

Objetivos de Aprendizado

1. Medir uma componente do vetor campo magnético de um ímã ao longo de ao menos uma direção espacial em função da distância.
2. Linearizar uma função polinomial.
3. Realizar ajuste linear por software considerando o limite de validade do modelo.
4. Lidar com o caráter vetorial do campo magnético (grandeza Vetorial).
5. Determinar experimentalmente o vetor momento de dipolo magnético de um ímã.

Introdução

O objetivo deste projeto é medir a intensidade do campo magnético gerado por ímãs utilizando *smartphones* equipados de sensor de campo magnético e aplicativos adequados para obter a medida do campo magnético. O trabalho é baseado no artigo de Arribas *et al.* [1]. Você pode utilizar esse artigo como base para desenvolver seu projeto, além dessa apostila.

Considere um ímã permanente no formato de uma barra alongada no eixo y e com pólos magnéticos colocados neste eixo, tal como mostrado na Figura 1. O comprimento do ímã na direção do dipolo é dado pela dimensão d , orientada no eixo y .

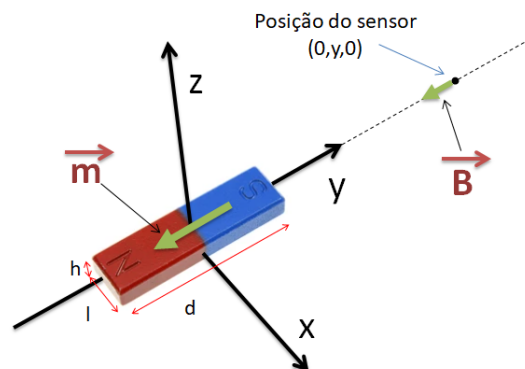


Figura 1: Ímã com momento magnético m alinhado com o comprimento d e orientado no eixo y do sistema de coordenadas. Um sensor na posição $(0, y, 0)$ mede o vetor campo magnético.

Para o caso em que o ímã possa ser aproximado por um dipolo, ou seja $l, h \ll d$, a intensidade do campo magnético na direção do eixo do momento magnético m do ímã segue a seguinte relação[2]:

$$B = \frac{\mu_0 m y}{2\pi \left(y^2 - \frac{d^2}{4} \right)^2} \quad (1)$$

onde y é a distância do centro do ímã à posição do sensor da medição, m é o momento de dipolo magnético do ímã e d é a distância entre o pólo norte e o pólo sul do ímã (que deve ser o eixo longo do dipolo

magnético). Caso tenhamos as condições de um ímã pequeno e sejam feitas medições a uma distância longe da fonte magnética tal que $y \gg d$, temos:

$$B \cong \frac{\mu_0 m}{2\pi y^3} + \frac{\mu_0 m d^2}{4\pi y^5} + o\left(\frac{d^4}{y^7}\right),$$

portanto em primeira ordem podemos usar a aproximação

$$B = \frac{\mu_0 m}{2\pi y^n} \quad (2)$$

com n igual à 3.

Dessa forma é possível esperar que uma lei de escala seguindo y^{-3} consiga descrever bem o comportamento da intensidade do campo magnético em função da distância da fonte magnética.

A equação 2 representa o modelo que utilizaremos nesse experimento. A hipótese que faremos é que esse modelo é capaz de descrever o comportamento do campo magnético ao longo do eixo colinear ao momento magnético de qualquer ímã (alinhamento Norte-Sul). Esse modelo é baseado no eletromagnetismo (teoria que dá suporte ao modelo) e em suposições sobre o sistema. Por exemplo, duas suposições feitas são que o ímã pode ser descrito por apenas um dipolo magnético e que o campo magnético está alinhado na direção ao longo do comprimento do ímã. Na equação (2) também há a suposição de que o comprimento do ímã é muito menor que a distância entre o centro do ímã e o sensor do celular. Se essa última suposição não for correta, a equação (2) não poderia ser utilizada e seria preciso utilizar a equação (1). Analogamente, se alguma suposição feita para obter a equação (1) não for válida, seria preciso utilizar um modelo mais completo para descrever o campo magnético gerado pelo ímã (em particular se o ímã não puder ser descrito como um dipolo m).

