UNICAMP – Universidade Estadual de Campinas

F 895 – Projeto de Curso

Elaboração de um Trilho MagLev Para Experimentos Didáticos

Aluno: Fabrício Oliveira de Carvalho R.A.016022
Orientador: Dirceu da Silva / Mauro M. G. Carvalho
Coordenador: Jose Joaquim Lunazzi

ELABORAÇÃO DE UM TRILHO MAGLEV PARA EXPERIMENTOS DIDÁTICOS

Fabrício Oliveira de Carvalho
R.A. 016022
Orientador: Dirceu Silva / Mauro M. G. Carvalho

- Resumo

Há muito a levitação é um objeto de desejo do homem. Com as tecnologias mais modernas já é possível fazer um trem levitar utilizando eletroímãs e supercondutores, os famosos trens Maglev[1][2].

A propriedade da supercondutividade foi descoberta em 1911 por H. Kamerlingh Onnes[3] e um dos experimentos mais famosos é a levitação de um imã sobre um supercondutor, como mostra a figura 1.

Fig. 1: Imã flutuando sobre o supercondutor.

Contudo, experimentos de levitação magnetica usando única e exclusivamente imãs permanentes não foram desenvolvidos. Neste projeto teve-se por objetivo desenvolver um experimento que envolvesse levitação magnética utilizando apenas imãs permanentes e mostrarei por que não foi possível consegui-lo.

- Introdução

Em 1911, o físico alemão H. Kamerlingh Onnes descobriu que quando o mercúrio é resfriado à temperatura de 4,2K, sua resistência cai a zero, ou seja, não há dissipação de energia quando percorrido por uma corrente elétrica (não muito grande).

Durante muitos anos a partir de então, físicos de todo mundo começaram a desenvolver esses elementos supercondutores e a estudar suas propriedades. Descobriram então, que um material supercondutor tinha a propriedade de levitar um imã permanente que fosse aproximado dele devido à sua propriedade diamagnética.

Então, usando essas propriedades, foram desenvolvidos trens flutuantes - mostrado na figura 2 - (MagLev e Transrapid[1][2]), que já são utilizados na China e no Japão e vêm sendo testados desde 1997.

Esses trens podem atingir velocidades impressionantes de mais de 580km/h na reta[4], podendo atingir mais de 400km/h em uma curva de raio 2,8km.

Fig. 2: Trem MagLev
e seu trilho

A relevância desses trens é o baixo custo do combustível para resfriar as cerâmicas supercondutoras, além de poluírem muito menos que os trens normais e atingirem velocidades muito maiores.

Todavia, para realizar a levitação desses trens são utilizados supercondutores que necessitam baixas temperaturas para apresentarem essas características.

Logo, para um experimento de ensino, o investimento não compensa, por conta dos custos dos materiais.

Para tentar resolver esse problema, realizei alguns experimentos com imãs permanentes e elaborei outros, para realizar alguns testes. Esses experimentos estão esquematizados na figura 3.

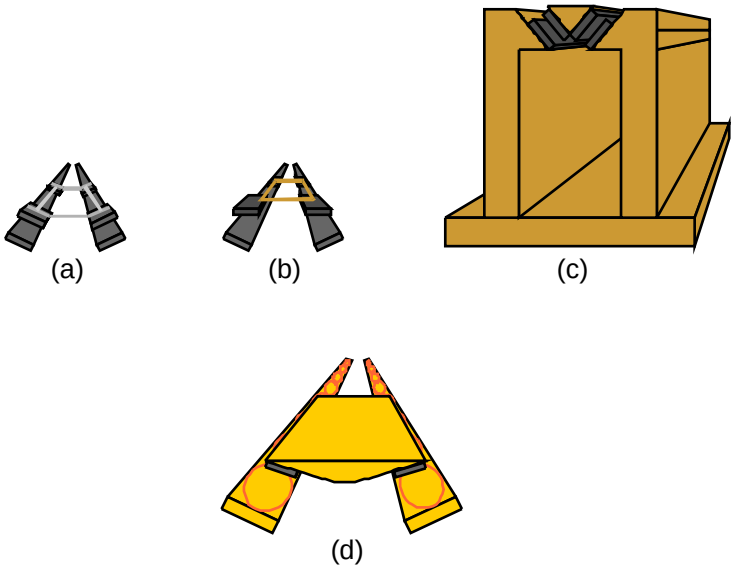


Fig. 3: Arranjos experimentais montados: Trilhos de imã de geladeira e carrinho com o corpo de arame (a) Trilhos de imã de geladeira e carrinho com o corpo de madeira (b) Trilhos de imã de geladeira mais próximos e carrinho com o corpo rígido de madeira (c) Arranjo experimental com eletroímãs nas laterais e carrinho com imã permanente.

- Experimento 1 e 2:

O experimento 1 e o 2 diferenciaram-se apenas pela inclinação dos imãs nos carrinhos. Nesses experimentos foram utilizados imãs permanentes que são facilmente encontrados na porta de geladeira.

Inicialmente montei um trilho de imã permanente, cuja magnetização esta mostrada na figura 4.

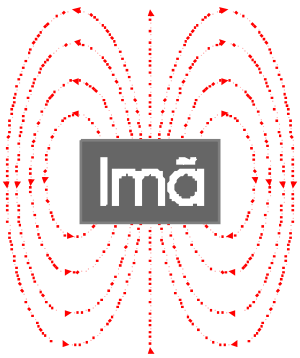


Fig. 4: Campo magnético ao redor do imã permanente

Montei então dois carrinhos. O primeiro possui quatro imãs e seu corpo foi feito em madeira, como indicado na figura 5(a). Como podemos perceber através da figura, os imãs ficaram em uma posição paralela ao plano do trilho.

Já para o segundo carrinho, o que também possui quatro imãs, o corpo foi feito com o uso de arame, e ele ficou com uma inclinação paralela ao trilho, como mostra a figura 5(b).

a b

Fig. 5: Carrinho de madeira feito para o experimento 1(a), e carrinho de arame feito para o experimento 2 (b)

A pequena inclinação do trilho foi proposital, para criar componentes da força magnética de forma a equilibrar os carrinhos no trilho, evitando a ação de torques nos carrinhos, conforme mostrado na figura 6.

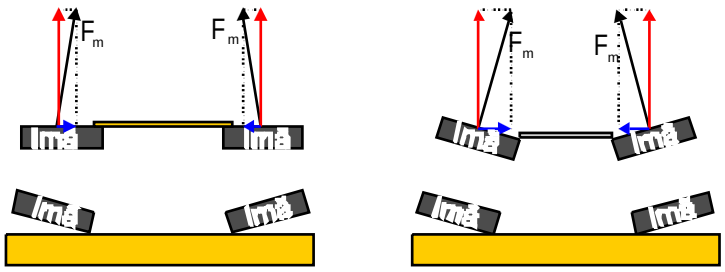


Fig. 6: Forças atuando sobre os imãs dos carrinhos.

Fig. 7: Foto do trilho montado.

- Experimento 3:

Nesse experimento foi montado um trilho usando imãs permanentes de porta de geladeira, mas o carrinho foi feito de madeira e a distância entre os dois trilhos foi reduzida para tentar aumentar a repulsão entre os trilhos e o carrinho, criando um poço potencial entre os trilhos, o que poderia oferecer uma maior estabilidade para o carrinho.

O motivo de o carrinho ter sido feito de madeira foi tentar aumentar o seu peso e então evitar sua rotação. O experimento está mostrado na figura 8.

Fig. 8: Foto do trilho utilizado
no experimento 3

- Experimento 4:

O experimento 4 é o mais elaborado, porém não foi realizado, por motivos já citados no pré-relatório. Trata-se de dois trilhos com bobinas acopladas e um carinho com imã permanente associados à ele.

Ele funcionaria com eletroímãs que deveriam repelir os imãs, porém esse sistema não foi possível de ser conseguido.

- Resultados Experimentais

Após diversas tentativas, os três experimentos não funcionaram. O problema decorre do fato de toda a forma de equilíbrio com imãs permanentes, serem equilíbrios instáveis.

Dessa forma, toda e qualquer interferência externa que atue sobre os carrinhos, proporcionam um deslocamento da posição de equilíbrio.

Uma ilustração disso é simples. Basta imaginar uma bola no alto de uma montanha como mostrada na figura 9(a). Na posição indicada, ela está equilibrada, porém, se essa bola for deslocada um pouco para qualquer lado, ela irá sair da posição de equilíbrio e irá para uma nova posição, conforme ilustra a figura 9(b).

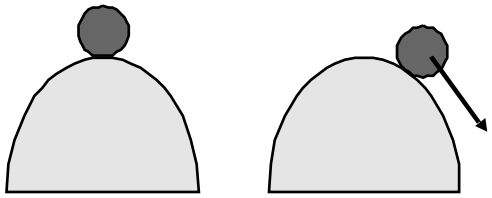


Fig. 9: Bola em equilíbrio instável (a) e bola fora de equilíbrio (b)

No caso dos carrinhos essa posição de equilíbrio forma uma linha ao longo do trilho (Figura 10). Porém, como o imã de geladeira tem dimensões muito pequenas, seu campo magnético não é constante ao longo de sua largura, como é mostrado também na figura 10.

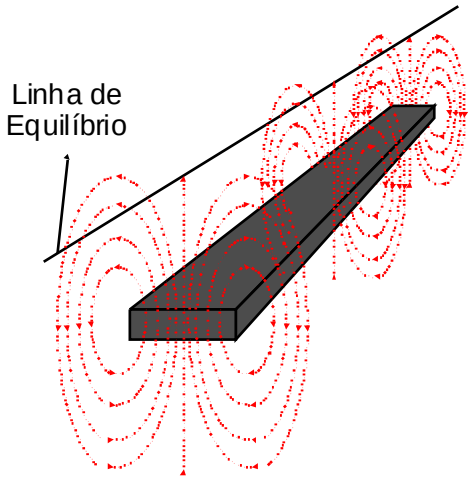


Fig. 10: A linha de equilíbrio criada devido ao campo não constante do imã.

Sendo assim, qualquer que seja o deslocamento do em relação a esta posição de equilíbrio faz com que haja um torque atuando sobre os imãs do carrinho e, conseqüentemente, faça com que ele seja atraído pelo trilho (figura11).

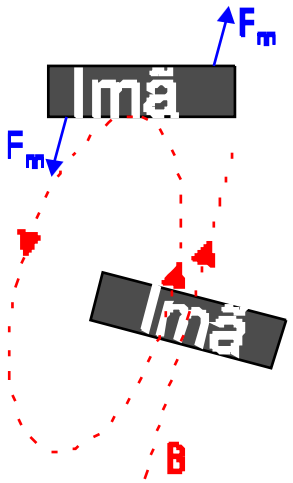


Fig. 11: Forças que geram torques nos imãs permanentes fora da posição de equilíbrio

Essa situação foi explicada pelo físico Samuel Earnshaw com seu teorema de Earnshaw[7], o qual afirma que é impossível estabelecer um equilíbrio estável a partir de forças magnéticas exclusivamente.

Sendo assim, como já foi dito anteriormente, não é possível haver um equilíbrio estável com imãs permanentes.

- Os Supercondutores

A levitação de imãs sobre supercondutores como já foi comentado, é muito conhecida. Materiais supercondutores têm a propriedade de conduzir corrente elétrica sem perda de energia. Sendo assim, caso uma corrente fosse aplicada à um material supercondutor, este poderia conduzi-la infinitamente.

Isso ocorre devido a um fenômeno quântico chamado diamagnetismo. Este faz com que os elétrons não gastem energia para mudar de nível energético, como ocorre nos condutores normais. Confinados em seus níveis energéticos, os elétrons não podem colidir com outros átomos e devem se deslocar infinitamente em trajetórias fixas.

A supercondutividade aparece em alguns metais quando resfriados a baixas temperaturas.

Nessas circunstâncias, os elétrons se arranjam em pares (os chamados pares de Cooper). Como o momento angular desses pares não é afetado pela rede, o fluxo de elétrons continua indefinidamente.

Nos dias de hoje já existem algumas cerâmicas em que o fenômeno da supercondutividade aparece a temperaturas mais elevadas. Porém, a teoria para explicar este fenômeno ainda não é bem aceita.[8].

Devido a esse fenômeno, quando um imã é aproximado de um supercondutor, aparecem correntes superficiais induzidas neste material. Estas correntes, por sua vez, geram um campo magnético induzido que, segundo a Lei de Lenz, produzem um campo magnético em sentido contrário ao do imã, o que o repele.

Caso o imã sofra um desvio lateral, aparecerá um campo induzido que o forçará a ficar em sua posição original. Como o material sob o imã é um supercondutor, o campo induzido é idêntico ao do imã, por isso ele se mantém em equilíbrio estável. É o que se pode perceber na figura 12

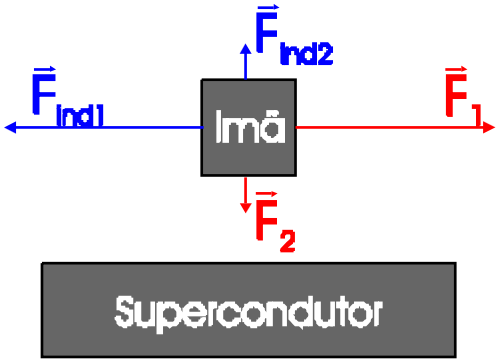


Fig. 12: Caso uma força F_1 horizontal atue no imã, aparecerá uma força F_{ind1} que equilibrará a primeira. O mesmo vale para a força vertical F_2.

- Trens MagLev[5] [6]

Os trens que funcionam utilizando-se a tecnologia MagLev começaram a entrar em funcionamento a pouco tempo. Uma linha de teste de velocidade feita no Japão começou a entrar em funcionamento no ano de1996. Com os testes realizados, o trem MLX01 alcançou uma velocidade de 550km/h.

Para funcionar, esses trens possuem eletromagnetos feitos de material supercondutor. Sendo assim, um fio de material supercondutor é enrolado ao redor de um outro material supercondutor, como mostra a figura 13.

