

10.4 Aplicações do ferromagnetismo e ferrimagnetismo

Os fenômenos do ferromagnetismo e ferrimagnetismo têm inúmeras aplicações. Já discutimos o uso do ferro nos transformadores. Usam-se ligas com alta permeabilidade e histerese estreita nesta aplicação para diminuir as perdas energéticas. Materiais com alta permeabilidade e histerese estreita se aplicam também na blindagem de campos magnéticos.

Tanto no caso dos transformadores como no caso da blindagem, o material de histerese estreita é usado no regime não saturado. Mas há também aplicações de materiais ferromagnéticos com histerese estreita que aproveitam justamente a possibilidade de saturar o material. Nas portas de fluxo¹, em inglês *fluxgate*, usa-se a saturação para medir campos magnéticos extremamente fracos, tipicamente na faixa de 0,1 nT até 1 mT.

Faremos uma experiência para entender o princípio destes medidores. Já sabemos que há um campo magnético razoavelmente uniforme na região entre as bobinas de Helmholtz. Agora introduzo uma bobina toroidal nesta região. A bobina de aproximadamente $1,7 \times 10^3$ espiras foi enrolada num anel de ferro². Como se esperava, o anel deforma as linhas de força do campo. A figura 10.4.1 mostra as linhas de campo reveladas com limalha de ferro. As linhas de força são sugadas para dentro do anel. Agora repito a experiência, mas injeto corrente na bobina toroidal com uma intensidade suficiente para levar o ferro em saturação. Como podemos ver na figura 10.4.2, o ferro saturado não deforma as linhas de campo.



¹ Os medidores portas de fluxo foram inventados em 1936 por H. Aschenbrenner e G. Goubau e independentemente em 1937 por F. Förster.

² (diâmetro interno = 49,70 mm, diâmetro externo = 70,15 mm e altura = 9,10 mm)

Fig. 10.4.1 Linhas de força do campo magnético em volta de um anel de ferro que foi introduzido no espaço entre bobinas de Helmholtz.

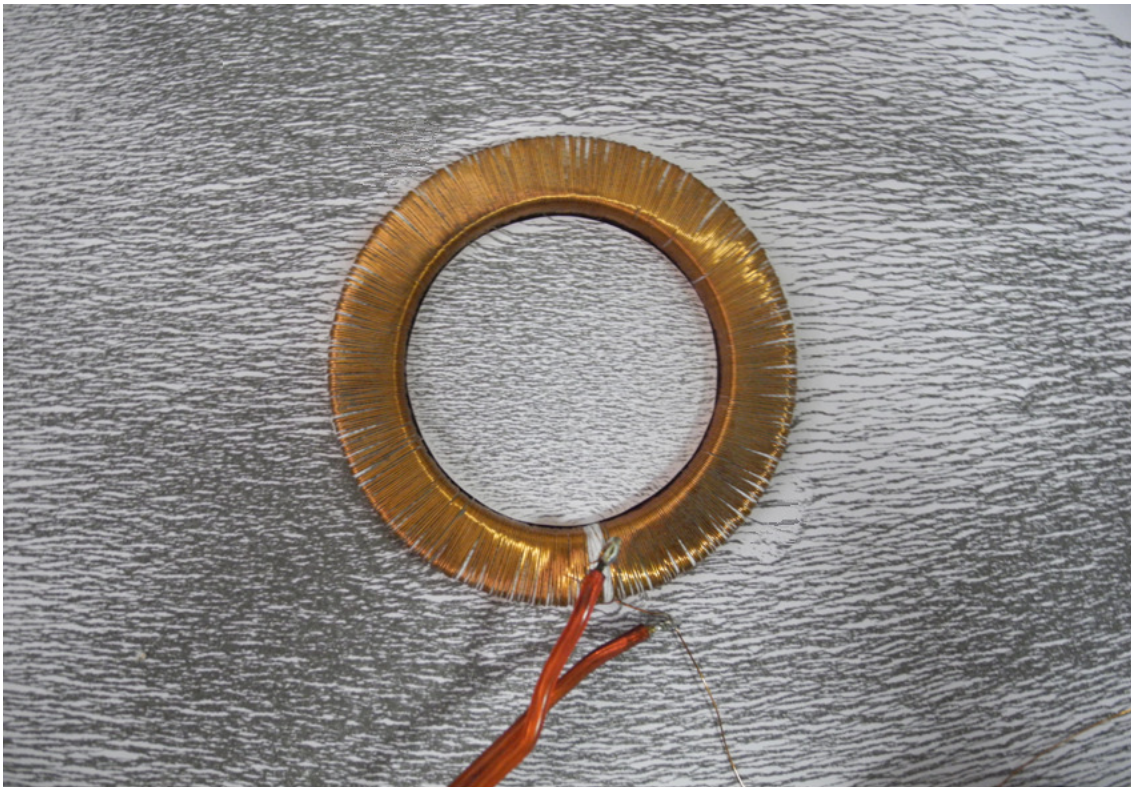


Fig. 10.4.2 Linhas de força do campo magnético em volta de um anel de ferro com magnetização saturada que foi introduzido no espaço entre bobinas de Helmholtz. A saturação foi gerada com uma corrente de 2,2 A injetada no solenoide toroidal de aproximadamente $1,7 \times 10^3$ espiras enrolada em 3 camadas.

Nas portas de fluxo, uma bobina de indução é enrolada em volta de uma bobina toroidal com núcleo ferromagnético como na figura 10.4.3. Quando este objeto é posto numa região com campo magnético, a passagem entre estado saturado e não saturado do anel cria alterações do fluxo magnético que atravessa a bobina de indução. Liga-se e desliga-se corrente na bobina toroidal e se medem os pulsos elétricos induzidos na bobina de indução. A intensidade destes pulsos permite medir o campo magnético que existia antes de colocar este medidor.

