

T3

T3A) Intensidade da luz vs
distância e atenuação de filtros

T3B) Estudo da indução magnética

ESTUDO DA RELAÇÃO ENTRE A POTÊNCIA LUMINOSA DE UMA FONTE PONTUAL E A DISTÂNCIA. ESTUDO DA ABSORÇÃO.

1 Objetivos

1. Verificar experimentalmente a proporcionalidade inversa entre a potência luminosa de uma fonte e o quadrado da distância do detector à fonte.
2. Determinar o coeficiente de absorção de filtros.
3. Interpretar gamas de fiabilidade da Lei em estudo vs. aparato experimental.

2 Contextualização e introdução teórica

A luz é uma radiação eletromagnética de comprimento de onda na gama que é detetada pelo olho humano. A natureza da luz é definida pelo seu comprimento de onda. O comprimento de onda está relacionado com a frequência por relação $\lambda = v/f$, onde v é a velocidade da luz e f é a frequência.

O olho humano distingue a cor com base no comprimento de onda da luz e a gama percetível pelo olho humano vai de ~ 380 a ~ 780 nm. Cada comprimento de onda na gama tem características de cor específicas. A mistura de todos os comprimentos de onda na gama visível constitui o que se designa por *luz branca*.

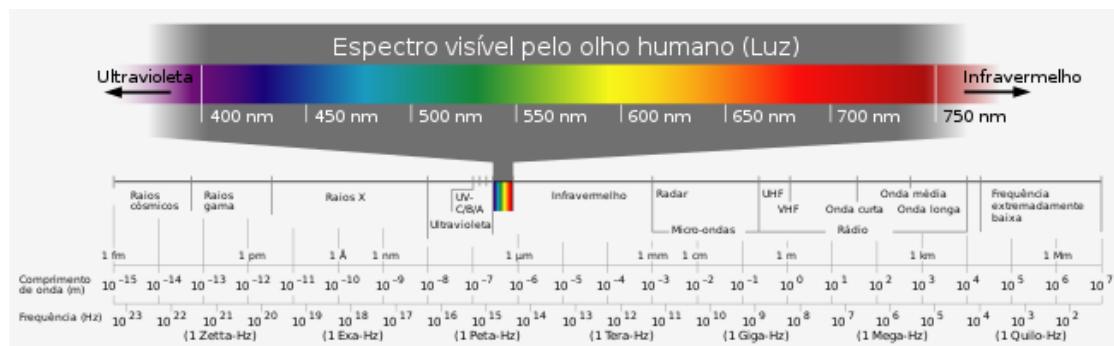


Figura 1 – Espectro eletromagnético

A luz é constituída por fotões que viajam em linha reta num espaço livre e meio uniforme sendo a radiometria o ramo da física que estuda a medição da radiação eletromagnética (energia radiante), incluindo a luz visível.

T 7 - ESTUDO DA RELAÇÃO ENTRE A POTÊNCIA LUMINOSA DE UMA FONTE PONTUAL E A DISTÂNCIA

Uma fonte de luz pontual tem uma dada **energia radiante (Q)**: Energia de onda eletromagnética. A sua unidade de medida é Joule.

Outro parâmetro importante é o **Fluxo radiante (Φ_e)** ou também denominado de **Potência radiante**: Fluxo (emitido, refletido, transmitido ou recebido) de energia radiante por unidade de tempo. Unidade de medição é Watt.

$$\phi_e = \frac{dQ}{dt}$$

Onde, t é o tempo e ϕ_e significa fluxo para a energia.

Intensidade Radiante (I_e) ou intensidade de luz é o fluxo radiante por unidade de ângulo sólido numa dada direcção (Watt/sr):

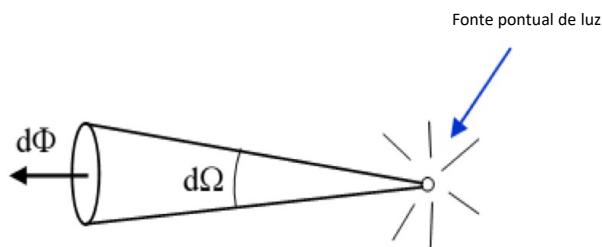


Figura 2 – Fonte Pontual de Luz e o respetivo ângulo sólido $d\Omega$.

Neste caso a Intensidade Luminosa é dada por:

$$I_e = \frac{d\phi_e}{d\Omega}$$

Onde $d\Omega$ é o ângulo Sólido. A unidade de medida é o lúmen por esterradiano, ou Candela (cd).

Para determinar $d\Omega$ de um objetivo a partir do seu centro, é necessário calcular o tamanho da área direcionada a partir do centro do objeto, sobre a esfera que tem como centro o próprio objeto e dividir esse valor pelo quadrado do **raio** dessa esfera (Ver Figura 3).