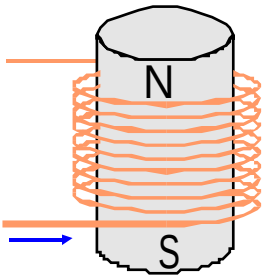


Fig.13: Eletromagneto supercondutor. Os fios e o núcleo são materiais supercondutores.

Esta montagem é ótima, pois, com os fios supercondutores, não é necessário utilizar uma fonte externa de energia o tempo todo. Enquanto os trens estão na estação, correntes são introduzidas nessa bobina.

Quando possui corrente suficiente, essa primeira bobina é desligada e ligada a uma segunda bobina, a qual está ligada a uma terceira e assim por diante. O importante é que, depois que sai da estação, não é mais necessário manter as bobinas ligadas a uma fonte.

Para fornecer a propulsão do trem, é necessário um sistema fácil de ser compreender, porém difícil de ser feito.

Como os trilhos possuem as bobinas supercondutoras e o trem possui os imãs permanentes, um sistema elétrico é ligado aos trilhos, fazendo com que a magnetização das bobinas fique alternando. Logo, enquanto uma bobina repele o trem, a outra o atrai fazendo com que ele comece a se deslocar. Este esquema está indicado na figura 14.

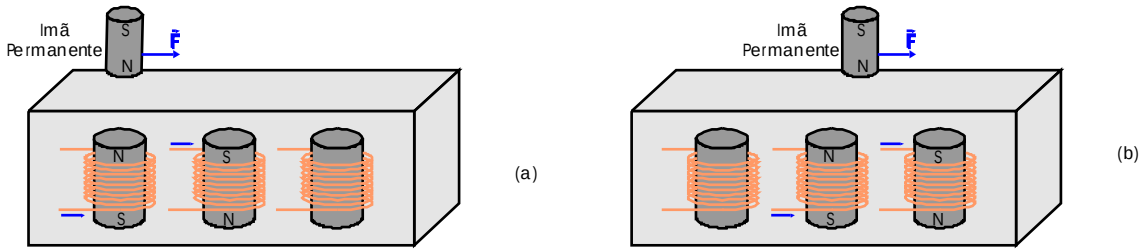


Fig.14: Sistema de propulsão dos trens MagLev. A situação inicial (a) e depois com as polaridades dos eletromagnetos alternada (b).

Esse mesmo sistema pode ser utilizado para frear o trem, utilizando a magnetização correta.

- Conclusão

De fato não foi possível realizar a flutuação de imãs utilizando única e exclusivamente imãs permanentes, mas o estudo relacionado a essas tentativas foi muito útil e interessante. Ele ajudou no estudo de magnetismo e supercondução, fatos que são relativamente pouco entendidos e extremamente aplicáveis na motivação do ensino de física. A idéia inicial do projeto não foi realizada, mas o projeto em geral foi de grande valia.

A única maneira encontrada que possibilitou a levitação dos carrinhos foi com um apoio lateral introduzido na montagem, como mostra a figura 15.

Fig.15: Levitação obtida com o auxílio de um apoio lateral

Referências Bibliográficas

[1] http://www.ifi.unicamp.br/~knobel/FI204/maglev.pdf - Trabalho feito por Celso Ossamu Kaminishikawahara na pós-graduação da UNICAMP, sob orientação do prof. Dr. Marcelo Knobel, analisando trens que utilizam levitação magnética para funcionar. Possui um circuito de demonstração do funcionamento do MagLev. (pg. 11).
[2] http://inventabrasilnet.t5.com.br/tremlev.htm - Um estudo coordenado por três professores da UFRJ, no que diz respeito a levitação magnética e suas vantagens. (pg. 38)
[3] http://pt.wikipedia.org/wiki/Supercondutividade - Definição de supercondutividade da enciclopédia virtual Wikipedia. (pg. 42)
[4] http://noticias.terra.com.br/ciencia/interna/0,,OI226362-EI300,00.html – Pequena reportagem a respeito dos trens MagLev e sua velocidade máxima (pg. 45)
[5] http://travel.howstuffworks.com/maglev-train3.htm - Explicação de como funcionam trens que utilizam a tecnologia MagLev em seus trilhos, bem como a vantagem desses trens. (pg. 46)
[6] BLOOMFIELD, L.A.; “How Things Work: The Physics of Everyday Life”; pg 396-408; Ed. Wiley; 1996 – Explicação de como funciona a levitação magnética a partir de supercondutores.
[7] ver texto no anexo 5 – Texto a respeito de magnetismo e o teorema de Earnshaw. (pg. 47)
[8] “A Concise dictionary of Physics”, Oxford Reference; pg 270-271,1990. – Resumo a respeito da supercondução: suas explicação e história.

Anexo 1. Material referente a bibliografia 1.

Parte A

LEVITAÇÃO MAGNÉTICA OU MAGLEV (MAGNETIC LEVITATION)

Introdução

Ao colocar dois ímãs perto observa-se que eles se repelirão fortemente um do outro. Em 1842, Earnshaw estudando esse comportamento chegou a um teorema que prova que não é possível realizar uma levitação estática de objetos usando nenhuma das combinações de ímãs permanentes fixas. Levitação estática significa suspender estavelmente um objeto contra a gravidade. Há, entretanto, alguns modos para conseguir a levitação driblando o teorema, mas não significa que conseguiremos gerar anti-gravidade ou voar em máquinas sem asas ou foguetes.[1]

Teorema de Earnshaw: A prova do teorema de Earnshaw é simples se entendermos um pouco de cálculo vetorial. A força estática pode ser escrito como função da posição **F**(x) agindo em um corpo sob vácuo e sobre a gravidade, o divergente do campo magnético e elétrico será sempre zero, div **F** = 0. Na posição de equilíbrio as forças devem ser zero. Se o equilíbrio é estável a força deve apontar para o ponto de equilíbrio e considerando que esteja localizado sobre a esfera em volta desse ponto, pelo teorema de Gauss,

$$\oint_S \vec{F}(x) \cdot d\vec{s} = \int_V div\vec{F}dv$$

a integral da componente radial da força sobre a superfície deve ser igual a integral do divergente da força sobre o volume interno que é zero. CQD

Este teorema é aplicado até mesmo a corpos extensos e podem ser flexíveis e condutores, não podem ser diamagnéticos. Eles serão sempre instáveis aos deslocamentos laterais do corpo sobre qualquer posição de equilíbrio. Não conseguirá driblar o teorema com qualquer disposição dos ímãs, como mencionamos anteriormente.

Não há na realidade exceções para nenhum teorema, mas há meios de violar as suposições. Neste caso temos:[1]

- Efeitos quânticos: tecnicamente os corpos em cima de uma superfície estão levitando a uma distância microscópica sobre ela. Este é devido as forças eletromagnéticas intermoleculares, mas o significado da "levitação" não é esse. Para pequenas distâncias o efeito quântico é considerável, mas o teorema de Earnshaw só é válido e relevante classicamente.
- Feedback: ou realimentação, se conseguirmos detectar a posição do objeto no espaço e mandar um sinal para controlar o sistema que pode variar a força do eletroímã que age no objeto, não será difícil deixar o objeto levitando. Ou seja, a força magnética que age no corpo deverá ser controlada para que quando ele se aproximar muito diminua a intensidade da força e quando afastar aumentá-la. Pode-se realizar esse experimento com ímãs permanentes, movendo-os rapidamente para controlar a força que age no corpo, mas isso não quer dizer que viola o teorema de Earnshaw, pois a suposição foi alterada, o ímã não permanece fixo. A suspensão eletromagnética é um dos meios utilizados para levitação magnética de trens, trens maglev, o qual será discutido posteriormente.

1

- Diamagnetismo: é possível levitar supercondutores, figura 1, e outros materiais diamagnéticos, os quais se magnetizam em oposição ao campo magnético aplicado. Isto também é utilizados nos trens maglev. Estão surgindo supercondutores com temperaturas cada vez mais elevadas, o que trará benefícios na utilização destes com baixo custo. Um supercondutor é um diamagnético perfeito, isto significa que ele expulsa todo o campo magnético. Outros materiais diamagnéticos encontrados por aí, podem também ser levitados, precisando apenas de um elevado campo magnético. O teorema de Earnshaw não é aplicado ao diamagnetismo, que se comportam como "anti-ímãs", eles se alinham anti-paralelamente as linhas magnéticas. Enquanto que os objetos do teorema sempre tentam alinhar paralelamente a linhas magnéticas (paramagnéticos).

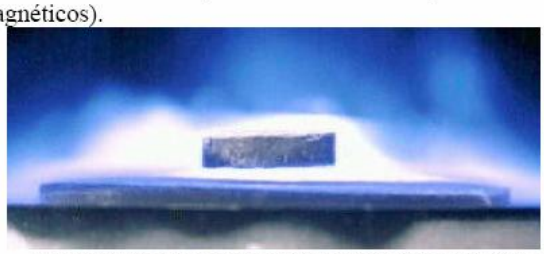


Figura 1: Supercondutor em suspensão magnética

- Campo oscilante: um campo magnético oscilante poderá induzir uma corrente alternada no condutor e então gerar uma força de levitação, pois a variação do fluxo do campo magnético aplicado induz num condutor uma corrente elétrica, e este por sua vez um campo magnético, sendo oposto ao campo magnético aplicado. Portanto gera uma força de repulsão, que poderá levitar o objeto. Nos objetos diamagnético ocorre o mesmo efeito, um campo magnético aplicado alterará a trajetória dos elétrons do objeto, induzindo um campo magnético oposto e geralmente fraco.
- Rotação: é possível levitar um objeto que rode com uma certa velocidade acima de um ímã permanente fixo. Conhecido como levitron, figura 2, é um brinquedo comercializado, o qual foi inventada por Roy Harrison em 1983. Ele é capaz de levitar sobre um arranjo de placas de ímãs permanentes girando com uma certa velocidade, o qual é limitado, assim como o seu peso.

Figura 2: Brinquedo comercializado – LEVITRON

Trens Maglev

A principal aplicação da levitação magnética será na utilização dela nos trens tipo maglev, que vem sendo pesquisada à aproximadamente quarenta anos. Com a tecnologia atual, está se tornando cada vez mais viável a construção dos trens maglev para o funcionamento em transporte público das grandes metrópoles, proporcionando um meio de transporte rápida, confortável e segura, comparável, a pequenas distâncias, ao transporte aéreo.[2]

A idéia se iniciou por volta dos anos 60, quando Gordon T. Danby e James R. Powell do Laboratório Nacional de Brookhaven propuseram o uso de bobinas supercondutoras para produzir campo magnético que levitasse os trens. Nos anos 70 e 80, foram construídos os primeiros protótipos de trens maglev na Alemanha e no Japão. Com o propósito de ser um meio de transporte rápido e seguro, com velocidade média de 500 km/h, além de confortável. Nenhum dos países até o momento, não construíram trens maglev na escala comercial, por serem ainda economicamente inviáveis.

Até hoje, vários protótipos foram construídos, com idéias diferentes, mas utilizando o mesmo princípio, o da levitação magnética. Existem três principais métodos de levitação magnética de trens, figura 3:

- Levitação por repulsão magnética: utilizando bobinas supercondutoras, sistema implantado principalmente nos protótipos japoneses[3];
- Levitação por atração magnética: utilizando potentes eletroímãs, sistema adotado nos protótipos alemães[4];
- Levitação por indução magnética: utilizando ímãs permanentes, sistema recente pesquisado pelos americanos[5].

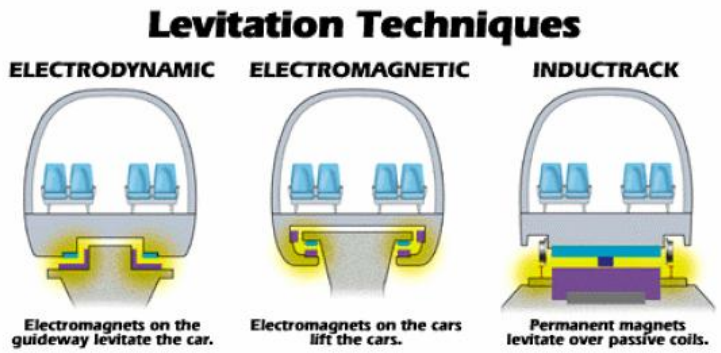


Figura 3: Três métodos de levitação magnética

A seguir, será mostrado os três métodos utilizados para a levitação magnética, com suas vantagens e desvantagens, mostrando a comparação entre eles e curiosidades logo em seguida.

Levitação por Repulsão Magnética

Funcionamento

A levitação por repulsão magnética consiste na utilização de bobinas supercondutoras localizadas no interior do trem, tendo uma refrigeração especial. Como a bobina supercondutora possui uma resistência mínima, é capaz de gerar um forte campo magnético, induzindo nas bobinas encontradas nos trilhos uma corrente elétrica, que por sua vez gera um.campo magnético induzida e contrário ao que foi aplicado nessa bobina. Portanto, possibilitando assim a levitação do trem pela força de repulsão magnética, entre o trilho e a bobina supercondutora. As bobinas localizadas nos trilhos agem passivamente.

O princípio de funcionamento do trem maglev por repulsão magnética, será explicado de acordo com o protótipo do trem maglev japonês[3].

- Princípio da levitação magnética: as bobinas de levitação com uma configuração em "8" é instalado na lateral dos corredores do guia do trem, figura 4. Quando as bobinas ou ímãs supercondutoras passam com uma velocidade alta a alguns centímetros acima do centro dessas bobinas, uma corrente elétrica é induzida dentro da bobina, o qual age como um eletroímã temporário. Como resultado, haverá uma força que irá empurrar o ímã supercondutora para cima, enquanto que a outra força puxará para cima simultaneamente, devido a configuração "8" da bobina. E assim, ocorre a levitação do trem maglev.