Simulações Falstad (Atividade Opcional)

Antes de começar a planejar o experimento, faça simulações no Falstad:

<https://www.falstad.com/vector3dm/>

Através de simulações, você poderá observar como é a distribuição de campo magnético em torno de um anel de corrente ou outras configurações de corrente (como vários anéis empilhados). Isso é análogo à distribuição causada por um ímã (se ele pode ser descrito por um dipolo). Com isso, você pode se preparar para imaginar a distribuição que observará com um ímã real. Essa **simulação é opcional** mas é sugerida como parte do planejamento. Note que a análise da simulação pode ser quantitativa e assim ajudar muito ao planejar o experimento.

Materiais e Métodos

No Experimento 2, aqueles que realizaram a tarefa optativa determinaram em suas casas a intensidade da componente horizontal do campo magnético terrestre utilizando um *smartphone*. No respectivo experimento foi usada uma característica que muitos dos *smartphones* atuais possuem: 3 sensores conhecidos como magnetômetros, alinhados de forma a permitir a medição das três componentes x - y - z do campo magnético. Com isto foram capazes de fazer a medição da intensidade do campo magnético local. Para este projeto sugerimos utilizar o mesmo aplicativo utilizado no Experimento 2: *Physics Toolbox Magnetometer* (disponível para Android e iOS).

Neste projeto, além de um *smartphone*, será necessário ainda papel milimetrado (ou uma régua milimetrada, ou outra forma de medir distâncias) e um ímã permanente pequeno. A Figura 2(a) mostra um esquema do experimento e a Figura 2(b) exemplifica uma montagem com um *smartphone* e um ímã de geladeira. Os ímãs sugeridos são ímãs pequenos e não muito intensos (com relação ao campo da Terra). Lembre que uma das suposições da equação 1 diz respeito à geometria do ímã e ao fato de que o mesmo deve poder ser descrito como um dipolo. O campo gerado pelo ímã da Figura 2(b) e (c) talvez não seja bem descrito pelo campo de um dipolo!

Nota: Exemplos de ímãs potencialmente adequados são os ímãs presentes dentro de fones de ouvido intra-auriculares, pequenos ímãs que fixam objetos em quadros magnéticos ou geladeiras, ímãs em bolsas e estojos ou caixas com fechamento magnético ou ímãs análogos encontrados em outras aplicações cotidianas.