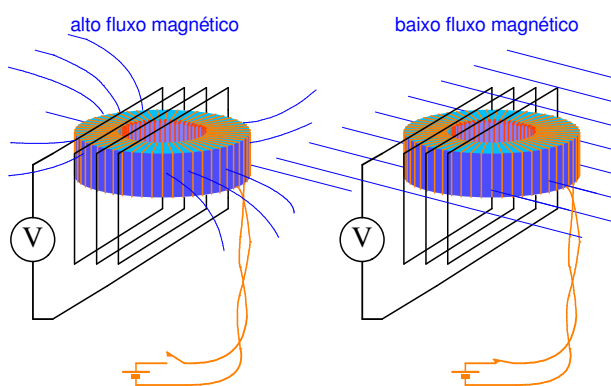


Fig. 10.4.3 Sonda porta de fluxo para medida de campo magnético. Na alternância entre alto e baixo fluxo magnético através da bobina de indução geram-se pulsos de tensão. Estes pulsos permitem medir o campo magnético.

A sonda Voyager I possui medidores do tipo porta de fluxo para medir o campo magnético no sistema solar³. Na Segunda Guerra Mundial, sondas porta de fluxo foram usadas em aviões para detectar submarinos. Como os

³ Ness, N. F., et al. : Magnetic field studies at Jupiter by Voyager 1: Preliminary results, Science, 204, 982-987, June 1979.

submarinos contêm considerável material ferromagnético, eles alteram o campo magnético da Terra nas suas vizinhanças ligeiramente e medidas muito precisas do campo permitem localizá-los. Na geologia, estas sondas também são usadas para detectar jazidas de determinados minerais e medidas do campo magnético no fundo dos oceanos com portas de fluxo revelaram o movimento das placas tectônicas⁴.

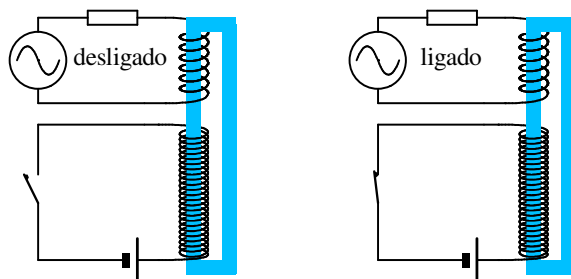


Fig. 10.4.4 Chaveamento da corrente num circuito AC através da saturação de um núcleo de um indutor.

A saturação de um núcleo ferromagnético pode também ser usada para controlar ou ligar e desligar corrente alternada. Controlar, ligar e desligar corrente pode ser um problema quando se trata de valores elevados de

corrente. Nestes casos, pode-se usar um indutor com núcleo de ferro que limita normalmente a corrente num circuito com fonte AC a valores muito pequenos. Além da bobina deste indutor, há uma segunda bobina no núcleo que permite levar o ferro para o estado de saturação injetando corrente DC nesta segunda bobina. Assim que o núcleo entrou em saturação, a indutância do circuito AC diminui drasticamente e a corrente neste circuito aumenta tremendamente. Hoje semicondutores são usados no lugar dos indutores com núcleo saturável em muitas das possíveis aplicações. Mas os indutores com núcleo saturável têm também algumas vantagens: a vida útil deste tipo de dispositivo é muito longa e eles são bastante robustos e não são facilmente destruídos por raios. Nos primeiros dias de radiotransmissão, estes indutores saturáveis foram também usados nas emissoras de rádio para produzir a modulação de amplitude.

No capítulo dos capacitores discutimos os piezoelétricos e mencionamos os osciladores de quartzo. Este efeito é baseado no fato de que em certos dielétricos uma mudança de polarização é acompanhada por uma mudança geométrica da amostra. Nos materiais ferromagnéticos, ocorre uma mudança similar da geometria quando se altera a magnetização da amostra. Este efeito é conhecido pelo nome de *magnetostricção*. Há uma aplicação deste fenômeno que encontramos no mundo moderno com frequência, embora a maioria das pessoas não se dê conta deste fato. Nas lojas, especialmente em livrarias, muitas mercadorias contêm uma fitinha que delata a pessoa que tenta levar a mercadoria sem pagar. Esta fitinha contém duas lâminas de material ferromagnético. Uma é de um material de histerese estreita que mostra uma magnetostricção considerável. O comprimento desta fita tem um valor bem determinado de tal forma que a fita entra em ressonância com oscilações mecânicas longitudinais quando excitada por um campo magnético que oscila com uma determinada frequência. Geralmente frequências de algumas dezenas quilohertz são usadas. Na porta da loja há duas bobinas uma de cada lado da porta. Uma gera este campo magnético oscilatório. Sem a presença da fita ressonante no entre-espaço das bobinas, a voltagem induzida na segunda bobina é relativamente fraca. Mas quando uma fita de uma mercadoria não paga se encontra entre as bobinas a oscilação ressonante induzida gera um campo forte que induz uma voltagem oscilatória considerável na bobina de detecção. Esta oscilação induzida delata o ladrão. Resta entender como o pagamento da mercadoria silencia o sinal. Para isto

⁴ Mason, Ronald G.; Raff, Arthur D. (1961). "Magnetic survey off the west coast of the United States between 32°N latitude and 42°N latitude". *Bulletin of the Geological Society of America*. 72 (8): 1259–66. Bibcode:1961GSAB...72.1259M. ISSN 0016-7606. doi:10.1130/0016-7606(1961)72[1259:MSOTWC]2.0.CO;2.

