o campo produzido por “P” se distribui por todo o espaço ao redor, apenas uma pequena parte passa por “S”. Mesmo assim, esse pequeno campo variante é suficiente para induzir uma pequena tensão em “S”, de acordo com a lei de indução de Faraday descrito pela eq. 7.1. Sob o ponto de vista de aplicação tecnológica, esse efeito é fantástico: um circuito induz tensão em outro circuito independente, apenas por mera aproximação. De fato, há inúmeras aplicações tecnológicas baseadas nesse princípio. Aqui descreveremos os transformadores como um caso ilustrativo.

Em sua finalidade típica, os transformadores têm como função transferir toda a potência elétrica de um circuito primário para um circuito secundário. Como vimos, o sistema ilustrado na Fig. 7.30 transfere apenas uma pequena parte da potência elétrica e o motivo disso é que o campo produzido pela espira “P” se espalha por todo o espaço ao redor e apenas uma pequena parte acaba passando pela espira “S”. Por outro lado, na Fig. 7.29 vimos que podemos dirigir a orientação das linhas de força por meio de materiais de alta permeabilidade magnética. A Fig. 7.31 mostra como podemos usar esses materiais para a construção de um transformador mais eficiente. Entre as espiras “P” e “S” é introduzido um material de altíssima permeabilidade magnética, como o aço elétrico ou até mesmo o *permalloy* (veja tab. 7.1), formando um caminho fechado. Como vimos na Fig. 7.7, uma das coisas fundamentais sobre o campo magnético é que suas linhas de força sempre se apresentam em caminhos fechados. E a Fig. 7.31 apresenta uma forma em que, idealmente, todas as linhas de força produzidas por

“P” passam por “S” percorrendo seu caminho fechado de volta para “P”. Dessa forma, todo o fluxo magnético produzido por “P” passa também por “S” e dessa forma toda a potência elétrica de “P” é transferida para “S”. Se o núcleo for feito de aço elétrico, sua permeabilidade magnética é ~4000 vezes maior que a do ar. De forma aproximada, pode se dizer que apenas 0,025% (ou 1/4000) das linhas de força não passam pelo núcleo e se perdem para o ar.

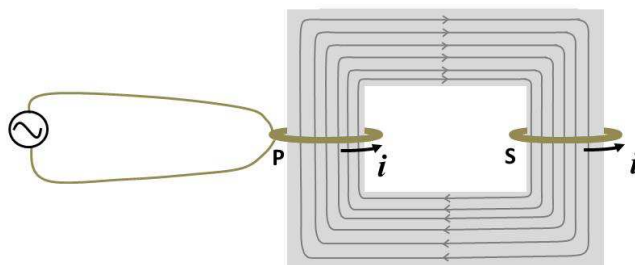


Fig. 7.31: Representação esquemática do princípio de funcionamento de um transformador, ressaltando a função do núcleo (em cinza) ao guiar as linhas de força magnéticas produzidas pela espira primária “P” até a espira secundária “S”. O núcleo é composto de um material de altíssima permeabilidade magnética.

O nome “transformador” vem do fato de que, além de transferir potência, os transformadores também alteram a relação entre tensão e corrente elétrica entre os circuitos primário e secundário. Os transformadores são fundamentais para os sistemas de transmissão de energia elétrica, os quais chamamos no dia-a-dia de “fios de alta tensão”. Por que transmitimos energia elétrica em fios de alta tensão? A resposta simples é: para reduzir as perdas de energia.

A energia elétrica é transportada em fios de cobre, que apresentam uma resistência elétrica, mesmo que pequena, principalmente porque as linhas de transmissão são extensas, podendo cruzar vários estados em alguns casos.