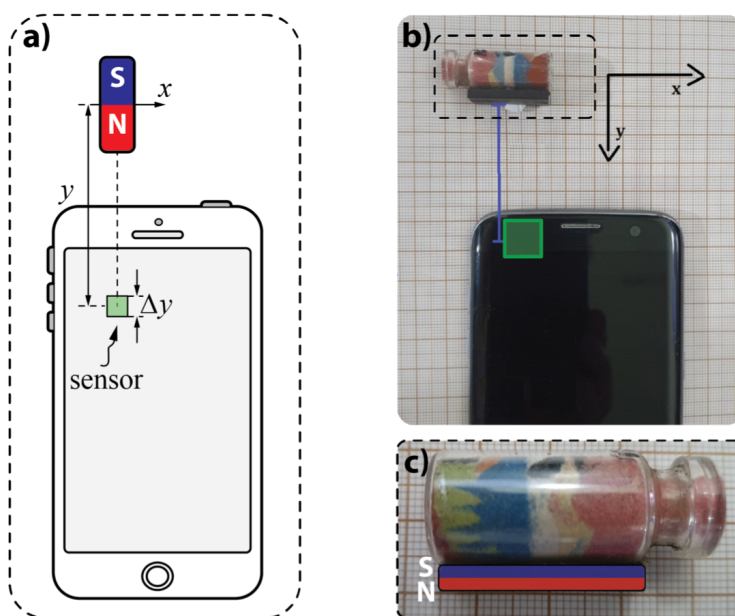


Figura 2: **a)** Representação esquemática da montagem experimental mostrando o ímã, o celular e a localização do sensor magnético no celular e sua incerteza na posição Δy . **b)** Foto ilustrativa do arranjo experimental para as medições de intensidade do campo magnético do ímã de geladeira em função da distância na direção y . O quadrado verde sobre o celular representa a provável posição do detector de campo magnético do dispositivo. Note que a posição do detector varia de acordo com a marca/modelo do celular. É importante conhecer a posição com precisão pois a distância entre o sensor de campo magnético e o ímã depende da posição do sensor no aparelho. **c)** Neste caso em particular o ímã está polarizado ao longo da espessura. Conhecer a polarização do ímã a ser medido é fundamental para as medições propostas.

Em relação às incertezas associadas às medições da distância, é possível obter uma precisão adequada usando o papel milimetrado? Lembrem-se que é possível existirem incertezas devido à falta de paralelismos e paralaxe na hora da medida. Leve em consideração que o sensor de campo magnético do *smartphone* tem uma localização desconhecida, que nas Figuras 2(a) e (b), é dada pelo quadrado em verde. Isto quer dizer que uma medição de y tem uma incerteza Δy relativa à posição e ao tamanho do sensor. Esta inclusive pode ser a maior fonte de incerteza experimental nas medições de distâncias (notando que é algo sistemático, sempre igual). Isto pode ser confirmado através das informações dos datasheets disponíveis na internet sobre os sensores magnéticos (o programa de Android Physics Toolbox Magnetometer mostra o modelo de sensor Hall equipado no *smartphone*). Leve estes fatores em consideração (e outros que julgar relevantes) para compor a incerteza da medição da distância. É interessante observar que além da incerteza dada pelo fabricante, as medições oscilam constantemente (de maneira similar ao voltímetro do Experimento 1). Leve ambos os fatores em consideração (e outros que julgar relevantes) para compor a incerteza da medição do campo magnético.

As medições devem ser feitas ao longo do eixo do momento magnético do ímã em ambos os lados do ímã (se afastando do polo sul e se afastando do polo norte) tanto aproximando quanto afastando o ímã do sensor (ou o sensor do ímã, como desejarem). Assim, são 4 conjuntos de dados da intensidade do campo magnético do ímã em função da distância do ímã ao sensor. Comece o registro dos dados na distância máxima entre o sensor e o ímã.

Por fim, realizar a medição ao longo do eixo perpendicular ao anterior (ainda no mesmo plano). Apresentar um gráfico com a intensidade do campo magnético ao longo dos dois eixos medidos (paralelo e perpendicular ao momento de dipolo magnético do ímã).

IMPORTANTE

- Para obter os valores corretos da distância entre a posição do detector em seu *smartphone* e o ímã, é necessário saber qual a posição do magnetômetro dentro do aparelho celular e levar em consideração essa posição em suas medidas. Essa posição está indicada na Figura 2(a) por um quadrado verde, porém a posição pode mudar dependendo da marca/modelo do celular. Após determinar a posição do sensor, também é necessário determinar as direções $x'-y'-z'$ desse sensor e relacioná-las com as direções $x-y-z$ do seu sistema de coordenadas externo. Como você fará esse procedimento?
- Outro ponto importante é avaliar qual o efeito do valor do campo magnético da Terra sobre suas medidas. Existe alguma maneira de posicionar seu celular para que esse efeito seja desprezado (em ao menos uma direção)?
- Após fixar seu sistema referencial para realizar as medidas, o próximo passo é alinhar o eixo norte-sul do ímã com relação ao eixo y e registrar os valores da intensidade do campo magnético em função da distância y até o sensor para o eixo y , como pode ser observado na Figura 2(a). Movimentar o ímã (ou o *smartphone*) apenas nessa direção escolhida. Note que o campo magnético é uma grandeza vetorial e nos interessamos pela componente na direção do eixo ao longo do qual a distância é variada (eixo y).
- Dependendo da resolução da medida do seu aparelho, deverá haver uma variação da medida mesmo para uma distância e orientação fixas entre o *smartphone* e o ímã. Como esse fenômeno será levado em consideração na avaliação da incerteza da medida do campo magnético?