serve a segunda lâmina ferromagnética. A mudança do tamanho da fita oscilatória é proporcional à magnetização da mesma. Mas a magnetização deste material não é proporcional ao campo magnético aplicado. A relação entre magnetização e campo externamente aplicado é mais ou menos do tipo mostrado na figura 10.4.5. Se o campo oscilatório oscila em volta do valor zero, a resposta da lâmina é desprezivelmente pequena. Para ter uma resposta apreciável, a segunda lâmina que possui uma magnetização permanente cria um campo constante B_{DC} com um valor que coloca o estado da lâmina oscilatória justamente na parte mais íngreme da curva. Neste ponto, a resposta oscilatória é grande. Quando o freguês paga a mercadoria o funcionário do caixa expõe a fita a um campo magnético oscilatório forte. Ao retirá-la deste campo, a lâmina com magnetização permanente é desmagnetizada de tal forma que a lâmina oscilatória não fica mais exposta ao campo B_{DC} e conseqüentemente fica insensível.

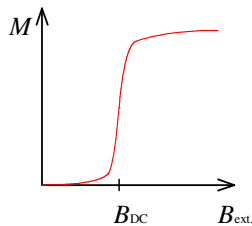
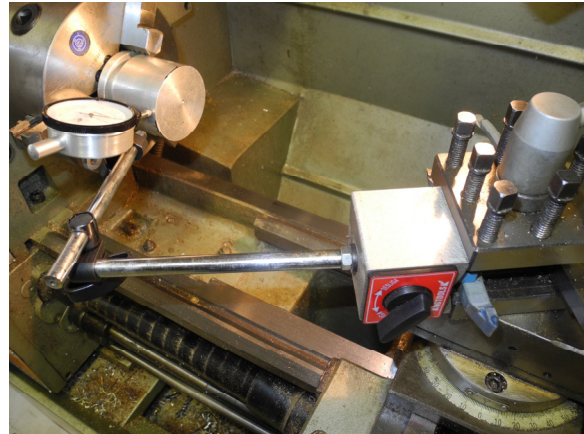


Fig. 10.4.5 Relação entre magnetização de campo magnético externamente aplicada numa fita que delata ladrão por oscilações ressonantes.

Há outras aplicações que requerem justamente o contrário de uma histerese estreita. Um material com histerese larga é o mais indicado para fabricar um ímã permanente. Ímãs permanentes são usados em motores elétricos, em geradores, em válvulas de gerar microondas, para monitoramento de posições de peças, em medidores de fluxo de líquidos condutores, para fixação de objetos e para selecionar objetos ferrosos em misturas. A figura 10.4.6 mostra um exemplo de fixação magnética. Neste exemplo, um medidor é fixado numa parte de um torno com a ajuda de uma base magnética.

Fig. 10.4.6 Fixação de um relógio comparador no castelo de um torno com a ajuda de uma base magnética. O relógio comparador é um instrumento de medida que mede pequenos deslocamentos. No caso, ele é usado para verificar se a peça a ser usinada está corretamente presa entre as castanhas da placa do torno de tal forma que o eixo de simetria da peça coincida com o eixo de rotação da árvore do torno. A base magnética possui uma alavanca que permite ligar e desligar a força magnética. Dentro da base magnética há um ímã permanente. A alavanca gira este ímã.



Com ímãs permanentes, podem-se construir engrenagens que transmitem movimento giratório através da parede de um recipiente hermeticamente fechado.

Um material ferromagnético ou ferrimagnético possui memória. Imaginem um palito ferromagnético num solenoide. Quando se aplica uma corrente no solenoide suficientemente intensa para levar o material do palito à saturação e se desliga a corrente depois, o palito fica com uma magnetização diferente de zero. O estado final da amostra seria um dos pontos **A** ou **B** no plano $\langle In, \vec{M} \cdot \hat{z} \rangle$ onde a histerese intercepta o eixo da magnetização como indicado na figura 10.4.7. Se a corrente aplicada era positiva, o estado final corresponde ao ponto **A** e uma corrente negativa deixa a amostra do estado **B**. Então o palito lembra do sinal da corrente. Este efeito é usado para guardar informação.

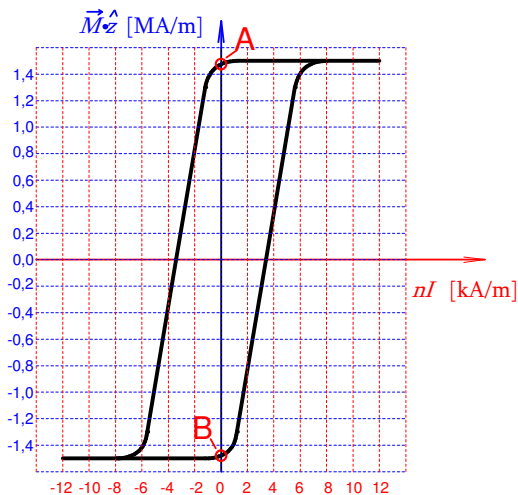


Fig. 10.4.7 Uma amostra ferromagnética fica no estado A ou no estado B após desligar um campo que a levou a saturação. O sinal do campo que magnetizou a amostra determina se o estado final é A ou B .

Antigos computadores usavam núcleos de material ferrimagnético em forma de toroide para armazenar dados. Uma grade de fios condutores formava uma matriz quadrada e os núcleos ficavam nos cruzamentos dos fios como mostra a figura 10.4.8. Um fio de leitura passava por todos os toroides.