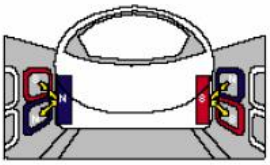


Figura 4: Princípio da levitação magnética

- Princípio da orientação lateral: As bobinas de levitação, que estão uma em frente a outra localizadas nas laterais do corredor, são conectados por baixo do trilho, formando um loop, figura 5. Quando o veículo maglev estiver correndo, e se aproximar de um lado do corredor, ele induzirá uma corrente elétrica através do loop, resultando em uma força de repulsão da bobina de levitação do lado mais próximo ao corredor e uma força de atração na bobina de levitação do lado oposto com o outro lado do veículo. Portanto, para um carro em movimento, ele sempre estará localizado no centro do corredor.

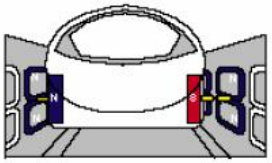


Figura 5: Princípio da orientação lateral

- Princípio da propulsão: A força de repulsão e de atração induzidas entre os ímãs são usadas para propulsionar o veículo, figura 6. As bobinas de propulsão localizadas nas laterais do corredor são alimentadas por uma corrente trifásica de uma subestação, criando um deslocamento do campo magnético no corredor. Os ímãs supercondutores serão atraídos e empurrados por esses campos magnéticos em movimento, que irá propulsionar o veículo maglev.

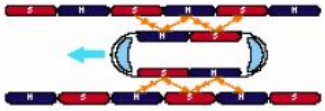


Figura 6: Princípio da propulsão utilizando corrente trifásica

Vantagens

- eficiência na energia: pela utilização da levitação magnética e da propulsão elétrica. Por exemplo, o sistema maglev consome cerca de um sétimo da energia gasta por um Boeing 737-300 numa viagem de 125-620 milhas;
- a operação do sistema maglev não depende da utilização de combustíveis derivados de petróleo, apenas da energia elétrica, que podem ser gerados por outros meios;
- eficiência mecânica: resultados da redução drástica do atrito e perdas de energia por aquecimento na operação do veículo;
- velocidades altas: em torno de 500km/h ou acima, devido a operação do veículo sem nenhum contato físico com os trilhos;
- desgastes e manutenções mínimas requeridas pelo sistema: devido a distribuição das forças de levitação e de propulsão por todo o veículo, causando uma mínima tensão de estresse de contato. O motor linear não requer contato para acelerar ou desacelerar o veículo.

Desvantagens

- A maior desvantagem é na utilização de sistemas de resfriamento para ímãs supercondutora, SCM (superconducting magnets), usadas para levitar o trem. A maioria dos trens maglev utilizam um SCM feito de NbTi. O SCM desenvolve uma temperatura extremamente alta durante a sua operação, sendo necessário o seu resfriamento a uma temperatura de aproximadamente 4 kelvin, para manter as suas propriedades supercondutoras. Normalmente utiliza-se o hélio líquido para o seu resfriamento, o que torna o custo de funcionamento muito elevado.

Levitação por atração magnética

Funcionamento

Surgido na década de 70, os trens maglev da Alemanha denominado Transrapid[4], adotaram o sistema de atração magnética para a levitação dos trens. É usado a força de atração entre os eletroímãs, controlados individualmente e eletronicamente, localizados no veículo e as barras ferromagnéticas localizadas abaixo das guias dos trilhos, figura 7. No veículo existe um suporte, onde se localiza os eletroímãs, encurvado para baixo dos trilhos e exercendo nas barras ferromagnéticas uma força de atração pelos eletroímãs que darão sustentação, levitando o veículo. Lateralmente, existe um conjunto de eletroímãs, guias laterais, que controlam o movimento transversal do veículo, deixando sempre centrado no trilho. O suporte, assim como os guias laterais, existem em ambos os lados do veículo e por todo o seu comprimento. Entre o suporte e os trilhos, a distância é de 10mm, controlados eletronicamente. E entre o trilho e a parte inferior do veículo é de 150mm, o que possibilita de passar por cima de pequenos objetos ou camadas de neve.

O sistema de propulsão usado é o motor linear síncrono, que é colocado ao longo de todo o veículo. Este, pode tanto ser usado como sistema de propulsão ou como sistema de freios do veículo. O motor linear síncrono nada mais é do que o motor elétrico, consistindo de rotor e estator, em que o estator foi cortado e alongado, separando em duas partes o estator, que se localiza no veículo e o rotor, que se localiza nos trilhos. Sendo um sistema de propulsão e sistemas de freios que não possuem nenhum tipo de contato físico. Como o motor elétrico, possui três fases, entretanto a alimentação da corrente alternada vem através dos trilhos, e o suprimento de energia é somente acionado em cada ponto em que o veículo esteja localizado.

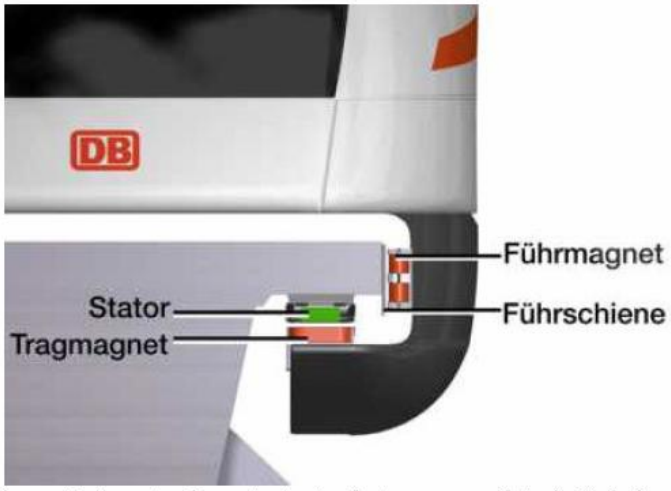


Figura 7: Suporte de sustentação do trem com eletroímã abaixo da barra ferromagnética "stator", guias laterais agindo na lateral do trilho

...gens	Vanta...
...emissão de poluentes em toda a sua trajetória;	- Não há e...
...missão sonora dos rolamentos nem da propulsão, por ser uma tecnologia ...itação, não existe contato mecânico.	- Não há en... baseada na lev...
...crono, possibilitando altas potências na aceleração e desaceleração, e ...bida de alto grau de inclinações;	- Motor linear sín... possibilitando na su...
...seguras com velocidade de 200 a 350km/h regionais, e acima de ...onga distância;	- Viagens confortáveis e... 500km/h para viagens a l...
...na construção de trilhos elevados. Por exemplo, nas áreas ...ar acima das plantações;	- Baixa utilização de espaço ... agrícolas os trilhos podem pass...

Desvantagens

...ão através de forças de atração magnética;	- Maior instabilidade por ser baseado na levitaç...
...es laterais;	- Instabilidade podem ocorrer devido a ventos fort...
...feedback que controlam a distância	- Cada vagão deve possuir sensores e circuitos com... dos trilhos aos suportes;
...ímãs, podem causar a perda da	- Perdas de energia no controle dos circuitos ou dos eletro... levitação.

7

Levitação por indução magnética

Funcionamento

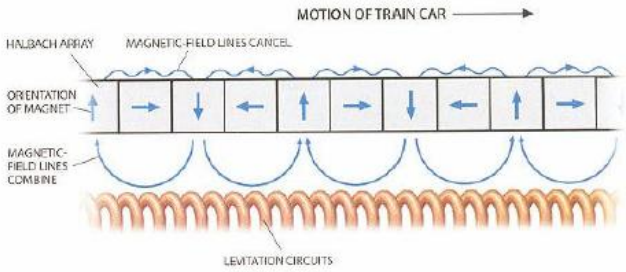


Figura 8: Esquema da cadeia de Halbach

Chamado de *Inductrack*[5,6,7], é um sistema passivo que não usa ímãs supercondutoras ou eletroímãs potentes. Em vez disso, ele usa ímãs permanentes a temperatura ambiente, similares a ímãs comuns, apenas mais potentes. Sobre cada vagão, abaixo dela, existe na sua superfície, uma cadeia retangular de barras de ímãs, chamadas de cadeia de Halbach. As barras são colocadas em um padrão especial, a fim de que a orientação magnética de cada barra está a um certo ângulo com a orientação magnética da barra adjacente, figura 8. Quando as barras são colocadas nessa configuração, as linhas de campo magnético combinam para produzir um campo magnético forte abaixo do trem, enquanto que acima dela as linhas de campo tendem a se cancelarem. Nos trilhos são colocadas várias bobinas isoladas entre si e formando um circuito fechado, assemelhando-se a uma moldura retangular de janela, podem ser de formas diferentes. A força de levitação vem com a indução magnética nessas bobinas, que geram uma corrente induzida e por sua vez um campo contrário ao da indução, exercendo uma força de repulsão.

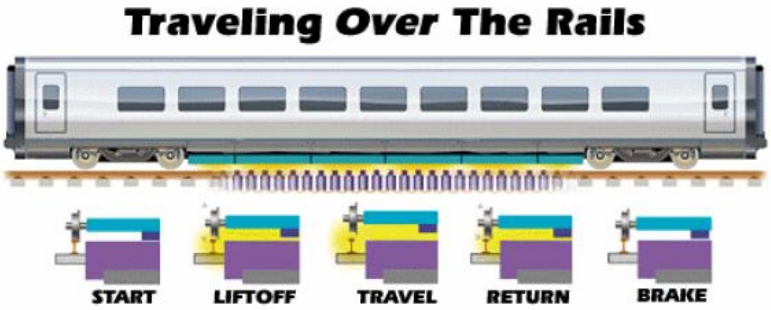


Figura 9: Etapas da levitação do trem de acordo com o seu movimento

Nesse sistema a força de repulsão age somente quando o trem está em uma velocidade limite, a poucos quilômetros por hora, figura 9. Para uma velocidade um pouco maior que uma pessoa andando o trem levita a poucos centímetros do trilho. Como a força

de levitação aumenta exponencialmente com a diminuição da distância entre o trilho e o trem, esse sistema proporciona uma certa estabilidade. Para uma estabilidade lateral, é colocado lateralmente ao trilho uma cadeia de Halbach menor, em ambos os lados, figura 10.

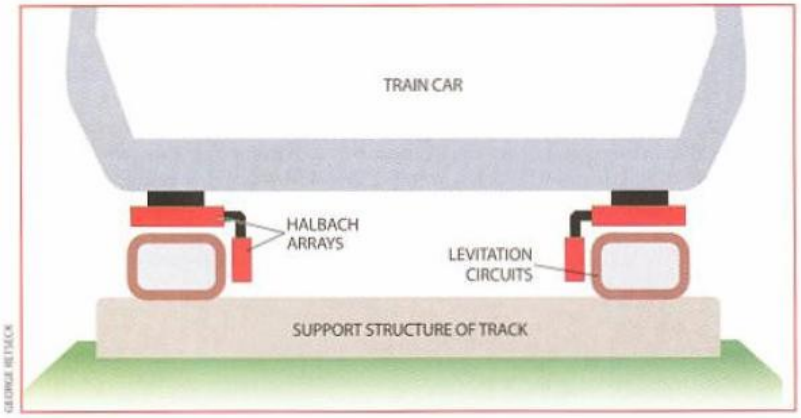


Figura 10: Localização das cadeias de Halbach

Vantagens

- sistema simples comparado com levitação por atração e repulsão magnética;
- sistema muito mais econômico do que os anteriores;

Desvantagens

- utilização da levitação magnética apenas em movimento acima da velocidade limite, sendo que nesse intervalo, é necessário a utilização de rodas para o movimento inicial e como o freio;

Esse modelo não possui um protótipo na escala real, possuindo apenas um protótipo em laboratório.

rando os três métodos de levitação magnética

os três métodos tem como objetivo a eficiência no transporte, na energia, no
nuía. Para um transporte rápido e seguro, com uma velocidade média de
onomia no tempo e na manutenção, por não possuir contato mecânico
elocidade, proporcionando um desgaste mínimo por atrito, são os
nética aplicada nos trens.
és métodos terem o mesmo objetivo, existem uma considerável

nômico é a levitação por indução magnética, que utiliza
nto que o da levitação por repulsão magnética utiliza
citam de um resfriamento constante a baixa
ão magnética, necessita de eletroímãs potentes,
el para cada vagão;
em que proporciona maior velocidade;
itação por repulsão magnética;
dois métodos, por repulsão e atração
as. O da levitação por indução
studam apenas a levitação, não
de veículo que é capaz de

Compar

Todos
tempo e na econ
500 km/h, com a ec
no transporte a alta ve
objetivos da levitação mag
Apesar de todos os tr
diferença entre eles:
- construção: o método mais ec
apenas ímãs permanentes, enqua
ímãs supercondutores que neces
temperatura, e o da levitação por atraç
além de circuitos complicados com feedba
- velocidade, conforto e estabilidade: o tr
estabilidade e conforto, ainda é o método de lev
- protótipos: existem protótipos em escala real de
magnética, que conseguem transportar várias pesso
magnética, existe apenas protótipos de laboratório, que e
possuindo ainda em escala real, ou seja, um tamanho
transportar pessoas no seu interior.

Curiosidades

nética, por
estudos
lema.
os

O mais difundido mundialmente é o método de levitação por atração mag
possuir um custo menor dos protótipos em escala real existentes. Existindo alguns
de implantações em vários países pela TRANRAPID-INTERNATIONAL [4], empresa a
Entre os países interessados como os Estados Unidos, Austrália, China, Tailândia e
países europeus, existe um projeto para a construção de uma linha utilizando trens magle
aqui no Brasil. A linha ligará as cidades de Rio de Janeiro, São Paulo e Campinas, a
primeira etapa do projeto, do estudo do tráfico, foi completado [4,8].
Várias aplicações são previstas:
- Autoshuttle [9]: é um projeto alemã de um transporte utilizando um tipo de trem magle
que transportará automóveis a uma velocidade muito superior a dos carros,
economizando no tempo e liberando tráfico nas auto-estradas. Para utilizar o transporte
será pago um preço menor que o do combustível gasto na viagem.
- Lançador de naves espaciais [8,10]: equipando a nave com o sistema magle, proporcionará
uma velocidade inicial de subida, com o motor linear síncrono, comparável com os
meiros estágios dos foguetes, entretanto com o custo muito menor do que o gasto em
ustíveis para foguetes.

pr
comb

CONCLUSÃO

A utilização da levitação magnética nos transportes públicos é prevista para próximos anos. Nos Estados Unidos, o programa para desenvolvimento tecnológico do transporte por levitação magnética[11] está sendo grandemente investido, a fim de que se possa ser implantado em poucos anos. A Transrapid alemã, já iniciou estudos em vários países para a construção de seus trens maglev. No Japão, continuam intensas pesquisas para diminuir os gastos e aperfeiçoar cada vez mais seus protótipos de trens maglev, que utilizam ímãs supercondutoras.