- Dependendo do tipo de sensor presente em seu *smartphone* e de outros fatores (como a presença de materiais ferromagnéticos na proximidade do sensor), o fenômeno conhecido como histerese pode ser observado em suas medidas. Isso significa que as medições aproximando o ímã do celular ou afastando o ímã do celular podem fornecer valores diferentes mesmo levando em consideração a incerteza das medidas. Pesquise esse fenômeno e descreva como levá-lo em consideração na sua análise.
- É importante levar em conta também o efeito de saturação. Ímãs de neodímio ($\text{Nd}_2\text{Fe}_{14}\text{B}$) podem ser muito intensos e mostrar efeitos de saturação pelos sensores do celular. Neste caso as medidas precisarão ser refeitas considerando-se distâncias maiores entre o ímã e o celular. Lâminas magnéticas também exigem cuidados especiais e talvez não sejam adequadas para o propósito de seu projeto.
- Tenha cuidado com a presença de objetos ferromagnéticos nas proximidades do ímã e *smartphone*. Qualquer objeto contendo quantidades significativas de ferro, níquel ou cobalto irá criar uma distorção local do campo magnético terrestre e do ímã sob estudo.

Sobre a análise

Vocês devem ter medidas da intensidade do campo magnético em função da distância entre o sensor e o ímã para várias distâncias. Atenção: Julgue se você coletou dados suficientes que lhe permitam fazer um ajuste linear adequado aos dados. O gráfico dos dados experimentais deve ter vários pontos de modo a minimizar as incertezas dos coeficientes angular e linear. Considere a necessidade de coletar e adicionar mais pontos ao seu gráfico. Lembre que você deve ter 4 conjuntos de dados, todos análogos e que devem mostrar o mesmo comportamento (se não houver histerese).

Os resultados da intensidade do campo magnético em função da distância permite vocês obterem o gráfico de $B(y)$ em função de y . Este gráfico permite obter a lei de escala do decaimento do campo magnético conforme equação 2?

Para a obtenção do momento de dipolo magnético m , bem como do expoente da distância (lei de escala) presentes na equação 2 é necessário algum tipo de linearização? Qual tipo seria log, log-log, etc?

Todos os dados coletados podem ser utilizados para calcular o expoente n ? Se necessário utilize um subgrupo de pontos coletados que satisfaça sua linearização.

Por fim, um ajuste da função linearizada aos dados juntamente com os parâmetros do modelo poderá permitir a determinação dos valores desconhecidos da equação.

Na discussão

A partir de suas medidas, relacionar a possibilidade e as dificuldades de se obter a intensidade do momento magnético de um ímã convencional.

Discutir se o modelo (equação 2) foi capaz de descrever a variação do campo magnético com a distância. Ou seja, se n é compatível com a previsão ($n=3$). Essa é a hipótese que está sendo testada.

Os dados de suas medições quando o detector estava bem próximo ao ímã tem o mesmo comportamento daqueles mais distantes? Qual a importância deles na validade da hipótese (equação 2)? Lembrem-se que o modelo foi obtido sob a condição de que $y \gg d$.

Vídeo para ilustração do trabalho do grupo

Um vídeo da preparação experimental com aproximadamente 1 minuto **deverá** ser submetido no Moodle em uma tarefa própria. O vídeo deve mostrar como o grupo planeja realizar o experimento e mostrar resultados já obtidos. Seu vídeo deverá conter:

1. Passos para a medição da componente longitudinal do campo magnético.
2. Fotos/*screenshots* da tela do *smartphone*.
3. Alguns valores medidos da componente longitudinal do campo magnético e uma estimativa de suas incertezas de acordo com a discussão nos artigos citados na literatura oferecida.
4. Os valores de distância associados com as medidas anteriores incluem a posição do sensor e discussão sobre a posição e tamanho do sensor. Incluir as incertezas estimadas a cada distância.