Injeta-se corrente positiva nos fios x_i e y_j para colocar o toroide $\langle i, j \rangle$ no estado A . O valor desta corrente é escolhido de tal forma que os demais núcleos da linha i e da coluna j não mudem sua orientação de magnetização. Mas a dupla corrente que passa pelo núcleo $\langle i, j \rangle$ é suficiente para forçar uma magnetização que termina no estado A . Igualmente, para colocar o toroide $\langle i, j \rangle$ no estado B , corrente negativa é injetada nos fios x_i e y_j . Com o uso destes dois estados, um toroide armazena um bit de informação.

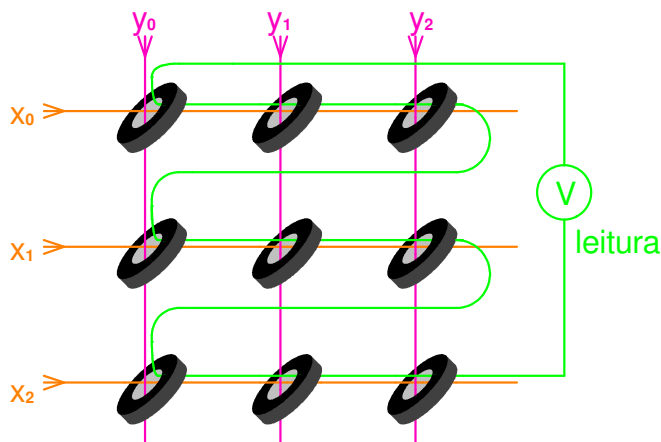


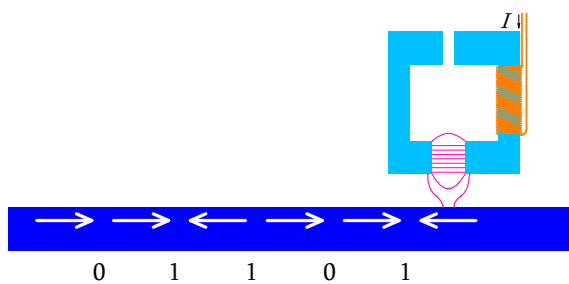
Fig. 10.4.8 Esquema de uma memória com núcleos ferrimagnéticos. Os fios são encapados de tal forma que não haja contato elétrico entre os fios x e y nos cruzamentos.

Esta informação seria inútil se não se pudesse ler o estado que foi gravado. Para ler o estado do bit $\langle i, j \rangle$, injeta-se corrente negativa nos fios x_i e y_j . Se o estado do bit $\langle i, j \rangle$ é A , esta injeção de corrente provoca uma repentina mudança de magnetização, e esta mudança rápida do fluxo magnético na malha do fio de leitura gera um pulso elétrico detectável no voltímetro do circuito de leitura. Se o estado do bit $\langle i, j \rangle$ é B , não ocorre uma mudança de magnetização do toroide e o fluxo magnético da malha de leitura sofre apenas uma fraca alteração pelas correntes nos fios x_i e y_j . Esta alteração de fluxo é ordens de grandeza menor do que aquela que ocorre na mudança de magnetização de tal forma que o pulso elétrico gerado não é detectado pelo voltímetro de leitura. Pela reação do voltímetro de leitura, descobre-se o estado do bit $\langle i, j \rangle$ que prevalecia antes da injeção das correntes de leitura.

Nos antigos computadores, várias matrizes deste tipo eram empilhadas uma em cima de outra. Os núcleos em cada matriz tinham distâncias de aproximadamente 1 mm.

Supondo também uma distância de 1 mm entre as matrizes, teríamos 10^6 bits por litro de memória. Comparada com modernos meios de armazenamento de informação, esta densidade de bits é ridiculamente pequena. Mas estas memórias de núcleos têm quatro grandes virtudes: qualquer endereço de informação pode-se acessar diretamente sem ter que percorrer uma sequência de dados, escrita e leitura são relativamente rápidas, a vida útil desta memória é extremamente longa e os dados não são voláteis, isto é, os dados ficam gravados mesmo desligando a eletricidade.

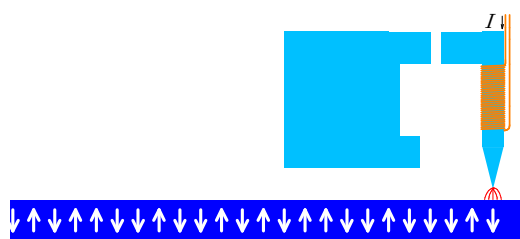
Densidades maiores de dados armazenados em forma não volátil consegue-se com fitas magnéticas e com discos magnéticos. Os discos HD ou HDD (= Hard Disc Drive) são feitos de algum material não ferromagnético, geralmente alumínio, cerâmica ou vidro, e possuem na superfície uma camada de 10 a 20 nanômetros de material ferromagnético coberto com uma camada protetora de carbono. O disco é mantido em rotação com velocidades angulares de alguns milhares de rotações por minuto. Uma cabeça de escrita e leitura flutua alguns nanômetros acima da superfície do disco. A cabeça de escrita e leitura possui um eletroímã cujo núcleo de material ferromagnético tem uma fenda perto da superfície do disco onde saem linhas do campo magnético, e este campo consegue magnetizar pequenas regiões na superfície do disco HD. Durante a leitura dos dados, não se injeta corrente na bobina deste eletroímã, mas esta bobina é, ou melhor, era (em HDs antigos) usada como bobina de indução. Quando duas regiões de magnetização opostas passam por baixo da cabeça de leitura, um pulso elétrico é induzido na bobina e este pulso é contado como um número 1. Por outro lado, a



passagem de duas regiões com a mesma magnetização não gera um pulso de indução e esta falta de pulso é interpretada como o número 0. A figura 10.4.9 mostra este sistema de armazenamento de dados esquematicamente.