Com a finalidade de realizar um raciocínio simplificado, vamos considerar que o sistema de transmissão de energia elétrica de Itaipu até São Paulo tenha uma resistência elétrica “R”, e que nesse sistema passe uma corrente elétrica “i”. Das regras básicas de circuitos elétricos, podemos dizer que a energia dissipada (perdida) no processo é dada por:

$$P_{Dissipada} = Ri^2 \quad (7.21)$$

Ou seja, se reduzirmos a corrente pela metade, por exemplo, a potência dissipada cai a ¼. Por isso, é interessante reduzir a corrente elétrica quando se quer transmitir potência elétrica. Por outro lado, sabemos também que a potência de um circuito elétrico, que podemos chamar no contexto dessa discussão de potência útil é dada por:

$$P_{Útil} = Vi \quad (7.22)$$

Sendo apenas linearmente dependente da corrente “i” e da tensão “V”. Portanto, se desejamos transmitir uma dada potência útil com a menor corrente possível, devemos aumentar a tensão elétrica. Por isso, os fios de alta tensão chegam a ter centenas de milhares de volts. Em contrapartida, por questão de segurança, não podemos ter altas tensões presentes nas cidades e nos lares. Por isso, as tensões vão sendo gradativamente diminuídas

conforme as linhas de transmissão chegam perto das cidades e das residências. Essa função de alteração da tensão elétrica é feita pelos transformadores. Como isso é feito? Mais uma vez, a resposta passa por uma forma específica de uso da lei de indução de Faraday.

Partindo da representação esquemática da Fig. 7.31, podemos sofisticar um pouco mais o dispositivo fazendo com que as espiras primária e secundária sejam formadas por enrolamentos com número de voltas diferentes, como representado na Fig. 7.32a e ilustrado na Fig. 7.32b como esse dispositivo pode ser realizado na prática.

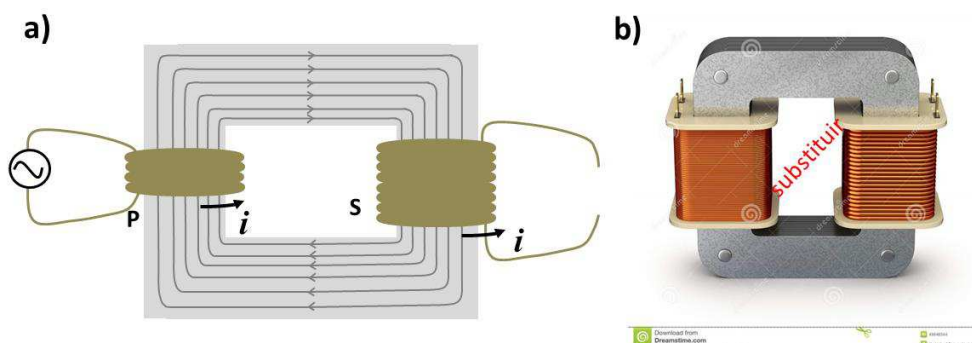


Fig. 7.32: a) Diagrama esquemático de um transformador elétrico onde os enrolamentos primário e secundário possuem número de voltas diferentes, resultando em alteração da relação entre tensão e corrente entre os circuitos primário e secundário. b) Fotografia de uma forma possível de realizar o dispositivo esquematizado em (a).

Vamos denominar o número de voltas dos enrolamentos primário e secundário de N_p e N_s respectivamente. A título de exemplo, vamos considerar que o enrolamento primário seja ligado a uma tomada doméstica, ou seja, uma fonte de tensão senoidal²⁶ com amplitude de 110V. Na notação formal, dizemos que a tensão do circuito primário vale $\varepsilon_p = 110V$. Vamos considerar também que o número de voltas do enrolamento secundário é o dobro do número de voltas do primário, ou seja, $N_s = 2N_p$. Se a tensão nos terminais do circuito secundário for medida, o valor será de $\varepsilon_s = 220V$. Há uma regra geral para a construção dos transformadores que diz que a relação entre as tensões dos circuitos primário e secundário é igual à relação entre o número de voltas entre eles. Ou seja, o diagrama da Fig. 7.32a mostra esquematicamente a construção de um transformador que altera a tensão de 110V para 220V. Vamos descrever porque isso ocorre.