Pode-se dizer que nesse início de século 21, o transporte público utilizado será por trens maglev. Uma mudança surpreendente, da utilização da roda para a utilização de campos eletromagnéticos para levitação e propulsão de trens para o transporte público.

Referência:

1. http://hepweb.rl.ac.uk/ppuk/PhysFAQ/levitation.html
2. http://bmes.ece.utexas.edu/~jcamp/physics/index.html
3. http://www.rtri.or.jp/rd/maglev/html/english/maglev_frame_E.html
4. http://www.transrapid-international.de/english/welt.html
5. http://www.llnl.gov/str/Post.html
6. http://www.skytran.net/press/sciam01.htm
7. http://popularmechanics.com/popmech/sci/9805STTRP.html
8. http://www.ferrovia.com.br/ligacao.htm
9. http://www.autoshuttle.de/index_en.html
10. http://std.msfc.nasa.gov/newsarchive/2ndmag.html
11. http://www.fra.dot.gov/o/hsgt/index.htm

11

Parte B

Experimento para Demonstrar Maglev

Introdução

Levitação magnética, ou maglev do inglês magnetic levitation. Ao colocar dois ímãs perto observa-se que eles se repelirão fortemente um do outro. Em 1842, Earnshaw estudando esse comportamento chegou a um teorema que prova que não é possível realizar uma levitação estática de objetos usando nenhuma das combinações de ímãs permanentes fixas. Levitação estática significa suspender estavelmente um objeto contra a gravidade. Há, entretanto, alguns modos para conseguir a levitação driblando o teorema, mas não significa que conseguiremos gerar anti-gravidade ou voar em máquinas sem asas ou foguetes[1].

A demonstração da levitação magnética será através de um circuito eletrônico com *feedback*, ou realimentação, que controlará um eletroímã, e sendo esse capaz de levitar uma esfera de aço, localizado abaixo da bobina, e com um sinal indicando a posição da esfera, que controlará no circuito a intensidade da corrente na bobina, diminuindo ou aumentando, de acordo com a posição da esfera para que ela não caia ou encoste no eletroímã.

Com o objetivo de demonstrar um dos mecanismo de funcionamento de trens tipo maglev, levitação magnética, e observar como os objetos podem ser levitados, o que raramente vemos, esse levitador é um instrumento de ensino bastante útil para mostrar como essa nova tendência tecnológica, que logo poderá ser implantada nos transportes públicos, funcionam. Além disso, conseguimos através dele visualizar e aprender a física envolvida, e inclusive pode-se aprender um pouco de eletrônica, também.

O experimento para demonstrar maglev, ou levitador, consiste de um fotoemissor de infravermelho e dois detetores de infravermelho, os quais um é a de referência, que controlará a influência do ambiente, e o outro é a do sinal, que localizará e informará a posição da esfera de aço para o circuito eletrônico que controlará o eletroímã. Então, o mais complicado na construção desse experimento será a montagem desse circuito.

A seguir, será detalhada a construção e o funcionamento do levitador, dando uma ênfase na parte da montagem e operação do circuito eletrônico, que é a alma do levitador, seguindo com construção do suporte para o eletroímã, e os emissores e receptores de infravermelho. A construção do eletroímã virá no final. Não será detalhada a física envolvida nesse processo e os cálculos complicados, como o campo magnético formado pela bobina na região onde a esfera de aço irá levitar.

CONTROLE DE *FEEDBACK*

Há quatro elementos para o controle do sistema de *feedback*:

1- **Sensor** da posição para ser controlado
2- **Referência de entrada**: especifica o valor do controle da variável que deve existir
3- **Comparador**: que compara a posição atual com a posição desejado ou com sinal de referência. A saída do comparador é normalmente chamado de sinal de erro, onde a polaridade determina para que direção deve ser feito a correção

4- **Mecanismo de controle** é ativado com o sinal de erro, e resultando na correção da posição. Este é freqüentemente chamado de atuador.

No caso do levitador, o sensor é o componente óptico que localiza a posição do objeto suspenso. A entrada de referência é estabelecido por um outro componente óptico que mede a luz ambiente. O comparador é um componente eletrônico que subtrai e amplifica os dois sinais de entrada. O mecanismo de controle é o eletroímã. Desde que os quatro elementos mencionados estejam todos ligados formando um loop, e não falte nenhum dos elementos é considerado como um sistema de controle por *feedback*.

Benefícios: A posição do objeto suspenso é a única condição imposta no sistema. Mas, muitos dos fatores como o peso e a gravidade, fonte de tensão, e correntes de ar podem afetar a posição. Essas condições desfavoráveis que não queremos são chamados de perturbações. Desde que, eles são efeitos não lineares, e não sabemos como variam no tempo, é impossível de equilibrar peso do objeto com a força de atração exercida pelo eletroímã, apenas aumentando a sua intensidade.

A razão principal para o uso do controle por *feedback* é para medir e compensar os efeitos das perturbações. O uso do *feedback* pode reduzir grandemente a não linearidade em todos os outros sistemas, exceto o sensor usado para captar o sinal do *feedback*.

Problemas do *Feedback*: Há um aumento na complexidade do sistema, o qual aumenta a soma do número de componentes.

Feedback introduz a estabilidade do problema, significa a tendência do autocontrole ultrapassar os limites, quando a perturbação é imposta e sentida pelo sistema. Ou seja, a pertubação pode ser amplificada a cada loop do *feedback* que ocorre.

Montagem e Funcionamento do circuito eletrônico

MATERIAIS UTILIZADOS:

- Resistores: 100Ω (5), 330Ω, 1kΩ (2), 1.5kΩ, 11kΩ, 22kΩ, 100kΩ, 330kΩ, 370kΩ, 820kΩ, 1.8MΩ, com potência de ¼ de Watts, e 330Ω de 1W.

( ) – quantidade

- Potenciômetro: 4.7kΩ, 4.7kΩ.
- Capacitores: 0.1 μF, 50V, malha ou cerâmica; 47 μF, 35V, eletrolítico (2); 1000μF, 35V,eletrolítico(2).
- Semicondutores: Til 32 ou OP133W LED emissor de infravermelho (3), Til 78 fototransístor (2), Led (2), LM741 amplificador operacional (4), 2N3055 transistor de potência, 1N4002 diodo.
- Ponte retificadora 2 A.
- Regulador 7815 e 7915,
- Transformador 15V, 1 A.
- Protoboard.
- Multímetro.

Circuito Eletrônico

Esse experimento de levitação magnética foi encontrada na Internet[2], sendo apenas montado e modificado de acordo com as necessidades.

O circuito do levitador foi montado em um protoboard, seguindo o esquema da figura 1. A tensão contínua utilizada é de + e –15V, que alimenta o circuito e a bobina, basicamente foram utilizados quatro amplificadores operacionais LM741, um emissor e dois fotodetetores de infravermelho, um transístor de potência e dois leds para indicar se há ou não tensão no circuito. O circuito será dividido e detalhado em:

- circuito do emissor de infravermelho
- circuito do (fotodetector de infravermelho) receptor de sinal
- circuito do (fotodetector de infravermelho) receptor de referência
- circuito comparador
- controle de *Feedback*
- amplificador do sinal
- circuito controlador da bobina.

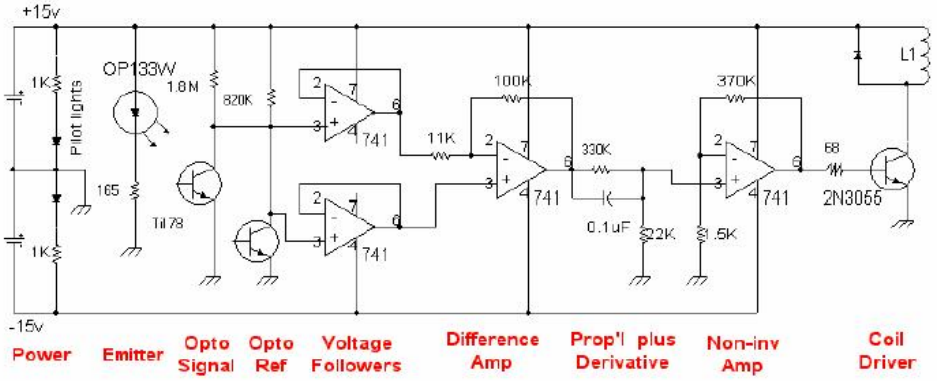


Figura 1: Circuito completo do experimento para demonstrar o Maglev

CIRCUITO EMISSOR DE INFRAVERMELHO

O LED emissor de infravermelho, emite um feixe de luz logo abaixo da bobina, em direção ao receptor de sinal que se localiza exatamente a sua frente. Como a luz se diverge, chega também ao receptor de referência, localizado próximo ao receptor de sinal.

A luz infravermelha, sendo o que possui um comprimento de onda melhor definida, do que utilizar todo o espectro do comprimento de onda da luz do visível, foi escolhido como sendo a mais adequada para o aparelho, pensando que a luz ambiente não influa no funcionamento do mesmo. Apesar disso no receptor, a luz ambiental, ainda influenciava

muito na recepção do sinal. Como nós queremos que o LED seja a principal fonte de luz, é preciso diminuir a influência externa. Então, a construção de uma caixa retangular, fechado nos cinco lados, figura 2, favoreceu na diminuição da interferência externa na recepção do sinal, além disso, pode-se melhorar o sinal se colocar um papel preto para cobrir a parede da caixa do lado do LED emissor de infravermelho, e ainda colocando um pequeno tubo em volta do receptor de sinal.

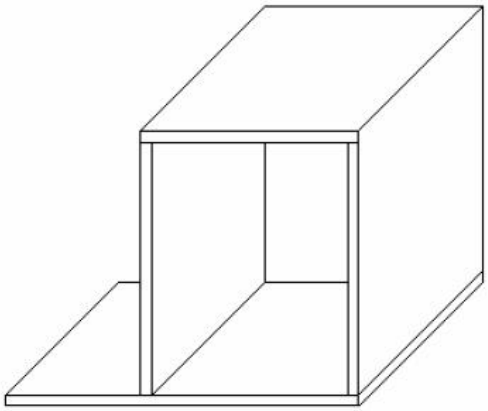


Figura 2: Caixa de madeira para a montagem do experimento de maglev

Como vemos na figura 3, o circuito do LED emissor de infravermelho só consiste de uma alimentação de +15V e uma resistência de 165Ω. A escolha da resistência depende muito da distância entre o receptor e emissor, para que emita um sinal forte acima dos ruídos das fontes externas, portanto variando com o tipo de construção. A corrente que passa nesse circuito, fig. 3 , no nosso caso será de 90mA, portanto utilizamos duas resistências de 330Ω de 1W de potência em paralelo. Como a corrente é muito alta, os resistores esquentarão, devendo-se tomar o cuidado.

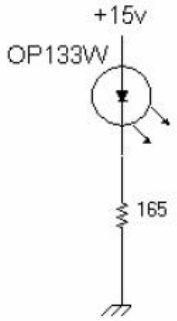


Figura 3 : Circuito do LED emissor de infravermelho

CIRCUITO DO FOTODETECTOR

O receptor de sinal, ou fotodetector ou fototransístor, tem o papel de localizar a posição da esfera, através da quantidade de luz que chega do emissor, mandando um sinal para o circuito.

O circuito, figura 4, usa o fotodetector como uma fonte de corrente controlada pela luz incidente, operando na região linear da resposta. Tomando uma analogia com o transistor, o fotodetector possui a base, captação da luz, o coletor, ligado a fonte de tensão após a resistência, e o emissor, o terra. O coletor é sempre mais positivo que o emissor, e a base controla o fluxo de corrente que passa pelo coletor(e emissor). Recebendo mais luz, mais a corrente aumenta na base. Então, a intensidade da luz que chega na base, controla diretamente a corrente no coletor – emissor. A corrente é convertida em tensão pela resistência R, conectada entre o coletor e a fonte de alimentação.

O amplificador operacional serve para isolar o circuito do fotodetector do próximo estágio. E com ele, podemos tomar medidas de tensão com multímetro sem que ocorra o risco do instrumento interferir na medida, além de não ser influenciado com a introdução de novas resistências nos estágios seguintes.

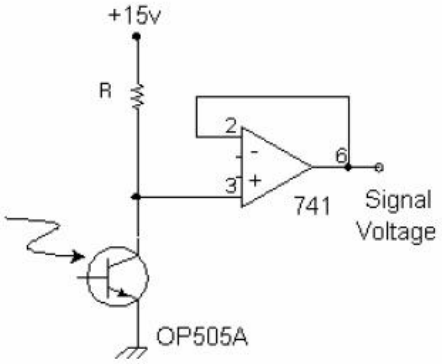


Figura 4: Circuito do fotodetector

Distância entre Detector e Emissor

O objetivo é obter uma diferença de tensão, de aproximadamente de 2 a 3 volts, de sinal acima do ruído da luz ambiente, ou seja, o sinal só com a luz do ambiente tem que ser aproximadamente 5 volts, e com a luz do emissor mais ou menos 8 volts, sendo que a tensão média é de mais ou menos 7 volts, que é aproximadamente a região central entre a fonte de tensão de 15 V e o 0 V. Isto proporcionará posteriormente uma boa resposta para o circuito.

A distância entre o detector e emissor é encontrada com a condição de achar uma resposta do detector equivalente a 2 a 3 volts na diferença de tensão, como citado acima. Nesse levitador montado, a distância foi de 6 cm, com uma diferença de tensão de mais ou menos 3 volts, de 5.6 à 8.4 volts, conforme a luz do ambiente.