Fig. 10.4.9 Gravação longitudinal de dados num disco HD.

Com a tentativa de aumentar a densidade de dados cada vez mais, surgiram dois problemas: na medida em que as regiões magnetizadas ficaram cada vez menores, os pulsos induzidos na bobina de leitura ficaram cada vez mais fracos, e a magnetização de



regiões muito pequenas sofriam alterações espontâneas de magnetização por flutuações térmicas.

Fig. 10.4.10 Gravação perpendicular num disco HD.

Para evitar estas alterações espontâneas da magnetização, passou-se a usar magnetização perpendicular ao plano do disco. Esta magnetização perpendicular resulta ser mais robusta contra flutuações térmicas. A figura 10.4.10 mostra como se cria magnetização na direção perpendicular.

As alterações de fluxo magnético numa bobina de indução provocadas pela passagem destas minúsculas regiões magnetizadas são difíceis de detectar. Por esta razão, usa-se um efeito magneto-elétrico conhecido como magneto-resistência gigante para a leitura dos campos das minúsculas regiões magnetizadas. Em 1856, Lord Kelvin tinha descoberto que a resistência elétrica em materiais ferromagnéticos depende da magnetização. Como a resistência elétrica é provocada por espalhamento dos elétrons

de condução, pode-se suspeitar que as probabilidades de espalhamento dependem da orientação do spin dos elétrons de condução relativa à direção da magnetização. Nos anos 80, Albert Fert⁵ e Peter Grünberg⁶ investigaram esta dependência da probabilidade de espalhamento mais detalhadamente, e em 1988 ambos descobriram independentemente o fenômeno da magneto-resistência gigante.

Em geral, a componente do spin de um elétron numa dada direção não é uma propriedade objetiva do elétron. Mas, quando o estado do elétron é tal que se pode atribuir esta componente ao elétron como uma das suas propriedades, esta componente pode ter somente os valores $+\hbar/2$ ou $-\hbar/2$. Pode-se mostrar que um conjunto de elétrons com orientações aleatórias dos spins se comporta como se a metade deles tivesse a componente $+\hbar/2$ e a outra metade, a componente $-\hbar/2$ numa dada direção do espaço. Então podemos fazer de conta que a metade dos elétrons de condução num cristal ferromagnético magnetizado tem uma componente do spin $+\hbar/2$ na direção da magnetização e a outra metade tem a componente $-\hbar/2$.

Estas duas orientações do spin relativas à magnetização têm probabilidades diferentes de serem espalhadas. Albert Fert e Peter Grünberg fabricaram dispositivos com duas camadas finas de material ferromagnético separados por alguns nanômetros de condutor não magnético. O material condutor e sua espessura foram escolhidos de tal forma que os elétrons de condução estabelecessem um acoplamento antiferromagnético entre as duas camadas ferromagnéticas⁷. Então normalmente a magnetização das camadas magnéticas tem orientações opostas nas duas camadas. Quando um elétron de condução atravessa este sanduíche de camadas ferromagnéticas, ele é sempre fortemente espalhado em uma das camadas ferromagnéticas como indicado na figura 10.4.11. O spin dos elétrons geralmente não sofre alteração no espalhamento. Pode-se representar o sanduíche com um circuito equivalente a dois trajetos em paralelo, um trajeto representando os elétrons com spin com orientação no sentido da magnetização da primeira camada e outro, com o spin oposto. Em cada trajeto, há uma resistência grande (muito espalhamento) e uma pequena (pouco espalhamento). Como há uma resistência grande em ambos os trajetos, a resistência equivalente é grande.

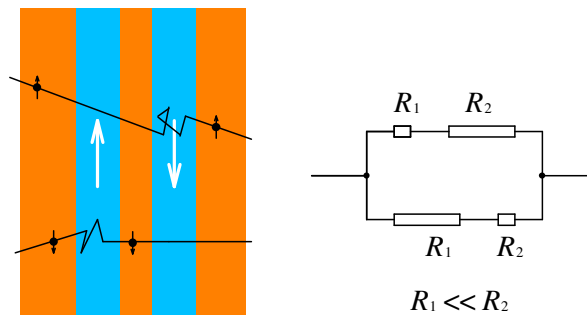


Fig. 10.4.11 Espalhamentos de elétrons de condução na passagem através de um sanduíche de condutores ferromagnéticos com magnetizações opostas.

⁵ Albert Louis François Fert (07/04/1938 -)

⁶ Peter Andréas Grünberg (18/05/1939 – antes do dia 08/04/2018)

⁷ Ruderman, M. A.; Kittel, C. (1954). "Indirect Exchange Coupling of Nuclear Magnetic Moments by Conduction Electrons". *Physical Review*. **96**: 99. doi:10.1103/PhysRev.96.99.

Kasuya, Tadao (1956). "A Theory of Metallic Ferro- and Antiferromagnetism on Zener's Model". *Progress of Theoretical Physics*. **16**: 45. doi:10.1143/PTP.16.45.

Van Vleck, J. H. (1962). "Note on the Interactions between the Spins of Magnetic Ions or Nuclei in Metals". *Reviews of Modern Physics*. **34** (4): 681. doi:10.1103/RevModPhys.34.681.

Quando se aplica neste dispositivo um campo magnético suficientemente forte para quebrar o acoplamento antiferromagnético das camadas, ambas as camadas ficam com a mesma magnetização. Neste caso, um dos trajetos do circuito equivalente contém dois resistores grandes em série, e o outro, dois resistores pequenos. A figura 10.4.12 mostra esta situação. A resistência equivalente é pequena.