A corrente elétrica no circuito primário acompanha a variação de tensão da tomada. Como a corrente gera o campo magnético, o fluxo de campo produzido tem a mesma variação da tensão elétrica. Mas assim como fizemos enquanto analisamos o caso simples da Fig. 7.30, podemos considerar um momento instantâneo. A análise que descrevemos para esse momento vale para qualquer outro. Digamos que nesse momento, o fluxo de campo magnético total produzido pelo enrolamento primário seja Φ_p . Note, porém que o fluxo total é

²⁶ Em uma frequência de 60 Hz no caso. O valor da frequência não é relevante. O que importa é que haja uma variação no tempo para que a indução ocorra. Lembre-se que a lei de indução de Faraday (eq. 7.1) envolve uma variação no tempo.

construído a partir da contribuição de cada espira do enrolamento primário²⁷, ou seja, de cada uma das N_p voltas. Dito de outra forma:

$$\Phi_p = N_p \Phi_1 \quad (7.23)$$

onde Φ_1 é o fluxo gerado por uma volta do enrolamento primário. De acordo com a lei de indução de Faraday, a taxa de variação de fluxo magnético gerado no instante analisado é proporcional a tensão do circuito primário nesse instante, ou seja:

$$\varepsilon_p = \frac{\Delta \Phi_p}{\Delta t} \quad (7.24)$$

Pode ser reescrito como:

$$\varepsilon_p = N_p \frac{\Delta \Phi_1}{\Delta t} \quad (7.25)$$

Rearranjando os termos:

$$\frac{\Delta \Phi_1}{\Delta t} = \frac{\varepsilon_p}{N_p} \quad (7.26)$$

Análise semelhante pode ser feita no enrolamento secundário. Note que a presença do núcleo faz com que o mesmo fluxo de campo total Φ_p que ocorre no enrolamento primário é transferido para a área interna do circuito secundário. Mas uma análise criteriosa deve ser feita para se avaliar a variação de fluxo no circuito secundário. Em uma análise pouco cuidadosa, alguém poderia concluir que a mesma variação de Φ_p naquele instante induz a tensão no circuito secundário da forma:

$$\varepsilon_s = \frac{\Delta \Phi_p}{\Delta t} \quad (7.27) \text{ (cuidado, forma incorreta!)}$$

levando a concluir que a mesma tensão do primário será induzida no circuito secundário. Essa análise é incorreta. Há uma sutileza aqui. Quanto se considera o núcleo, este transfere Φ_p da região interna do circuito primário para a região interna do circuito secundário. Porém, quando se analisa os circuitos, os fluxos totais em cada um deles são diferentes. A presença do núcleo faz com que a grandeza fundamental que se conserva no processo de acoplamento entre os dois circuitos é a variação de fluxo que ocorre por espira (volta) de corrente em cada circuito. Sendo assim, o fluxo de campo total no enrolamento secundário é:

$$\Phi_s = N_s \Phi_1 \quad (7.28)$$

Assim, de acordo com a lei de indução de Faraday, a tensão induzida no circuito secundário é dado por:

$$\varepsilon_s = \frac{\Delta \Phi_s}{\Delta t} = N_s \frac{\Delta \Phi_1}{\Delta t} \quad (7.29)$$

Rearranjando temos uma equação similar à equação 7.26:

$$\frac{\Delta \Phi_1}{\Delta t} = \frac{\varepsilon_s}{N_s} \quad (7.30)$$

²⁷ E claro, amplificado proporcionalmente devido a presença do núcleo ferromagnético.

Comparando as eq. 7.26 e 7.30, podemos dizer que:

$$\frac{\varepsilon_s}{N_s} = \frac{\varepsilon_p}{N_p} \quad \text{ou} \quad \frac{N_s}{N_p} = \frac{\varepsilon_s}{\varepsilon_p} \quad (7.31)$$

Onde demonstramos a relação já mencionada entre as tensões nos circuitos primário e secundário e seus respectivos números de voltas. Substituindo os valores que temos ($\varepsilon_p = 110\text{V}$ e $N_s = 2N_p$) temos

$$\frac{\varepsilon_s}{110} = \frac{2N_p}{N_p} \quad \text{ou seja,} \quad \varepsilon_s = 220$$

demonstrando porque a tensão de 110V será transformada em 220V no exemplo estudado.