Assim, o vídeo de aproximadamente um minuto deverá ilustrar o procedimento utilizado para se medir o campo magnético a uma distância controlada de um *smartphone* a um ímã permanente. Deverá ainda conter algumas medidas da intensidade do campo magnético em diferentes posições entre o sensor do *smartphone* e o ímã. Deve ter a montagem experimental completa para registro de dados e indicar também no vídeo algumas leituras no visor do *smartphone*.

No seu relatório:

1. Descreva o procedimento experimental adotado no projeto. Em particular, descreva como você tratou os itens destacados na seção evidenciada como **IMPORTANTE** na seção 2.
2. Quais são as variáveis independente (grandeza física que é propositadamente alterada) e dependente (grandeza física alterada em decorrência de alteração imposta à variável independente)?
3. Encontre a lei de escala para o fenômeno linearizando apropriadamente a equação 2.
4. Construa uma tabela contendo as 4 configurações com os valores medidos de $B(y)$, distância entre ímã e *smartphone* e uma coluna de dados com os valores linearizados. Mostre explicitamente a propagação de incertezas necessária para calcular a incerteza da grandeza linearizada.
5. Com os dados obtidos e usando um software de sua preferência, faça os gráficos necessários da variável dependente linearizada (ordenada) versus variável independente (abscissa) para o campo magnético. O gráfico deve conter no mínimo 4 curvas: a) se aproximando do pólo sul, b) se afastando do pólo sul, c) se aproximando do pólo norte; d) se afastando do pólo norte. Se houver medidas para outros eixos ou outros ímãs, faça outros gráficos.

Atenção: *Você coletou dados suficientes que lhe permitam fazer um ajuste linear adequado aos dados? O gráfico dos dados experimentais deve ter vários pontos de modo a minimizar a incerteza dos coeficientes angular e linear. Considere a necessidade de coletar e adicionar mais pontos ao seu gráfico.*

6. Descreva o padrão observado no gráfico. A grandeza linearizada é constante ou cresce/decrece com a distância? A relação entre as grandezas é de fato linear ou exibe algum outro tipo de dependência?
7. Existe histerese no gráfico? O sensor apresentou saturação? Como isso será levado em consideração ao realizar o ajuste dos dados e ao discutir a validade do modelo?
8. Há algum valor espúrio nos dados? Ou seja, há algum valor que destoe marcadamente da tendência dominante dos dados? Como pretende lidar com ele?
9. Usando um software de sua preferência, faça um ajuste linear aos dados e obtenha os coeficientes linear e angular (e suas incertezas) da reta. Restrinja o ajuste aos dados apropriados, considerando o limite de validade do modelo.

Atenção: Você só deve tentar fazer um ajuste linear aos dados se estes demonstrarem uma dependência linear entre as grandezas. Por exemplo, não tente ajustar uma reta a um conjunto de dados que parecem representar uma parábola!

10. Discuta a validade da equação (2) para seus dados. Se a equação (2) não descreve os dados, discuta qual ou quais das suposições necessárias para derivar essa equação não foram respeitadas. Exemplo de suposição: o campo magnético do ímã pode ser descrito como sendo gerado por um dipolo magnético.
11. Se a equação (2) se mostra válida, use os resultados do ajuste linear para calcular o momento de dipolo magnético do ímã com a incerteza associada.
12. Apresentar um gráfico com a intensidade do campo magnético ao longo dos dois eixos medidos (paralelo e perpendicular ao momento de dipolo magnético do ímã).

Fontes de Incertezas

Discuta em seu relatório as possíveis fontes de incertezas e como elas afetam os valores experimentais obtidos. Neste projeto (experimento), as principais fontes de incerteza a serem consideradas são:

- Medição com a régua (ou papel milimetrado); localização do sensor; tamanho do sensor;
- leitura do display do *smartphone*; medições repetidas ou medição única;
- Perpendicularidade da orientação da reta *smartphone* - ímã em relação ao eixo do dipolo do ímã.