Iniciando com uma resistência de 56kΩ no circuito do receptor de sinal, e com uma resistência de 500Ω para o emissor, atingimos um valor ideal só com a resistência de

1.8MΩ para o receptor e 165Ω para o emissor, implantando um outro emissor auxiliar. Este, localizado abaixo do receptor de sinal, através do qual pudemos ter o controle do ruído da luz ambiente. Nesse emissor auxiliar, que obedece o mesmo circuito do emissor, foi acrescentada um potenciômetro que controla a intensidade de luz emitida. Com isso, podemos controlar para que a luz do ambiente mais a do emissor auxiliar, fique por volta de 5 volts, e com mais o emissor seja de 8 volts, aproximadamente. Lembrando que a resistência de 1.8MΩ do receptor, torna ele menos sensível a luz ambiente, o qual sem o emissor auxiliar a tensão é menor que 5 volts, dependendo da variação externa da luz.

CIRCUITO DO RECEPTOR DE REFERÊNCIA

O receptor de referência serve para ajustar as pequenas variações vindas, tanto externamente, como da luz ambiente, e internamente, como pequena variação da emissão de luz do emissor, ou pequenas variações no circuito, devido ao seu aquecimento ou a pequenas variações ocorridas na fonte de alimentação do circuito, ajudando assim, automaticamente. Como o receptor de referência é afetado da mesma maneira que o receptor de sinal, o amplificador operacional, amp-op, poderá subtrair os dois sinais e obter apenas o sinal da posição da esfera.

Para o circuito do receptor de referência, figura 5, é o mesmo da figura 4, com a resistência diferente e com o amp-op tendo a mesma função que o anterior, a de isolar o circuito.

Com esse receptor de referência, pequenas variações na intensidade de luz não influenciarão no funcionamento do levitador, o qual sem ele necessitaria de um potenciômetro para o controle nessas variações da intensidade de luz.

Para o funcionar como referência à pequenas variações citadas, para o receptor de sinal, esse receptor referência deve se localizar próximo ao do receptor de sinal, mas sem que a esfera influencie nela, barrando a luz do emissor. Nesse levitador, o receptor de referência se localiza na mesma altura do receptor de sinal e a 2.5 cm a o lado, no sentido para o interior da caixa.

A resistência utilizada para o circuito do receptor de referência foi de 820kΩ, para obter tensão de referência, que deverá estar localizada no centro do intervalo da variação da tensão do receptor de sinal. Para um melhor ajuste, foi introduzido um emissor auxiliar para o receptor de referência, com um potenciômetro tendo como função de controlar a intensidade de luz emitida para o receptor de referência.

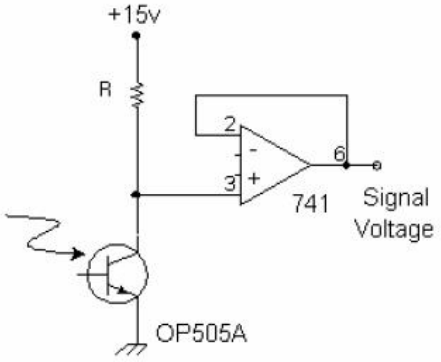


Figura 5: Circuito do fotodetector de referência

CIRCUITO COMPARADOR

O circuito, da figura 6, é um circuito comparador que dá a diferença de dois sinais de entrada, tensão de sinal e de referência, e amplifica, resultando no sinal de controle.

No amp-op desse circuito o ganho é calculado pela razão entre as resistências de 100kΩ por 11kΩ, resultando no ganho igual a 9, que é a amplificação da diferença de tensões dos sinais das entradas. Ou seja, a tensão no pino 6 na saída do amp-op é nove vezes maior que a diferença de tensões entre os sinais da entrada. Para a diferença de tensões obtidas, entre as tensões de sinal e referência, por ser mais ou menos de 2 a 3 volts, escolhemos o ganho de nove vezes, resultando na tensão maior que a tensão na fonte de alimentação de 15V, para que a tensão no sinal de controle seja de 15V, dando um sinal grande que proporciona uma região de operação confortável para o resto do circuito.

Podemos testar o circuito medindo a tensão no sinal de controle no pino 6, que deverá ser de 12 a 15 volts, sem bloquear o sinal do receptor. E medir a tensão bloqueando o feixe de luz que passa abaixo da bobina, em direção ao receptor de sinal, que deverá resultar entre –5 a –15 volts, sendo ideal no caso desse levitador construído, uma tensão, na saído do pino 6, de aproximadamente –5 volts, quando bloqueado.

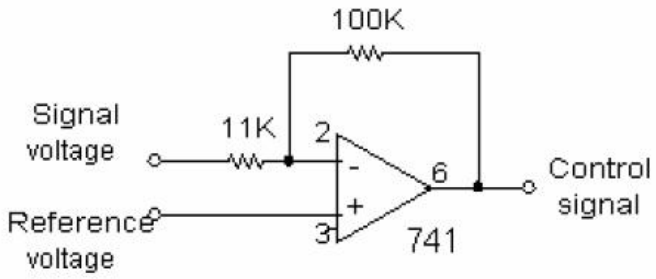


Figura 6: Circuito comparador dos sinais dos receptores de sinal e referência.

Na etapa seginte a do comparador, existe um circuito, figura 7, onde a saída do pino 6 do comparador, o sinal da posição entra no circuito e sai o sinal controlado, o sinal derivada do sinal da posição, que é a velocidade. Para freqüências muito altas a corrente nesse circuito não observa nenhuma resistência, devido ao capacitor, para freqüências muito baixas, o circuito se torna um divisor de tensão.

O ganho do circuito, figura 7, é calculado, esquecendo o capacitor no momento, como um circuito divisor de tensão,

Ganho = 22kΩ/(22kΩ + 330kΩ) = 0.0625

Significando que o sinal é reduzido por um fator de 16, por esse circuito. Na etapa anterior, o sinal foi aumentado e nessa etapa o sinal foi diminuído, não é por acaso, isso se deve ao fato de que esse sinal resultante calcula a variação da mudança da posição do objeto flutuante. Agora devemos ampliar o sinal novamente.

Os valores das resistências foram obtidos experimentalmente, de acordo com a resposta do circuito do levitador, sendo que os cálculos são extremamente complicados considerando

todo o circuito com *feedback*. Os valores podem não ser ideais, mas para o caso desse levitador funcionaram.

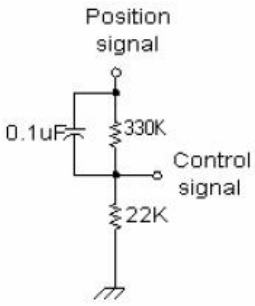


Figura 7: Circuito para medida da velocidade

CIRCUITO AMPLIFICADOR NÃO INVERSOR

No circuito da figura 8 temos um circuito amplificador não inversor. Este tem por objetivo, além de amplificar o sinal, de isolar e fornecer o sinal para o transistor de potência, que alimenta a bobina. O ganho do amp-op 741 será,

Ganho = (370kΩ + 1.5kΩ)/1.5kΩ = 247

Este ganho alto, resultará num sinal binário, ligado-desligado, fornecido ao transistor de potência, alimentando a bobina por pulsos. Por ser um sinal pulsado a bobina deverá esquentar menos do que permanecer com uma corrente constante. Com este ganho alto, conseguimos obter, experimentalmente, o resultado desejado, o funcionamento do levitador.

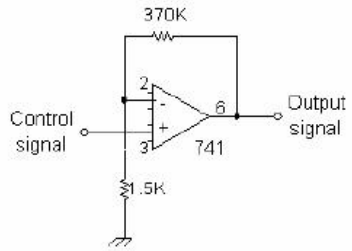


Figura 8: Circuito amplificador não inversor.

CIRCUITO CONTROLADOR DA BOBINA

O circuito, figura 9, que controla a corrente na bobina é composta de um transistor de potência, onde na base chega o sinal de saída do amplificador, com uma resistência de 68Ω, o coletor é ligado a bobina, e o emissor ao terra. Como o amp-op 741 é uma fonte de corrente, acima de 40mA, o transistor de potência 2N3055, com um beta = 50 ou maior, é

suficiente para fornecer uma corrente maior que 2 amperes sem uma adição de novos circuitos.

A corrente da base limita a corrente que é fornecida pelo amp-op, para o caso de 15V no amp-op e o terminal da base de 0.7V, a corrente máxima será
$(15 - 0.7)/68 = 210mA$

Foram testadas várias resistências, sendo a de 68Ω ideal para o levitador construído.

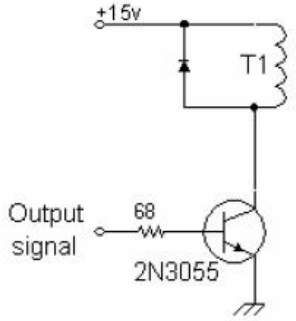


Figura 9: Circuito do controlador da corrente no eletroímã.

A parte do circuito eletrônico foi detalhada acima. Entretanto faltou um estudo mais aprofundado na parte do *feedback* e no cálculo das freqüências de resposta do circuito da figura 7. A maior parte dos valores dos componentes foram encontrados empiricamente variando os seus valores até que satisfizessem as suas funções.

Construção do eletroímã

Materiais Utilizados:
- fio para transformador nº 22 e 24, Cu, aproximadamente 300 gramas cada
- parafuso de cabeça chata, 3/8" x 6"
- porcas 3/8"
- arruela de metal, diâmetro 5cm
- arruela de plástico, diâmetro 6cm

Os 600g de fio foram enrolados no parafuso, perto da extremidade da cabeça, com a dimensão da bobina de aproximadamente 5 cm de largura e 5 cm de diâmetro. A resistência da bobina é de 22Ω. Para segurar o fio enrolado, nas extremidades foram colocadas as arruelas, a de plástico perto da cabeça e a de metal oposto a ela, sendo segurados por duas porcas do parafuso, figura 10.

No início a bobina possuía apenas o fio de número 22 enrolado, mas como a força do eletroímã não era suficiente para levitar a esfera de aço de diâmetro 16mm, foram enrolados mais 300g de fio disponível, a de nº 24. O número de voltas do fio e o número de camadas não foram anotados.

A bobina construída por possuir uma resistência de 22Ω, passará uma corrente máxima de 680mA, no caso da alimentação ser de 15V. Nessa bobina não houve problemas de aquecimento, pois o controle do circuito não deve fornecer uma corrente muito alta.

O comprimento da rosca do parafuso foi aumentada, para que a porca conseguisse prender a bobina entre as duas arruelas. Além disso, após alguns testes, a cabeça do parafuso foi limado, observando que houve melhorias, por ter aumentado a área plana da cabeça.

A bobina curto e espessa é melhor do que longo e fino, pois aumenta a área da face da bobina, aumenta a área onde o fluxo de campo magnético é uniforme, ajudando na levitação da esfera perto da cabeça do parafuso. A arruela de plástico serve para não barrar o fluxo de campo magnético que sai da bobina. O núcleo de ferro aumenta a intensidade do campo magnético, sendo que o material do parafuso é de ferro galvanizado.

Para não variarmos a posição do fotodetector toda vez que desejamos fazer um ajuste, devemos possuir uma liberdade de mudar a posição da bobina. Sabemos que quanto mais perto da bobina, mais a força de atração aumenta, e portanto, para esferas de aço de pesos diferentes devemos ajustar a posição da bobina.

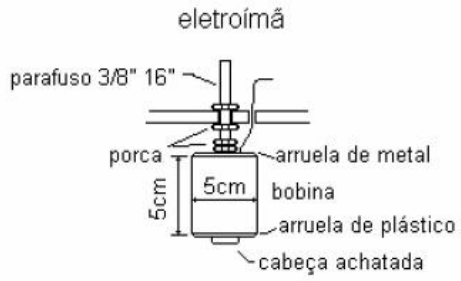


Figura 10: Eletroímã utilizado no levitador

Construção da Caixa de Madeira

A caixa de madeira, fig. 2, deve possuir apenas uma abertura, sendo fechada nos demais lados, pois isso ajuda os fotodetectores de não sofrerem com a luz ambiente. Esta caixa não precisa possuir dimensões bem definidas, precisando que os lados sejam maiores que as distâncias requeridas. Por exemplo, a distância entre os dois fotodectores devem ser aproximadamente 2.5 cm, fig.11, portanto a caixa deve possuir uma largura maior que 2.5 cm, sendo que quanto mais largo, podemos colocar os fotodetectores mais ao fundo, minimizando a interferência da luz ambiente. A distância entre o emissor e o receptor é de 6 cm, sendo que a bobina tenha um diâmetro de 5 cm, a abertura da caixa deve ser de 6cm, se desejar colocar o emissor na parede da caixa, mas se for um pouco maior que esse comprimento, a distância do emissor poderá ser controlada com uma extensão. Na nossa caixa a largura foi de 14 cm, como extensão para o emissor foi utilizado um tubo de uma caneta.

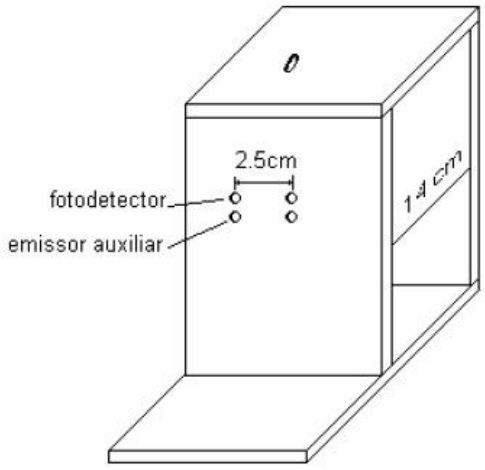


Figura 11: Caixa de madeira utilizado no levitador

Fonte de Tensão

Utilizando um transformador de 110 para 15 volts, de 1 A, uma ponte retificadora, um regulador para +15 e –15 volts e dois capacitores eletrolíticos de 1000μF, construímos uma fonte de entrada 110 volts ac para + e –15 volts dc, estabilizada.