Note que, como já mencionamos, a principal função dos transformadores é transferir potência elétrica entre os circuitos primário e secundário, alterando a relação entre tensão e corrente. Deduzimos aqui o que acontece com a tensão. Fica a cargo do leitor, verificar o que acontece com a relação entre a corrente elétrica nos dois circuitos no exemplo estudado.

É importante mencionar que o modelo apresentado aqui é simplificado, mas descreve razoavelmente bem o funcionamento de transformadores reais. O funcionamento destes depende de certos cuidados observados em sua construção, tais como o número de voltas dos enrolamentos (que em geral é alto como se pode observar na Fig. 7.32b) e de um fantástico trabalho de engenharia dos núcleos, desde o material utilizado até sua constituição, para que as condições de operação assumidas pelo modelo sejam observadas no funcionamento real em grau aceitável. Além disso, ajustes ao modelo devem ser acrescentados quando se deseja modelar o comportamento real de um transformador de forma mais acurada.

7.7 – Produção de energia elétrica

Terminamos onde começamos: na transformação de energia mecânica em energia elétrica. No Cap. 5 vimos como podemos transformar energia térmica em mecânica. Neste capítulo estudamos como transformar energia mecânica em elétrica. A maior parte da energia elétrica mundial é produzida a partir de ciclos térmicos. O Brasil é uma exceção, onde a maior parte vem das hidrelétricas. Em suma, não importa como se obtém energia mecânica, se a partir de máquinas térmicas, rios, ventos, ou marés. O importante é que a maior parte da energia elétrica é produzida a partir do movimento mecânico de um fluido de trabalho. Há exceções como as usinas fotovoltaicas.

A Fig. 7.33 mostra um diagrama esquemático de uma hidrelétrica. Como já discutido no Cap. 2 no escopo da Fig. 2.2, vimos como o movimento da água move turbinas que alimentam os geradores elétricos. Esse processo é mostrado em mais detalhes na Fig. 7.33a. Conceitualmente falando, esse capítulo nos ajuda a entender o que ocorre em uma parte essencial das usinas de potência, que são os geradores elétricos (Fig. 7.33b). Neles, há uma associação entre ímãs e enrolamentos elétricos, cujo movimento relativo entre eles faz com que a energia mecânica seja transformada em elétrica de acordo com a lei de indução de Faraday.

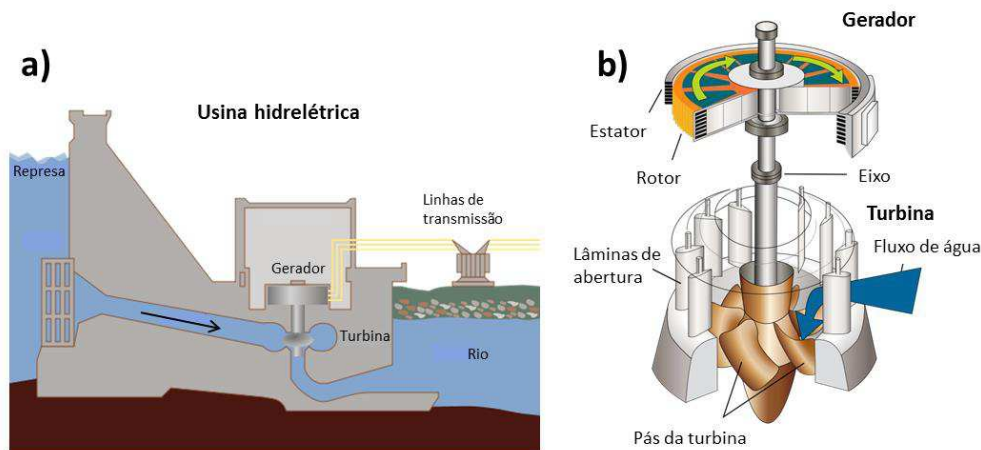


Fig. 7.33: a) Diagrama esquemático de uma usina hidrelétrica. b) Diagrama esquemático de um gerador elétrico associado a uma turbina hidráulica.