Para cada uma das fontes citadas acima, avaliar a incerteza associada e combinar as incertezas pertinentes.

Bibliografia

- [1] Arribas, E., Escobar, I., Suarez, C. P., Najera, A., & Beléndez, A. (2015). Measurement of the magnetic field of small magnets with a smartphone: a very economical laboratory practice for introductory physics courses. *European Journal of Physics*, 36(6), 065002.
- [2] Young H D and Freedman R A 2012 *University Physics with Modern Physics Technology Update* 13th edn (Juarez: Pearson Education) ch 21
- Halliday-Resnick, "Fundamentos da Física ", Vol. 3, cap. 30 e 31, 3a ed.
- Hennies, C.E. et al - "Problemas experimentais em Física" vol. II, 123-129, 153

- Alonso & Finn, "Física" vol 2, cap. 15.
- <https://www.ngdc.noaa.gov/geomag/WMM/DoDWMM.shtml>

Rubricas de Avaliação do Relatório do Projeto 1

Peso	rubrica	Habilidade	Ausente	Inadequada	Precisa melhorar	Adequada
1	C2	Capacidade de planejar um experimento para testar uma hipótese	O experimento planejado não testa a hipótese	O experimento planejado testa a hipótese mas não permite julgamento adequado de sua validade.	Com o experimento planejado, alguns aspectos relevantes podem levar a um julgamento inconclusivo	O experimento planejado testa a hipótese e provavelmente levará a uma conclusão sobre sua validade.
1	G2	Capacidade de avaliar como as incertezas afetam os resultados	Incertezas experimentais não são avaliadas	Há uma avaliação das incertezas, mas na maior parte a avaliação está ausente, vaga ou incorreta.	A avaliação de incertezas não é feita corretamente até o resultado final.	As incertezas são avaliadas adequadamente até o resultado final.
1	G4	Capacidade de registrar e representar os resultados	Dados ou gráficos ausentes ou incompreensíveis.	Alguns dados e gráficos estão ausentes ou difíceis de se compreender.	Todos os gráficos e dados pedidos estão presentes, mas alguns não estão claros.	Todos os dados e gráficos estão presentes e claros.
1	G5	Capacidade de analisar os gráficos	Os gráficos não são analisados	Há uma tentativa de análise dos gráficos, mas tem sérias falhas.	A análise é adequada mas contém alguns erros ou omissões, como a falta de incertezas.	A análise está completa e correta. Coeficientes com incertezas são apresentados.
1	F2	Capacidade de comunicar o tema e descobertas do experimento de forma clara e completa.	Nenhuma discussão sobre o tema e as descobertas do experimento estão presentes	O experimento e as descobertas são discutidos, mas vagamente. Não há reflexão e conclusão sobre a qualidade dos achados.	O experimento e as descobertas são comunicados, mas a reflexão e conclusão final são inadequadas ou incoerentes.	O experimento e as descobertas são discutidos com clareza. Há uma reflexão sobre a qualidade e conclusão final dos achados
1	C8	Capacidade de avaliar a validade da hipótese	Não há julgamento sobre a hipótese	Há uma avaliação da hipótese, mas não consistente com os resultados/análises.	A hipótese é avaliada de forma consistente mas sem levar em conta o contexto do experimento.	A hipótese é avaliada de forma consistente e dentro do contexto do experimento.

A nota poderá ser alterada posteriormente (sempre limitada entre 0 e 10 pontos) segundo os fatores indicados na tabela abaixo

a.	Discussões solicitadas não foram realizadas	Reduzir a nota em até 1,0 ponto.
b.	Uso incorreto de algarismos significativos.	Reduzir a nota em até 1,0 ponto.
c.	Relatório com mais de 5 páginas	Reduzir a nota em até 1,0 ponto.
d.	Vídeo para ilustração do trabalho do grupo. Caso não seja entregue, o grupo poderá ser penalizado na nota do relatório.	Reduzir a nota do relatório em até 30%