Usa-se um dispositivo ligeiramente diferente na aplicação deste fenômeno para a leitura da informação do disco HD. A camada condutora não magnética é escolhida de tal forma que não ocorre o acoplamento antiferromagnético, e uma das camadas ferromagnéticas é feita de um material cuja magnetização é tão estável que não sofre alteração com os campos externamente aplicados pelo disco HD. A magnetização da outra camada ferromagnética é facilmente alterável, e sua magnetização segue a das regiões do HD. Desta maneira, a medida da resistência deste dispositivo informa a orientação da magnetização das regiões no disco HD. A figura 10.4.13 mostra uma fotografia de um HDD aberto.

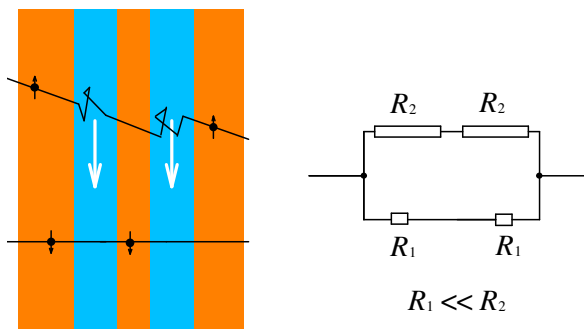


Fig. 10.4.12 Espalhamentos de elétrons de condução na passagem através de um sanduíche de condutores ferromagnéticos com magnetizações da mesma orientação.

Fig. 10.4.13 HDD aberto. Imagem da Wikipedia: Autor Eric Gaba, Wikimedia Commons user Sting, CC BY-SA 3.0, <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=11278668>



A tendência tecnológica é de substituir técnicas analógicas por técnicas digitais. Mesmo assim vale a pena discutir antigas técnicas de armazenar informação analógica. As antigas fitas magnéticas para gravação de som constituem um exemplo interessante. Um eletroímã magnetiza uma fina camada com cristais de óxido de ferro Fe_2O_3 na superfície de uma fita de plástico enquanto a fita passa na frente do eletroímã. A meta é de armazenar informação sobre um valor $a(t)$ que pode, por exemplo, corresponder a uma voltagem gerada por um microfone. O problema é que a magnetização \vec{M} que resulta depois da aplicação de um campo \vec{H} não é proporcional ao campo aplicado. Para garantir uma resposta aproximadamente linear precisa-se de algum artifício genial.

O que se usa é o fato de que a função $\text{sen}(\varphi)$ depende de forma aproximadamente linear da variável $\varphi - \varphi_0$ na proximidade de um zero da função: $\text{sen}(\varphi_0) = 0$, $\text{sen}(\varphi) \approx \pm(\varphi - \varphi_0)$ para $|\varphi - \varphi_0| \ll 1$.

Aplica-se um campo H ⁸ na fita que tem uma pequena parcela H_a proporcional ao sinal de áudio $a(t)$ e uma parcela oscilatória $A \text{sen}(\omega t)$ com uma amplitude A muito maior que o campo H_A necessário para saturar os cristais da fita magnética e muito maior que o sinal de áudio: $H = H_a + A \text{sen}(\omega t)$ com $A \gg H_A > H_a$.

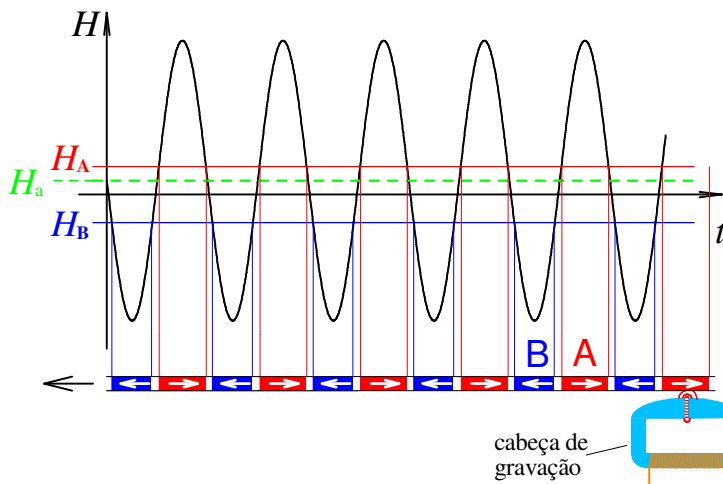


Fig. 10.4.14 Gravação de um sinal de áudio H_a com a técnica de *AC biasing*. A fita magnética passa pela cabeça de gravação movendo-se da direita para a esquerda. As regiões alternadamente magnetizadas para frente (B) e para trás (A) não têm o mesmo comprimento, e a diferença destes comprimentos é aproximadamente proporcional ao sinal de áudio H_a . H_A e H_B são os valores de saturação que deixam a fita no estado A ou B respectivamente.

A frequência deste sinal oscilatório é geralmente algo na ordem de 100 kHz, isto é, uma frequência muito maior que as frequências do sinal de áudio. Quando o campo H aplicado pela fenda do eletroímã ultrapassa um valor crítico H_A , os cristais da região na frente da fenda entram em saturação e ficam depois no estado A (usando aqui a nomenclatura que usamos na figura 10.4.2). Enquanto o campo aplicado for menor que um valor crítico H_B , os cristais saturam e ficam com a magnetização B. Devido ao campo H_a do sinal de áudio, os comprimentos das regiões do tipo A e B não têm o mesmo comprimento. A diferença de comprimentos é aproximadamente proporcional ao sinal de áudio. Na leitura, usa-se uma cabeça com uma fenda mais larga, e esta cabeça enxerga apenas uma magnetização média. Esta média é então aproximadamente proporcional ao sinal de áudio a . Na literatura de língua inglesa, esta técnica é chamada de *AC biasing*.