O circuito da fonte de tensão está esquematizado abaixo, figura 12.

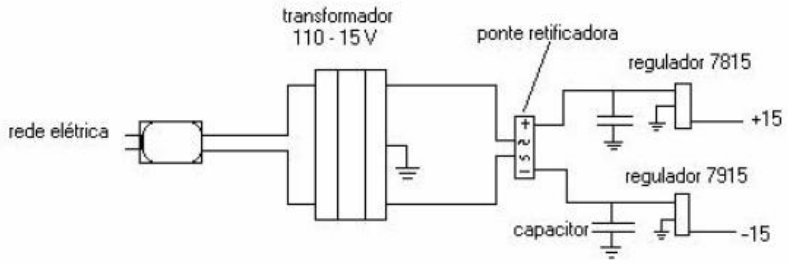


Figura 12: Circuito para fonte de tensão estabilizada, entrada 110V ac, saída +15 e –15 dc

Dificuldades e as etapas seguidas

- Primeiras dificuldade foram a obtenção da resposta do fotodetector, receptor de sinal, com a diferença de tensão de 2 a 3 volts entre a luz externa e com o emissor, medidos na saída do amp-op, pino 6.
- A tensão de referência foi centrada no intervalo da diferença de tensão no receptor de sinal.
- Nos dois casos acima precisaram ser adicionados potenciômetros para chegar nas tensões desejadas, e depois substituídas por resistências. Além disso alteramos várias vezes a resistência do emissor, diminuindo cada vez mais para acharmos a quantidade de luz certa para obtermos uma resposta adequada, sem que ultrapassasse o limite máximo da corrente suportado pelo emissor. E ainda, a inserção de dois emissores de infravermelho perto dos fotodetectores foram necessárias, sendo acompanhadas pelo potenciômetro para controlar a intensidade da luz emitida. Proporcionando ainda, um melhor controle da influência externa no circuito, quando há grandes variações, sendo que para pequenas variações a correção já e imposta pelo *feedback*.
- O sinal do receptor de referência e a do sinal foi comparado e amplificado por um circuito comparador, que medindo na saída do amp-op, pino 6, do circuito comparador resultou na tensão de +15V, aproximadamente, e na parte negativa de –4 a –6 volts, sendo influenciado pela luz externa. Os ajustes podem ser facilmente obtidos, nesse caso alterando as resistências nos potenciômetros dos emissores acima.
- Com as etapas acima montadas e medidas, finalizamos o resto do circuito. Então, começamos vários testes com a bobina, observando as suas diferentes repostas. Houve grandes dificuldades para estabilizar a esfera, freqüentemente oscilando e caindo ou

grudando no eletroímã. Para melhorar a resposta e o intervalo de operação, e para obter uma distância maior entre a esfera de aço e o eletroímã, enrolamos mais 300g de fios.

- Algumas instabilidade deviam a pequena região plana da cabeça do parafuso, melhorando após aumentar essa região.
- Finalmente com certos valores de resistências, várias vezes modificadas, nos circuitos do divisor de tensão e na saída do amplificador não inversor, achamos uma estabilidade da esfera de aço.

Resultados

Conseguimos levitar a esfera de aço de 16 mm de forma quase estática, com pequenas rotações, devido a condições iniciais e a instabilidade do circuito. Para uma esfera menor a altura da bobina deve ser modificada, pois com o peso menor não entrará em equilíbrio com a força de atração do eletroímã, sendo somente compensado pela distância entre eles.

Existe sempre uma região de operação, em que a esfera deve estar centrada a ele, dando um maior intervalo na variação da resposta.

Podemos observar que quando giramos a esfera, ela permanecerá durante um longo período no mesmo estado diminuindo a rotação apenas com o atrito do ar.

Observamos uma dificuldade em estabelecer o equilíbrio, quando a bobina estiver inclinada, devido a direção do fluxo magnético que age na esfera.

O tamanho do objeto deve ser o suficiente para bloquear o feixe de luz que passa abaixo da bobina, tendo um peso razoável para a força do eletroímã conseguir equilibrá-lo.

As pequenas variações na intensidade de luz externa, não afetam na levitação do objeto, devido as correções do *feedback*, mas nas grandes variações de intensidade de luz externa, devemos fazer algumas correções com os potenciômetros dos emissores auxiliares, introduzidos.

Conclusão

Apesar das dificuldades obtidas na montagem deste levitador, ele proporcionou uma levitação razoavelmente estável dos objetos metálicos.

Podemos observar a rotação dos objetos levitados e concluir que para objetos sob levitação a perda de energia com o atrito é bastante minimizado, apenas com a influência do atrito do ar na rotação. Com esse experimento proporcionando uma fácil visualização a respeito desse fato.

O projeto proporcionou uma compreensão da dificuldade e complexidade em relação a estabilidade da levitação magnética. Mostrando que pequenas influências externas, perturbações podem ser corrigidas através de circuitos com feedbacks, entretanto com grandes dificuldades nos cálculos.

Um outro aspecto, seria mesmo sem cálculos complexos podemos chegar a resultados desejados.

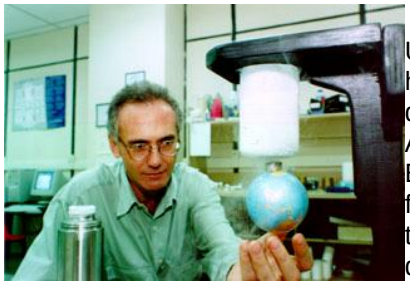
Referência

- 1-site: http://hepweb.rl.ac.uk/ppuk/PhysFAQ/levitation.html
- 2-site: http://www.oz.net/~coilgun/levitation/home.htm

Nome: Celso Ossamu Kaminishikawahara
RA: 970402
e-mail: ckaminis@lei.ifi.unicamp.br

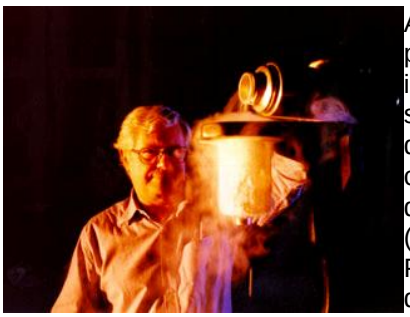
Anexo 2. Material referente a bibliografia 2.

Trem bala

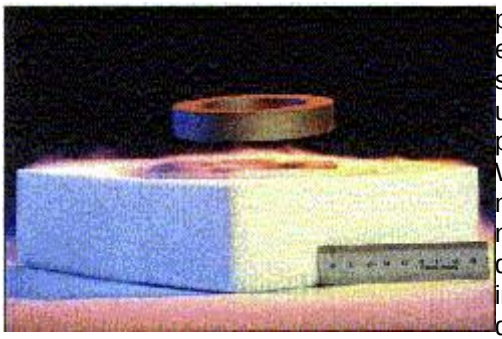


Um trem que levita a uma velocidade de 400 quilômetros por hora. Parece mágica mas é tecnologia, inteiramente nacional, que há dois anos vem sendo desenvolvida no Laboratório de Aplicações de Supercondutores (LASUP) da COPPE e da Escola de Engenharia da UFRJ. A tecnologia é baseada na formação de um campo magnético de repulsão entre os trilhos e os módulos de levitação (pastilhas supercondutoras que substituem as rodas e são compostas de ítrio, bário e cobre).

Para criar o campo magnético, que é o que faz o trem levitar, os cientistas resfriam os supercondutores a uma temperatura negativa de 196° C, utilizando nitrogênio líquido. O nitrogênio é um combustível que custa menos de R$ 0,30 e não polui o ambiente. Mas esta é apenas uma das vantagens desta tecnologia que vem sendo desenvolvida tendo como principal objetivo viabilizar a construção do trem brasileiro. A utilização da ferrita na composição do ímã é outra característica original deste projeto, pois este material é produzido em escala industrial no Brasil e custa 10 vezes menos do que os ímãs compostos de terras raras. Trata-se de um projeto tecnológico inovador, coordenado por três professores da UFRJ: Richard Stephan, da COPPE, Rubens de Andrade Júnior, da Escola de Engenharia, e Roberto Nicolsky, do Instituto de Física.



A pesquisa já gerou 26 publicações em revistas internacionais e encontra-se em etapa de conclusão da primeira fase. Para isso contou com o investimento de R$ 40 mil da FAPERJ (Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado do Rio de Janeiro) e R$ 10 mil da Fundação José Bonifácio, da UFRJ. A primeira etapa será finalizada até o final do mês de junho com a conclusão dos testes do modelo em um trilho de sete metros de extensão para avaliar o princípio de levitação em relação ao equilíbrio mecânico e a carga que o trem poderá suportar. Os pesquisadores estimam que, no período de dois anos, tenham finalizado a construção de carro e trilho em escala real. Ao fim desta etapa, o projeto, segundo os



pesquisadores, estará pronto para ser executado por uma empresa privada. A empresa WEG, uma das maiores do mundo no setor, já demonstrou interesse em desenvolver o motor. A INB (Indústrias Nucleares do Brasil) já se comprometeu a contribuir na fabricação do ímã.

O Projeto LEVMAG conta com a importante cooperação técnica do Prof. Herbert Weh, Diretor do IEMAB - Institut für Elektrische Maschinen, Antriebe und Bahnen, da Technische Universität Braunschweig, de Braunschweig, Alemanha, no projeto do protótipo trilho-veículo e no desenvolvimento da tração linear síncrona. O Prof. Weh é uma autoridade mundial em levitação magnética e tração linear, pesquisando este tema desde a década de 1960. Na fase pré-supercondutores de ATc, o IEMAB desenvolveu as bases da tecnologia Transrapid, o trem de levitação eletromagnética ativa, por atração, que alcança 420 km/h, já homologado e em fase de iniciar a construção da sua primeira linha operacional ligando Berlim a Hamburgo.

Na MAGLEV'95 - 14th Int'l Conf. on Magnetically Levitated Systems and Linear Drives, havida em Bremen, Alemanha, nos últimos dias de novembro de 1995, o Prof. H. Weh, criador da tecnologia Transrapid, mostrou que o desenvolvimento recente da técnica de fusão texturizada viabilizava a levitação magnética baseada no efeito Meissner incompleto. Chamamos, então, o processo de SQL (Superconducting Quantum Levitation), pois decorre de um fenômeno quântico, o estado supercondutor misto, que não está descrito pelas equações da eletrodinâmica, e caracteriza-se pela rede de vórtices ou fluxóides de Abrikosov.

Os blocos supercondutores de YBCO, de ATc, refrigeráveis em LN2 serão fabricados no IPHT - Institut für Physikalische Hochtechnologie, de Jena, Alemanha, por fusão texturizada (melt texturing), cujo primeiro lote estará disponível logo no início do Projeto. O IPHT cooperará na caracterização do comportamento magnético e de levitação dos blocos antes e depois dos experimentos, e na análise e interpretação dos resultados.

O projeto propõe-se a pesquisar e desenvolver novas aplicações da levitação magnética do tipo SQL (Superconducting Quantum Levitation), representando uma inovação efetiva, tanto aplicada em sistemas lineares quanto em mancais de máquinas rotativas. No sistema linear trilho-veículo, em particular, representa uma inovação radical tanto em relação à levitação EML (ElectroMagnetic Levitation), utilizada na tecnologia alemã Transrapid e na japonesa HSST, quanto à EDL (ElectroDynamic Levitation), tecnologia do trem japonês Maglev. Além do grupo IEMAB-IPHT, na

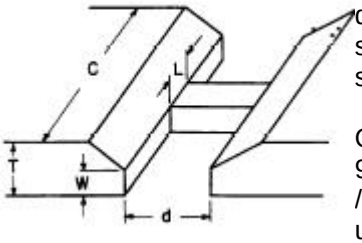
Alemanha, também na China está sendo estudado um protótipo semelhante de levitação SQL, com a mesma cooperação alemã, porém utilizando, em um monotrilho, magnetos permanentes de NdFeB, de custo muito mais elevado do que a Ferrite que será utilizada neste Projeto. Nos mancais de máquinas rotativas a proposta é substituir os mancais axiais mecânicos ou magnéticos por mancais auto-estáveis de levitação SQL.

A aplicação da levitação magnética SQL em sistemas com tração linear, possibilita o seu uso em transporte de superfície, com aplicações em transporte industrial em ambientes agressivos ou assépticos, e transporte rápido de carga e/ou passageiros. Nesta última área, tanto quanto outras técnicas de levitação magnética, a levitação SQL oferece as seguintes vantagens, se comparada às tecnologia convencionais: 1) o veículo levmag é mais eficiente do que o trem convencional ou o avião para curtas distâncias, pois é mais modulável do que ambos e, além disso, não tem tempos operacionais passivos como os aviões (check-in, taxiamento, check-out, etc.); 2) consome cerca de 30% menos energia por passageiro-km do que o trem convencional, para um trajeto de 400 km a uma velocidade média de 400 km/h, e 60% menos do que o avião para o mesmo trajeto; e 3) tem um horizonte de expansão da velocidade, se o veículo for posto em um tubo a vácuo parcial (projeto Swissmetro), enquanto que o trem convencional não pode passar de 400 km/h (barreira de tração).

O uso de mancais auto-estáveis SQL elimina a necessidade tanto de eletromagnetos quanto dos seus sensores e da sua eletrônica de realimentação. A razão é que, na levitação SQL há forças restauradoras que asseguram o auto-equilíbrio do mancal. Axialmente, pela repulsão, cresce aproximadamente segundo uma exponencial com a redução da distância entre o magneto e o bloco supercondutor. Os esforços transversais ao eixo de rotação, porém, tem resistência devida ao ancoramento da rede de vórtices em inclusões e defeitos da rede cristalina, gerando, assim, uma força restauradora que se soma à ação dos mancais magnéticos radiais ativos para estabilizar o rotor. O mancal axial SQL representa, portanto, uma ponderável vantagem para uma utilização futura em máquinas rotativas de eixos verticais.