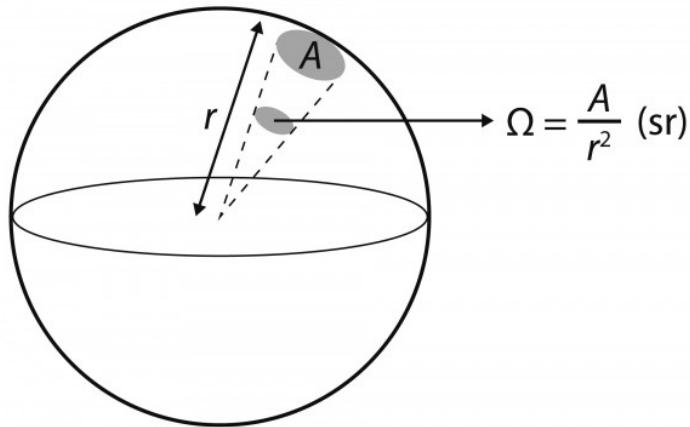


Fig.3- Ângulo Sólido

Considere-se agora que existe um detector sobre a superfície esférica, cuja área sensível é igual a S . A potência medida P pelo detetor é dada por:

$$P = \int_S I_e dS = \frac{I_e A}{R^2} S = \frac{K}{R^2} \quad (3)$$

Esta relação mostra que existe uma proporcionalidade entre a potência medida e o inverso do quadrado da distância do detetor à fonte pontual.

Considere-se agora que entre a fonte pontual e o detetor se coloca um meio absorvente. Tome-se uma fatia de espessura muito pequena dx desse meio, colocada perpendicularmente à direcção de propagação da energia. A potência transmitida, após ter atravessado a espessura dx , P_{trans} está relacionada com a potência incidente na fatia, P_{in} pela relação:

$$P_{trans} = P_{in} - \alpha P_{in} dx \quad (4)$$

sendo $\alpha P_{in} dx$ a potência absorvida e α o coeficiente de absorção do meio. Da equação anterior concluímos que a variação de potência ao atravessar a fatia do meio absorvente é:

$$dP = P_{trans} - P_{in} = \alpha P_{in} dx = \alpha P dx \quad (5)$$

Integrando esta equação diferencial obtemos:

$$P(x) = P_0 e^{-\alpha x} \quad (6)$$

3 Execução do trabalho

3.1 Montagem experimental:

Assegure-se que tem a seguinte montagem:

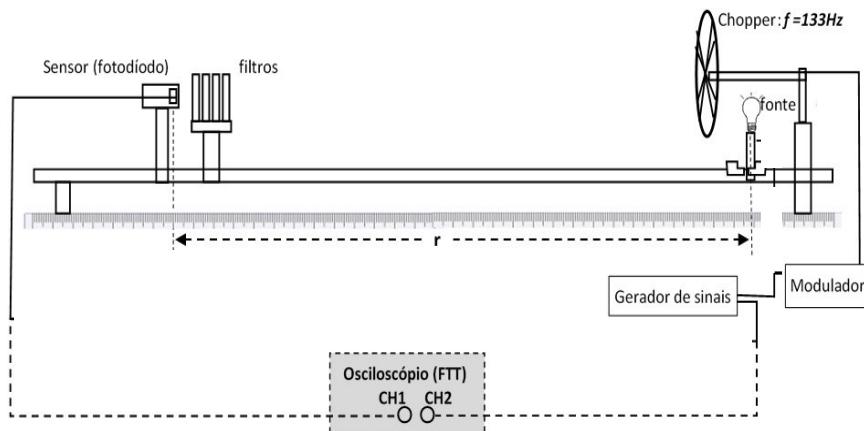


Fig. 4: Esquema experimental no estudo da lei do inverso do quadrado com a distância e cálculo do coeficiente de absorção do material dos filtros

3.2 Procedimento experimental

Assegurar a implementação do esquema representado na figura 4.

3.2.1 – Estudo para considerações experimentais.

- Escolha uma frequência adequada para o modulador (entre 100 e 200Hz).
- Realize um varrimento em distâncias e determine qual as distâncias de gama experimental irá escolher para o procedimento a realizar em 3.2.2.
- Pode observar no osciloscópio o sinal obtido no detetor, 1º em DC e depois em AC, para uma distância $r \sim 20\text{cm}$. Registe e comente as observações.
- Comente o resultado obtido.

3.2.2 Estudo da relação entre a potência luminosa de uma fonte pontual e a distância a esta:

- Variando a distância r até um valor máximo escolhido por si, registe as leituras da tensão V e a diferença de fase entre os sinais medidos em função de r . Que critério deve usar para a separação entre valores consecutivos? Avalie a verificação da *lei do quadrado da distância* dada pela equação:

$$V(d) = K'd^{-2} \quad (1)$$

T 7 - ESTUDO DA RELAÇÃO ENTRE A POTÊNCIA LUMINOSA DE UMA FONTE PONTUAL E A DISTÂNCIA

- Avalie a tendência observada nos dados experimentais ao longo de toda a gama experimental. *Observe o ajuste efetuado e reflita como pode otimizar quer o registo quer na sua análise.*

3.2.3 Cálculo do coeficiente de absorção dum tipo de filtro (acrílico)

- Coloque o suporte de filtros em frente do detetor (figura 3). *Porque não colocá-lo junto à lâmpada?*
- *Que distância r (ou entre que gamas) deve escolher? Porquê?*
- Registe V em função do parâmetro que considerar mais adequado, *justificando a sua escolha: espessura do filtro total, d_{filtro} ou número de filtros, n.*
- No registo de V , *que erros podem estar a ser cometidos e qual a sua origem?*
- Através de um gráfico $[\ln(V)]$ em função do parâmetro escolhido, calcule o coeficiente de absorção do acrílico utilizado.