Iniciamos este capítulo e esta seção com transformadores. Agora voltaremos a este assunto com um tipo muito especial de transformador: o fogão de indução. Discutiremos agora o papel do ferro no fundo das panelas usadas em fogões de indução.

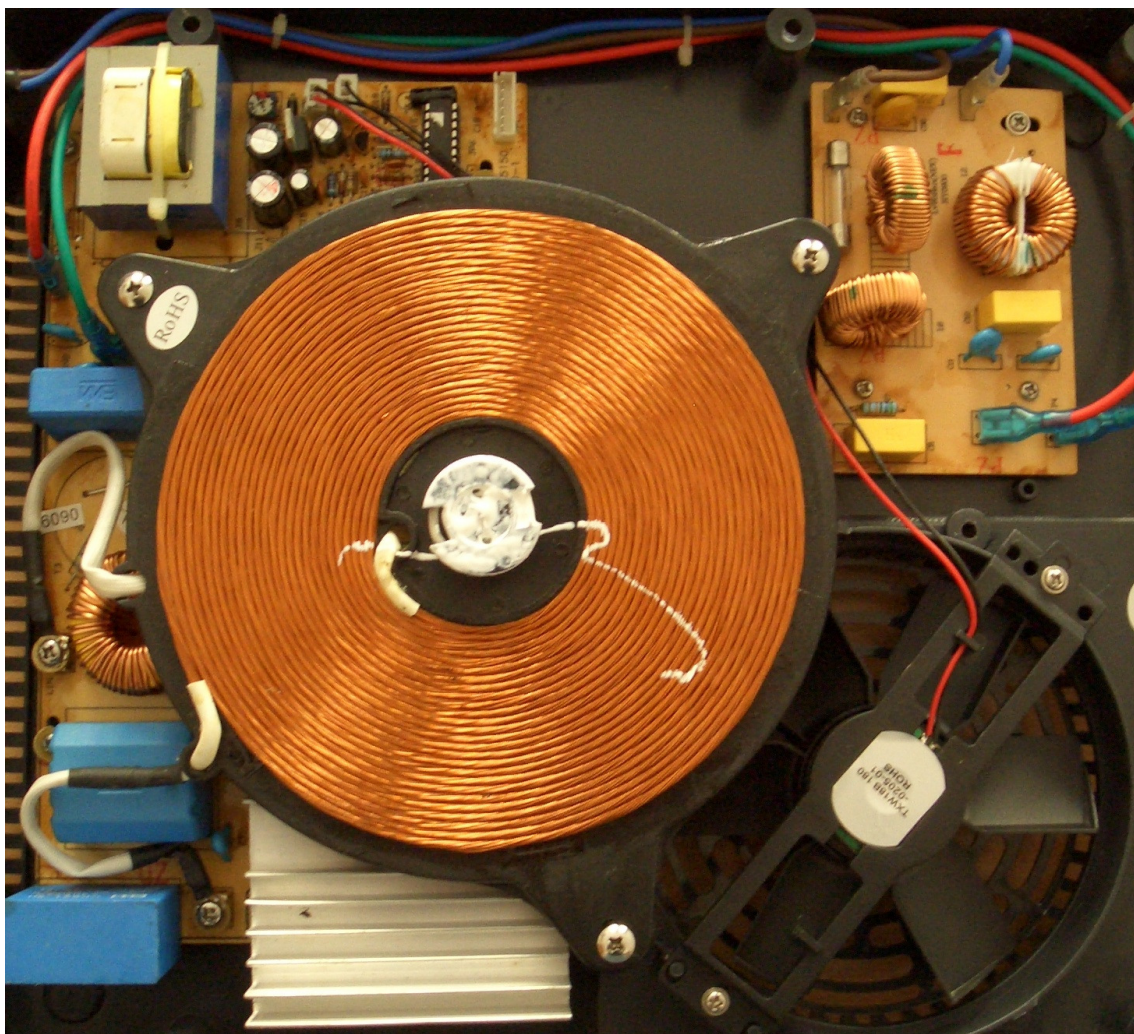
Em muitos países, a população prefere usar fogões elétricos no lugar de fogões a gás. Esta preferência é motivada pelo perigo que o gás apresenta. Durante muitas décadas, fogões elétricos tinham placas quentes aquecidas por resistências elétricas. Mas um bom cozinheiro não gosta de cozinhar nestas placas quentes. Elas têm muita capacidade térmica e reagem lentamente. Enquanto um fogão a gás deixa de fornecer calor no mesmo instante em que se desliga a chama; uma placa quente fornece calor ainda minutos após do desligamento da eletricidade. Mas inventou-se um outro tipo de fogão elétrico que reage tão rapidamente quanto um fogão a gás. A invenção deste fogão de

⁸ Aqui não uso notação vetorial, podemos entender H como a componente do vetor \vec{H} na direção contrária à do movimento da fita.

indução é antiga; a ideia existia já no início do século 20. Mas somente depois do desenvolvimento dos transistores, estes fogões tiveram uma difusão maior no mercado.

A ideia dos fogões de indução é simples: uma bobina alimentada com corrente AC de algumas dezenas de quilohertz gera um campo magnético oscilatório, e este campo induz correntes de Foucault no fundo metálico da panela que contém os alimentos. A transferência de energia da bobina para o fundo da panela é trabalho eletromagnético, e depois esta energia é transferida como calor para os alimentos contidos na panela. A figura 10.4.15 mostra a eletrônica e a bobina que gera o campo oscilatório de um fogão de indução aberto. Estes elementos ficam abaixo de um vidro sobre o qual se apoia a panela com os alimentos.