O Grupo de Supercondutividade Aplicada do IF/UFRJ tem centrado a sua experiência em pesquisa na área de aplicações do espalhamento de Andreev para a formulação de uma nova concepção em dispositivos eletrônicos supercondutores. A partir do ano de 1997 iniciou a sua atuação na área de levitação magnética supercondutora e estabeleceu as cooperações internacionais com o objetivo deste Projeto. Nos últimos 5 anos entre os resultados alcançados encontram-se 2 patentes de invenção, em eletrônica supercondutora de Andreev, solicitadas ao INPI, através da FUJB/UFRJ. Desenvolver uma tecnologia eficiente e viável para ser implantada no Brasil é o principal desafio da equipe deste projeto que reúne cerca de 40 pesquisadores. São 18 professores da UFRJ, dois da UFF, quatro da USP e três da Alemanha, cinco doutorandos da UFRJ, além dos alunos de mestrado e de graduação.

O Estudo de Junções Supercondutoras e suas Aplicações é uma etapa natural no desenvolvimento da pesquisa sobre as junções supercondutor-metal normal-supercondutor (SNS) e as suas aplicações como substitutos específicos as junções clássicas de tunelamento. Esse tema de trabalho constitui-se em uma vertente de pesquisa básica que busca solução das equações de Bologiubov-de Gennes dependentes do tempo para diferentes potenciais de pares e configurações de junções SNS, em aproximações que simplifiquem a modelagem de junções reais com o fim de simular as suas curvas I-V, e ajuste de curvas experimentais. O mesmo modelo mostrou-se muito bem sucedido na remoção de pseudo-histerese em curva I-V de junção supercondutor-semicondutor dopado-supercondutor.



O pedido de patente PI 9500394-0 de Adir Moysés Luiz / Roberto Nicolsky refere-se a um *"Oscilador harmônico usando a resistência diferencial negativa de uma junção SNS (supercondutor - metal normal - supercondutor)"* e utiliza a resistência diferencial negativa de uma junção supercondutora do tipo SNS (supercondutor - metal normal - supercondutor). O seu uso mais importante é a obtenção de um oscilador harmônico (ou gerador de oscilações eletromagnéticas) em baixas temperaturas, ou seja, temperaturas que exigem refrigeração com hélio líquido ou hélio gasoso (temperaturas menores do que 10K). Tipicamente, usa-se uma microponte supercondutora (J) e um circuito tanque RLC ligado em paralelo à microponte J. A fonte de alimentação deve possuir uma tensão elétrica constante (corrente contínua). A tensão corresponde a um valor situado aproximadamente no ponto de inversão da concavidade da curva na região de RDN (Resistência Diferencial Negativa) da curva característica da corrente I contra tensão elétrica V de uma junção SNS. A frequência obtida pelo oscilador é igual à frequência de ressonância do circuito tanque RLC. Aproveitando-se a característica da curva I-V da junção SNS consegue-se construir um oscilador com este dispositivo, funcionando a baixas temperaturas, algo que o estado da técnica somente conseguia aproveitando-se do efeito tunel observado em junções SIS (supercondutor - isolante - supercondutor) valendo-se efeito Josephson, com níveis de potência bem menores.

Com experiência de 20 anos nesse mesmo setor empresarial, o físico nascido em Moscou e radicado no Brasil desde os 8 anos de idade, tem dedicado esta última década à defesa de uma política industrial explícita no País. A posição de Nicolsky é a de que a parceria entre universidade e empresa é muito complexa e que raramente dá resultados positivos. Portanto ela só deveria ocorrer em casos bem específicos: a academia entraria em ação apenas quando for convocada pela iniciativa privada para solucionar um problema pontual

que surja no processo produtivo. Para o diretor-geral da Protec e professor da Universidade Federal do Rio de Janeiro, todo o movimento de inovação tecnológica deve sempre ser gerido pelo setor empresarial. O professor acredita que além da própria falta de preocupação brasileira com patentes, algo deve ser mudado no sistema de concessão no país: *"Depositei dois pedidos de patentes de eletrônica superprodutora, um em 97 e um há quase sete anos, em 95.Até agora não tive respostas. Nos Estados Unidos isso é resolvido em um ano e meio"*, exemplifica.

Fonte:
http://www.planeta.coppe.ufrj.br/noticias/noticia000076.html
acesso em março de 2002
http://www.coe.ufrj.br/levmag98.html
acesso em outubro de 2002
http://www.inpi.gov.br/noticias/conteudo/clippings/27-12/1.htm
http://www.revistanexus.com.br/nex3/desta05.html
http://omnis.if.ufrj.br/~barthem/MCE14.html
acesso em janeiro de 2003
envie seus comentários para abrantes@inpi.gov.br

Anexo 3. Material referente a bibliografia 3.

Supercondutividade

Origem: Wikipédia, a enciclopédia livre.

Ir para: navegação, pesquisa

Supercondutividade (SC) é a característica intrínseca de certos materiais, quando se esfriam a temperaturas extremamente baixas, para conduzir corrente sem resistência nem perdas.

Esta propriedade foi descoberta em 1911 pelo físico neerlandês H. Kamerlingh Onnes, quando observou que a resistência elétrica do mercúrio desaparecia quando resfriado a 4K (-452°F, -269,15°C).

A supercondutividade existe só sob:

- A Temperatura Crítica
- A Corrente Crítica
- O Campo Magnético Crítico

Este fenômeno físico é apresentado por certas substâncias, como metais ou cerâmicas especiais, caracterizado pela diminuição da resistência elétrica em temperaturas muito baixas. Com isso a corrente elétrica pode fluir pelo material sem perda de energia. Teoricamente, a supercondutividade permitiria o uso mais eficiente da energia elétrica. O fenômeno surge após determinada temperatura de transição, que varia de acordo com o material utillizado. O holandês Heike Kamerlingh-Onnes faz a demonstração da supercondutividade na Universidade de Leiden, em 1911. Para produzir a temperatura necessária, usa hélio líquido. O material é mercúrio, abaixo de 4,2 K (-268,8º C).

Até 1986, a temperatura mais elevada em que um material se comporta como supercondutor é apresentada por um composto de germânio-nióbio; temperatura de transição: 23,2 K (ou -249,8º C). Para isso também se usa hélio líquido, material caro e pouco eficiente, o que impede seu uso em tecnologias que procurem explorar o fenômeno.

A partir de 1986, várias descobertas mostram que cerâmicas feitas com óxidos de certos elementos, como bário ou lantânio, tornam-se supercondutoras a temperaturas bem mais altas, que permitiriam usar como refrigerante o nitrogênio líquido, a uma temperatura de 77 K (-196º C). As aplicações são várias, embora ainda não tenham revolucionado a eletrônica ou a eletricidade, como previsto pelos entusiastas. Têm sido usados em pesquisas para criar eletromagnetos capazes de gerar grandes campos magnéticos sem perda de energia ou em equipamentos que medem a corrente elétrica com precisão. Podem ter aplicações em computadores mais rápidos, reatores de fusão nuclear com energia praticamente ilimitada, trens que levitam e a diminuição na perda de energia elétrica nas transmissões.

[editar]

Artigos relacionados

- Física
- Lev Davidovich Landau

[editar]

Bibliografia

- Adir Moyses Luiz - *Aplicações da Supercondutividade* - São Paulo - SP - Brasil - 1992 - Editora Edgard Blücher Ltda.
- José Leite Lopes - *Do átomo pré-socrático às partículas elementares: a estrutura quântica da matéria* - Rio de Janeiro - RJ - Brasil - 1992 - Editora UFRJ/Academia Brasileira de Ciências/Editora Enca

Retirado de "http://pt.wikipedia.org/wiki/Supercondutividade"

Categoria: Física

Anexo 4. Material referente a bibliografia 4.

Tecnologia

Quarta, 3 de dezembro de 2003, 09h26

Trem que levita chega a 581 km/h

AP

O Maglev está sendo testado desde 1997 e ainda não tem data para entrar em operação

Últimas de Tecnologia

» Cientistas criam nadador baseado em espermatozóide
» China terá reator de fusão termonuclear próprio
» Braço biônico movido por pensamento passa em teste
» Japão cria bateria com glicose para gerar energia

Busca

Saiba mais na Internet sobre: Ambiente

Faça sua pesquisa na Internet:

BUSCAR

O trem japonês Maglev registrou um novo recorde de velocidade ferroviária: 581 km/h. O veículo, que utiliza um mecanismo magnético que o faz levitar sobre os trilhos, superou o recorde anterior em 2 km/h.

O Maglev foi testado pela Companhia Ferroviária Central Japonesa em uma pista de treinos no norte do Japão. Apenas 12 funcionários da empresa estavam dentro da composição no momento da viagem.

De acordo com os técnicos, o trem fica mais estável quanto maior for a velocidade da composição. Em operação, a velocidade máxima do Maglev será de 500 km/h. Atualmente os mais modernas trens-bala japoneses podem ultrapassar os 300 km/h.

Anexo 5. Material referente a bibliografia 5.

Maglev Technology In Use

While maglev transportation was first proposed more than a century ago, the first commercial maglev train made its test debut in Shanghai, China, in 2002 (click here to learn more), using the train developed by German company Transrapid International. The same line made its first open-to-the-public commercial run about a year later in December of 2003. The Shanghai Transrapid line currently runs to and from the Longyang Road station at the city's center and Pudong airport. Traveling at an average speed of 267 mph (430 kmh), the 19 mile (30 km) journey takes less than 10 minutes on the maglev train as opposed to an hour-long taxi ride.

Despite U.S. interest in maglev trains over the past few decades, the expense of building a maglev transportation system has been prohibitive. Estimated costs for building a maglev train system in the United States range from $10 million to $30 million per mile. However, the development of room-temperature superconducting supermagnets could lower the costs of such a system. Room-temperature superconductors would be able to generate equally fast speeds with less energy.

Big Maglev on Campus

The administration at Old Dominion University in Virgina had hoped to have a super shuttle zipping students back and forth across campus starting back in the fall semester of 2002. Several semesters have passed, and all the while the maglev remains motionless. But, that could soon be changing. After being derailed for more than 18 months, the maglev train project at Old Dominion is back on track. Approximately $14 million has already been spent on the project, and even more money will be required to get things up and running.

For more information on magnetic levitation trains and related topics, check out the links on the next page.

Anexo 6. Material referente a bibliografia 7.

Magnetism and Earnshaw's Theorem

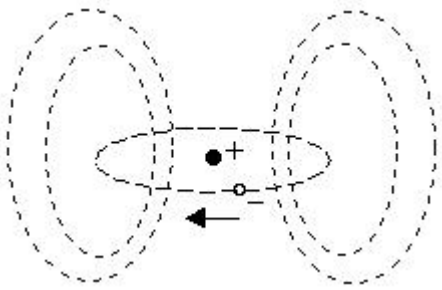
Speaking well about Homer is not a thing you have mastered, it's a divine power that moves you, as a "Magnetic" stone moves iron rings. (That's what Euripides called it; most people call it "Heraclian".) This stone not only pulls those rings, if they are iron, it also puts power in the rings, so they in turn can do just what the stone does – pull other rings – so that there is sometimes a very long chain of iron pieces, hanging from one another. And the power in all of them depends on this stone. – Socrates in Plato's "Ion" c. 380 BC

Magnetism has been known since ancient times. The magnetic property of lodestone (Fe_3O_4) was mentioned by the Greek philosopher Thales (c. 500 BC), and the Greeks called this mineral "Magnetic", after the province of Magnesia in Thessaly where it was commonly found. It was also found in the nearby province of Heraclia, which is presumably why Socrates says that most people called the stone "Heraclian". Apparently we have the great dramatist Euripides to thank for not having to pronounce the electro-heraclian field.

About 1000 AD the Chinese began to use lodestone as a compass for finding directions on land, and soon afterwards Muslim sailors were using compasses to navigate at sea. Europeans began using magnetic compasses for navigation around 1200 AD, probably bringing the idea back from the Crusades. The first scientific study of magnets was apparently by the English physician William Gilbert in 1600, who is credited with "discovering" that the Earth itself is a magnet. After Gilbert, the subject languished for almost 200 years, as the attention of most scientists turned to gravitation and working out the consequences of Newton's great synthesis of dynamics and astronomy. Not until 1785 was the subject taken up again, first by the Frenchman Charles Coulomb, then by Poisson, Oersted, Ampere, Henry, Faraday, Weber, and Gauss, culminating in Maxwell's classical synthesis of electromagnetic theory in 1875.

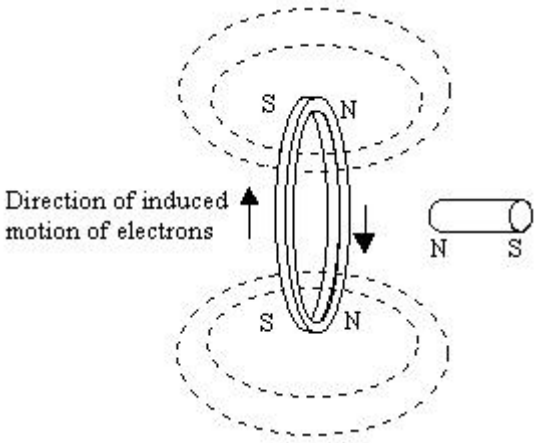
However, despite the great achievements of these scientists, no satisfactory understanding of the various kinds of magnetic behavior exhibited by different materials was achieved. Only with the advent of quantum mechanics in the 1920's did it become possible to give a coherent account of the main magnetic properties of materials. It's a surprisingly complex subject, but we can give a broad outline of the modern explanations of magnetic phenomena.

The three main types of magnetic behavior exhibited by material substances are called diamagnetism, paramagnetism, and ferromagnetism. The first two can be explained in terms of the magnetic fields produced by the orbital motions of the electrons in an atom. Each electron in an atom can be regarded as having some "orbital" motion about the nucleus, and this moving charge represents an electric current, which sets up a magnetic field for the atom, as shown below.



Many atoms have essentially no net magnetic dipole field, because the electrons orbit the nucleus about different axes, so their fields cancel out. Thus, whether or not an atom has a net dipole field depends on the structure of the electron shells surrounding the nucleus.