(a) Adaptado de: Tomia - Own work, CC BY 2.5, <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=3302749>

(b) Adaptado de: U.S. Army Corps of Engineers (Vector image: Gothika, Edit: Bammesk) - U.S. Army Corps of Engineers, ArchivedThis file was derived from: Water turbine.svg, Public Domain, <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=47101602>

Questionário

1 - Na Fig. 7.11 mostra o freio do tipo Foucault em um trem bala japonês. No texto é dito que o freio dissipa a energia cinética do trem provocando a frenagem. Partindo do princípio que a energia se conserva, para onde vai a energia cinética perdida pelo trem? O que ocorre nos sistemas de frenagem tradicionais, por atrito? Discuta.

2 – Um motor elétrico pode ser considerado como o reverso de um gerador elétrico. Justifique essa afirmação com o auxílio de desenhos esquemáticos contextualizados por meio da lei de indução de Faraday e força de Lorentz. Como isso está relacionado com o freio regenerativo de automóveis híbridos? Cite de forma contextualizada outro meio de transporte que utiliza dessa forma de freio regenerativo?

3 – Explique, com suas palavras, o que são materiais diamagnéticos, paramagnéticos e ferromagnéticos (quais são as diferenças).

4 – Porque os materiais magnéticos, principalmente os ferromagnéticos, são importantes para a tecnologia de máquinas elétricas?

5 – Porque a energia elétrica é transportada em fios de alta tensão? Baseie sua resposta em termos de potência elétrica e dissipação Joule.

6 – Porque os motores elétricos em geral possuem grandes quantidades de fios elétricos enrolados? Porque em geral são massivos? Que tipos de material existem nos motores elétricos e por quê?

7 – O que é um transformador elétrico? Faça um desenho esquemático indicando suas principais partes. Explique seu funcionamento. Se quisermos projetar um transformador que converta a tensão de 110 V para 10 V, qual deve ser a relação entre o número de espiras nos enrolamentos primários e secundários? E se a conversão fosse de 110V para 9V?

8 – Entre as equações 7.23 e 7.31 estudamos como ocorre a transformação da tensão elétrica entre o circuito primário e o secundário no transformador ilustrado na Fig. 7.32a. Nesse mesmo caso, o que ocorre com a relação entre as correntes observadas nos dois circuitos? (dica: note que a relação entre o circuito primário e secundário se dá pelo número de voltas e pela espessura do fio, como pode ser observado na Fig. 7.32b onde o número de voltas menor está à direita. A diferença da espessura do fio dá conta da alteração de corrente)

9 – A Fig. 7.29 mostra a deformação das linhas de campo quando há a presença de um material de alta permeabilidade. Faça o esboço de um desenho no caso da presença de um material com permeabilidade negativa. Como são chamados esses materiais?

10 – Note na Fig. 7.32b que o volume dos enrolamentos é o mesmo, embora eles tenham número de voltas diferente. Quais são as possíveis formas de explicar porque isso ocorre?

11 – O núcleo de um transformador pode ser construído com geometrias diferentes. As mais comuns são núcleos do tipo “C” e tipo “E” (em inglês “*core type*” e “*shell type*”). Discuta porque essas geometrias possuem funcionalidades compatíveis. Na sua discussão, desconsidere transformadores trifásicos, pois não abordamos esse tipo de circuito aqui.

12 – Um estudante de engenharia dedicado propôs uma nova geometria para construção de núcleo de transformador, que, segundo ele, é eficaz em transmitir todo o fluxo magnético do enrolamento primário para o enrolamento secundário e ainda apresenta as vantagens de ser mais simples e apresentar menor custo de produção. A geometria é representada em cinza na figura abaixo. Discuta porque essa geometria não possui a mesma eficiência das geometrias “C” e “E”.