Fig.10.4.15 Interior de um fogão de indução. A bobina caracol que gera o campo magnético oscilatório se destaca. Imagem tomada da Wikipedia: By Wdwd - Own work, CC BY-SA 3.0, <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=3753862>



O fogão de indução reage tão rapidamente quanto o fogão a gás sem apresentar os perigos de explosão e incêndio deste. Mas ele tem uma desvantagem: ele requer panelas especiais com material ferromagnético no fundo delas. Além disso, o campo magnético oscilatório apresenta um potencial perigo. Este campo poderia induzir correntes não apenas no fundo da panela, mas também no tecido vivo do cozinheiro causando danos à saúde. Deve-se limitar a região de altos valores deste campo oscilante.

Para dar uma ideia da configuração do campo magnético gerado por uma bobina caracol chata como aqueles nos fogões de indução, enrolei uma bobina caracol colando as espiras num disco CD, montei a bobina atravessando uma mesa de isopor, injetei corrente nesta bobina e revelei as linhas de campo com limalha de ferro espalhada na superfície da mesa. A figura 10.04.16 mostra o resultado desta experiência. Perto da borda externa da bobina, as linhas de campo não se estendem muito e não há perigo para o cozinheiro. Mas as linhas de campo que passam pelo centro da bobina percorrem um longo caminho e apresentam um perigo.

Fig. 10.04.16 Linhas de campo magnético gerado por uma bobina caracol.



Este perigo é removido pelo fundo condutor da panela. As correntes induzidas no metal geram um campo magnético contrário. O parâmetro relevante para saber se este campo contrário realmente elimina estas linhas longas de campo é a profundidade de penetração do efeito skin que mencionamos na seção 9.6. Esta profundidade δ é aquela na qual os campos decaem por um fator e . Sabe-se que este parâmetro é aproximadamente relacionado com a resistividade ρ do condutor,

com a permeabilidade magnética μ e com a frequência angular ω do campo oscilatório:

$$\delta = \sqrt{\frac{2\rho}{\omega\mu}}$$

Para alumínio com $\rho \approx 26,5 \times 10^{-9} \Omega\text{m}$, $\mu \approx \mu_0 = 4\pi \times 10^{-7} \text{Vs/Am}$ e uma frequência angular de $\omega = 25 \times 10^3 \text{s}^{-1} \times 2\pi$, temos $\delta \approx 0,9 \text{mm}$. Então, com uma panela com um fundo de 5 mm de espessura, o perigo do campo é bem controlado. Mas teríamos outro problema. O condutor que recebe o trabalho elétrico seria essencialmente um disco de alumínio de uma espessura de um milímetro. A resistência deste receptor de energia é extremamente baixa. Lembrem-se da nossa discussão da questão energética quando introduzimos o conceito de casamento de impedância (seção 5.5)? Quando a resistência do receptor é muito menor que a resistência interna da fonte, quase toda energia é gasta na própria fonte. No caso de casamento de impedância, a metade da energia é gasta na fonte, e a outra metade, no receptor. Para minimizar as perdas energéticas, a resistência do receptor deve ser grande em comparação com a resistência interna da fonte. Então precisamos de um disco muito fino que receba a energia e que tenha alta resistividade. Então δ deve ser pequeno e, ao mesmo tempo, ρ grande. Isto significa que a permeabilidade magnética μ deve ser grande. Isto explica a necessidade de haver um material ferromagnético no fundo das panelas.

Podemos entender a necessidade do material ferromagnético também analisando o vetor de Poynting. A potência absorvida pelo fundo da panela é a integral do vetor $\vec{E} \times \vec{H}$ integrado sobre a superfície do fundo da panela. Somente as componentes tangenciais dos campos \vec{E} e \vec{H} entram nesta integral. Estas componentes são contínuas na superfície. Então podemos olhar os valores dentro no material perto da superfície. Um dado valor de potência pode ser obtido com grandes valores de \vec{E} e pequenos valores de \vec{H} ou, ao contrário, com pequenos valores de \vec{E} e grandes valores de \vec{H} . O campo \vec{H} é associado à densidade de corrente de condução $\text{rot } \vec{H} = \vec{j}_C$, se desprezamos a

corrente de deslocamento⁹. O campo \vec{E} se relaciona com a voltagem. Então a opção $\langle \vec{E} \text{ grande}, \vec{H} \text{ pequeno} \rangle$ equivale a uma resistência interna do receptor grande, e é esta a opção que se deve escolher para evitar perdas de energia na fonte. Por outro lado, o campo \vec{E} é atrelado ao campo \vec{B} pela lei de indução: $\text{rot } \vec{E} = -\partial \vec{B} / \partial t$. Então precisamos de um \vec{B} grande e \vec{H} pequeno, o que significa uma permeabilidade magnética grande.

A eletrônica do fogão percebe quando não há panela sobre a bobina caracol, ou quando há uma panela com fundo sem material ferromagnético. Nestes casos, a corrente alternada que alimenta a bobina é automaticamente desligada.

⁹ O quociente das amplitudes de $|\vec{j}|$ e $|\partial \vec{D} / \partial t|$ é dado por $\sigma / \omega \epsilon$. Com um valor típico da condutividade $\sigma \approx 10^7 \Omega^{-1} \text{m}^{-1}$ e com frequências de algumas dezenas de quilohertz temos $\sigma / \omega \epsilon \gg 1$.