In broad terms, diamagnetism and paramagnetism are different types of responses to an externally applied magnetic field. *Diamagnetism* is a natural consequence of Lenz's law, according to which the electric current resulting from an applied field will be in the direction that opposes the applied field. In other words, the induced current will flow in the direction that creates a field opposite to the applied field, as illustrated below.



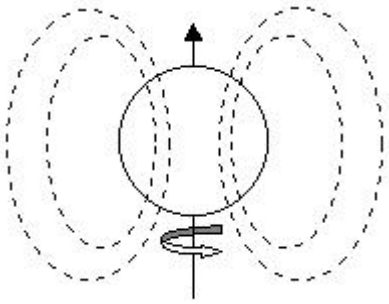
Conservation of energy implies that a force is required to push the magnet through the ring, thereby setting up the flow of current (in the opposite direction of the electron motion). Hence there is a repulsive force between the magnet and the conducting ring. Likewise when an atom is subjected to an applied magnetic field, there is a tendency for the orbital motions of the electrons to change so as to oppose the field. As a result, the atom is repelled from any magnetic field. Notice that this is true regardless of the polarity of the applied field, because the induced "currents" (i.e., the induced changes in the orbital motions of the electrons) invariably act to oppose the applied field. This phenomenon is present in all substances to some degree, but it is typically extremely small, so it is not easily noticed. It is most evident for elements whose atoms have little or no net magnetic moment (absent an externally applied field). Among all the elements at ordinary room temperatures, bismuth has the strongest diamagnetism, but even for bismuth the effect is extremely weak, because the currents that can be established by the electron orbital motions are quite small. It's possible, however, to construct a perfect diamagnet using superconductivity. A superconductor is, in many respects, like a quantum-mechanical atom, but on a macroscopic scale, and it can support very large currents. In accord with Lenz's Law, these currents oppose any applied field, so it's actually possible to achieve stable levitation of a permanent magnet over a superconductor.

In view of Lenz's Law, it might seem surprising that any material could actually be *attracted* to a magnetic field, but in fact there are many such substances. This is due to the phenomena called *paramagnetism*. Unlike the atoms of diamagnetic materials, the electrons of atoms in paramagnetic materials are arranged in such a way that there is a net magnetic dipole due to the orbital motions of the electrons around the nucleus. Thus, each atom is a small permanent magnet, but the poles tend to be oriented randomly, so a macroscopic sample of the substance usually has no net magnetic field. When such a substance is subjected to an external magnetic field, there is (as always) a small diamagnetic effect on the orbital motions of the electrons, tending to cause a repulsion (as explained above), but there is also a tendency for the individual atomic dipoles to become aligned with the imposed field, rather than being oriented randomly. This gives the substance an overall net magnetic dipole in the same direction as the applied field, so if the substance is located in a non-uniform magnetic field, it will be attracted in the direction of increasing field strength. This paramagnetic attraction effect is much stronger than the diamagnetic repulsion, so paramagnetism usually masks the effect of diamagnetism for such substances. However, even paramagnetism is so weak that it's often not noticed, because the thermal agitation of the atoms (at room temperature) tends to disrupt the alignment.

The last major category of magnetic behavior is called *ferromagnetism*. This is the phenomenon responsible for the strong magnetic properties of iron, and for the existence of permanent magnets, i.e., macroscopic substances (such as magnetite) that exhibit an overall net magnetic dipole field, even in the absence of any externally applied field. Many of the early researchers in the science of magnetism thought this was nothing but a strong and persistent form of paramagnetism, but the strength and persistence of ferromagnetism show that it is the result of a fundamentally different mechanism, an effect that is absent in merely paramagnetic substances. Whereas both diamagnetism and paramagnetism are essentially due to the atomic fields resulting from the orbital motions of the electrons about the nucleus, ferromagnetism is due almost entirely to alignment of the *intrinsic* spin axes of the individual electrons.

An individual electron possesses a quantum property known as "spin", which is somewhat analogous to the spin of a macroscopic object. (This analogy is not exact, and can be misleading in some circumstances, but

it's useful for gaining an intuitive understanding of the magnetic properties of materials.) According to this view, an electron's charge is distributed around its surface, and the surface is spinning about some axis, so there is a tiny current loop, setting up a magnetic field as illustrated below.



(The contribution of the nucleus itself to the magnetic field of an atom is typically negligible compared with that of the electrons.) In most elements the spin axes of the electrons point in all different directions, so there is no significant net magnetic dipole. However, in ferromagnetic substances, the intrinsic spins of many of the electrons are aligned, both within atoms and between atoms. The key question is what causes all these dipoles to be aligned, especially in the absence of an external field. It can be shown that the dipole interaction itself is not nearly strong enough to achieve and maintain alignment of the electron spin axes at room temperatures, so some other factor must be at work.

Quantum mechanics furnishes the explanation: For particular arrangements of certain kinds of atoms in the lattice structure of certain solids, the inter-electron distances within atoms and between neighboring atoms are small enough that the wave functions of the electrons overlap significantly. As a result, there is a very strong effective "coupling force" between them due to their indistinguishability. This is called an "exchange interaction", and is purely a quantum-mechanical phenomenon. There is no classical analogy. In essence, quantum mechanics tells us that there is a propensity for the identities of neighboring electrons to be exchanged, and this locks the spin orientations of the electrons together. (This is actually true only under certain circumstances. It's also possible for exchange interactions to lock the spins of neighboring electrons in opposite directions, in which case the behavior is called anti-ferromagnetism.) In order for the exchange interaction to operate, the inter-electron distances must be just right, and these distances are obviously affected by the temperature, so there is a certain temperature, called the Curie temperature, above which ferromagnetism breaks down.

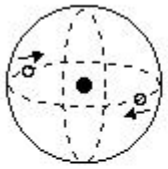
Only five elements have electron shell structures that support ferromagnetism, namely, iron, cobalt, nickel, gadolinium, and dysprosium. In addition, many compounds based on these elements are also ferromagnetic. (One example is the compound Fe_3O_4, also called lodestone, which the ancient Greeks found lying around in Magnesia.) These are all "transition elements", with partially populated 3d inner electron shells. When magnetized, the spin axes of all the electrons in the 3d shells are aligned, not only for one atom, but for neighboring atoms as well. This gives the overall lattice of atoms a very strong net magnetic dipole. It's worth noting that this is due to the intrinsic spins of the individual electrons, not due to the orbital motions of the electrons (as is the case with diamagnetism and paramagnetism).

Recall that, for paramagnetic substances, the alignment of atomic dipoles is maintained only as long as the external field is applied. As soon as the field is removed, the atomic dipoles tend to slip back into random orientations. This is because the ordinary dipole field is not nearly strong enough to resist thermal agitation at room temperatures. In contrast, after a ferromagnetic substance has been magnetized, and the externally applied field is removed, a significant amount of magnetization remains. (This effect is called hysteresis.) In general, the electron spins of all the atoms with a suitable lattice will be locked in alignment, with or without an external field, but a real large-scale piece of a substance typically cannot be a single perfectly coherent lattice. Instead, it consists of many small regions of pure lattices, within which the exchange interaction keeps all the electron spins aligned, but the exchange interaction does not extend across the boundaries between domains. In effect, these boundaries are imperfections in the lattice. As a result, although each small domain is perfectly magnetized, the domains in an ordinary piece of iron are not aligned, so it has no significant net magnetic field. However, when subjected to an external field, there is enough extra impetus to trigger a chain reaction of alignment across the boundaries of the individual regions in the iron, causing the overall object to become a magnet. This is the phenomenon described by Socrates, when he explained how a Magnet has the power not only to attract iron, but to convey that power to the iron. He was describing

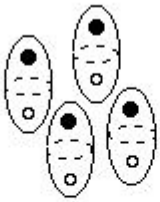
a purely quantum mechanical effect, by which an applied magnetic field causes the intrinsic spin axes of individual electrons in the 3d shells of transition elements such as iron to become aligned - although he presumably wasn't thinking about it in those terms.

When the external field is removed, the various regions in the iron object will tend to slip back to their natural orientations, given the imperfections in the lattice structure, so much of magnetism of the object will be lost. However, there will be typically have been some structural re-organization of the lattice (depending on the strength of the applied field, and the temperature of the iron), so that a higher percentage of the domains are aligned, and this re-structuring of the lattice persists even after the external field is removed. This accounts for the hysteresis effect, by which a piece of iron acquires some permanent magnetism after having been exposed to a strong field. In order to create a strong permanent magnet, a piece of ferrous material is heated to a molten state, and then placed in a strong magnetic field and allowed to cool. This creates a lattice structure with very few magnetic imperfections in the lattice, so the electron spins are naturally locked in alignment throughout the material. Not surprisingly, if a magnetized piece of iron is struck with a hammer, it's possible to scramble the domains and thereby de-magnetize the object.

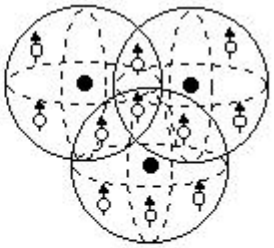
In summary, the three main kinds a magnetism are illustrated schematically in the figures below.



Diamagnetism:
Lenz's Law applied to orbiting electrons causes atoms to be repelled from a magnetic field.



Paramagnetism:
Atomic dipoles aligned to an applied magnetic field, causing the atoms to be attracted.



Ferromagnetism:
Electron spin axes are aligned due to the "exchange" interaction. Lattice structure fixes boundaries of alignment.

One of the most common questions about permanent magnets is whether there exist a stable and static configuration of permanent magnets that will cause an object to be levitated indefinitely. Obviously the levitation itself is not a problem, because many magnets have fields strong enough to lift their own weight. Equilibrium is also not a problem, because there is obviously a configuration at the boundary between falling and rising. The problem is stability. In order to have stability, there must be a restorative force counter-acting any displacement away from the equilibrium point.

We need to be careful when considering this question, because, as discussed above, there are several kinds of magnetic behavior exhibited by different substances in different circumstances. We can certainly achieve stable levitation with a superconductor, which is really just a perfect diamagnet. In fact, even at room temperatures, it is possible to use the diamagnetic property of a substance like bismuth to achieve (marginal) stability for magnetic levitation. Of course, in such a case, the paramagnet is too weak to do the actual levitating; it just provides a small window of stability for an object that is actually being lifted by ferromagnetic effects. But if we set aside the phenomenon of paramagnetism, which is a constantly self-adjusting field, and focus strictly on fixed fields as are produced by ferromagnets, can we achieve stable static levitation?

In 1842, Samuel Earnshaw proved what is now called Earnshaw's Theorem, which states that there is no stable and static configuration of levitating permanent magnets. (See Earnshaw, S., On the nature of the molecular forces which regulate the constitution of the luminiferous ether., 1842, Trans. Camb. Phil. Soc., 7, pp 97-112.) The term "permanent magnet" is meant to specify ferromagnetism, which is truly a fixed magnetic field relative to the magnet. In contrast, the phenomena of diamagnetism is not really "permanent", both because it requires the presence of an externally applied field, and more importantly (from the standpoint of Earnshaw's theorem) because the diamagnetic field constantly adapts to changes in the applied external field. This is why stable diamagnet levitation (of which superconductors provide the extreme example) is possible, in spite of Earnshaw's theorem.

It's worth noting that Earnshaw's theorem - ruling out the possibility of static stable levitation - presented scientists at the time with something of a puzzle, if not an outright paradox, because we observe stable configurations of levitating objects every day. For example, the book sitting on my desk is being levitated, and some force is responsible for this levitation. Admittedly it may not have been clear in Earnshaw's day that the book's interaction with the desk was via electromagnetic forces, but Earnshaw's theorem actually applies to any classical particle-based inverse-square force or combination of such forces. Since we observe stable levitation (not to mention stable atoms and stable electrons), it follows from Earnshaw's theorem that there must be something else going on, viz., we cannot account for the stable structures we observe in nature purely in terms of classical inverse-square forces, or even in terms of any kind of classical conservative forces. In order to explain why stable atoms are possible (i.e., why the electrons don't simply spiral in and collide with the protons) and why other stable structures are possible, it's necessary to invoke some other principle(s). Something like quantum mechanics and the exclusion principle is required.

The proof of Earnshaw's theorem follows closely from Gauss's law. Indeed this accounts for the generality of its applicability. To consider the simplest case, suppose we wish to arrange a set of charged particles in such a way that a region of stable containment for an electron is established. This requires the existence of a point in empty space such that the force vector everywhere on the surface of an incremental region surrounding that point is directed inward. But according to Gauss's law, the integral of the force vector over any closed surface equals the charge contained within the surface. Thus the integral of the force over any closed surface in empty space is zero, which implies that if it points inward on some parts of the surface, it must point outward on other parts, so it is clearly not a stable equilibrium point. The best we could do is have a force of zero over the entire surface, but this too is not stable, because there is no restorative force to oppose any perturbations. According to Gauss' law, the only point that could possibly be a stable equilibrium point for an electron is a point where a positive charge resides, e.g., a proton. Classically an electron would be expected to collapse onto a proton, assuming it had no angular momentum. In the presence of angular momentum, it's possible to have (idealized) stable orbits in the context of Newtonian gravitation, because Newton's gravity did not radiate energy when charges (i.e., masses) are accelerated. However, electric charges were known classically to radiate energy, so even naive orbital models were ruled out. This made it clear that some other principles must be invoked to account for stable configurations of electrically charged matter. (In general relativity, simple two-body orbital systems also radiate energy, in the form of gravitational waves, so the same argument can ultimately be against the possibility of stable configurations for inertially charged matter as well, although in this case the rate of energy radiation is so low that the configurations are essentially stable for practical purposes.)

Incidentally, if we don't require a *static* configuration, then it is possible to achieve quasi-stable levitation with permanent magnets by spinning the levitated object and using the gyroscopic moments to offset the instability. A number of interesting devices of this type have been constructed. This form of levitation is called quasi-stable (rather than stable) because the rotation of the levitating object results in the emission of energy in the form of electromagnetic waves, so eventually the rotation will be brought to a stop, and then the system will go unstable