4 Referências

1. R. D. Guenter, "Modern optics", John Wiley and Sons, 1990.
2. Óptica / Eugene Hecht ; trad. José Manuel N. V. Rebordão, Publicação: Lisboa : Fundação Calouste Gulbenkian, 2002

1 INDUÇÃO MAGNÉTICA

1.1 Objectivos

- Verificar a existência de indução magnética.
- Verificar a relação entre a amplitude do sinal de tensão V_{E_0} induzido na bobina de prova e: (i) os parâmetros associados à bobina de prova, i. e., o número n de espiras, a área S da secção reta e o ângulo θ entre os eixos da bobina de prova e do solenoide; (ii) a intensidade de corrente que alimenta o solenoide i_0 e a frequência desse sinal ω_0 .
- Calcular o valor da permeabilidade magnética do vazio, μ_0 .

1.2 Execução experimental

1.2.1 Montagem experimental

- Assegure a montagem experimental representada pelo esquema da figura 1.

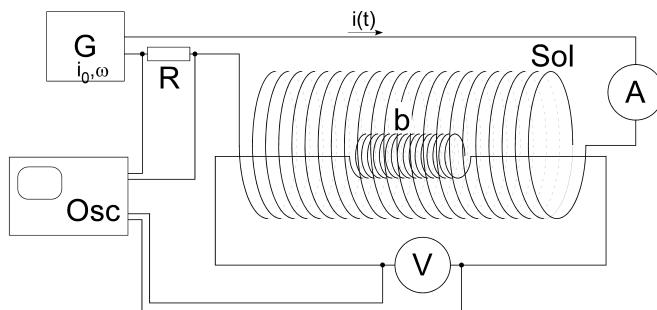


Figura 1: Esquema da montagem.

- O material utilizado na montagem é: um miliamperímetro, um voltímetro, um osciloscópio Tektronix TDS 1002C-EDU, um solenoide, várias bobinas de prova (pequenos solenoides), um gerador de sinal sinusoidal de frequência variável e um amplificador de sinal.
 - É necessário incluir um amplificador de baixa impedância de saída no circuito, pois o gerador, devido à sua impedância de saída de 50Ω , não disponibiliza corrente suficiente para criar no interior do solenoide, o campo magnético necessário para induzir um sinal mensurável com os multímetros disponíveis. A ligação do gerador ao amplificador está ilustrada na figura 2.
- **Nota importante:** Como a parte exterior dos terminais BNC do osciloscópio e gerador têm que estar ligados à “terra” do edifício, é necessário ligar o terminal “-” (preto) do amplificador ao lado do solenoide que tem a resistência em série (ver detalhe na imagem seguinte), e o “+” (vermelho) à outra extremidade (onde estão as indicações de resistência, indutância e espiras por metro) com o amperímetro em série.
- Observar num canal um sinal de tensão na resistência R proporcional à corrente no solenoide (i), e no outro canal a tensão induzida V_E na bobina de prova.

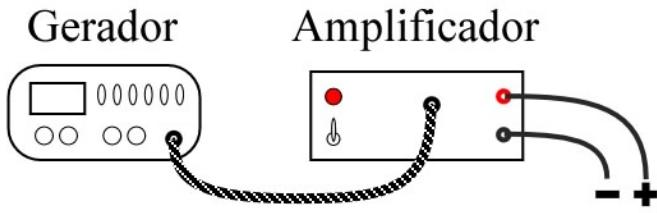


Figura 2: Ligação do gerador ao amplificador.

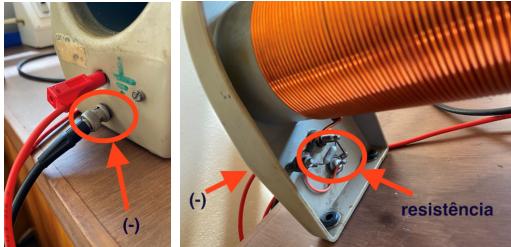


Figura 3: Detalhe da montagem da resistência em série no solenoide.

- Verifique que a diferença de fase entre os dois sinais se mantém $\pi / 2$, sendo independente da variação de qualquer dos parâmetros em estudo. *Sabe identificar a razão desse facto?*
- Considere os dados
 - O solenoide tem $L = 75.0$ cm e $N = 364$.
 - As bobinas disponíveis, devidamente numeradas, têm as características indicadas na tabela 1.
- **Nota:** Para funções sinusoidais, os multímetros apenas mostram os valores eficazes $i_0/\sqrt{2}$ e $V_{E0}/\sqrt{2}$ e não as amplitudes sinusoidais do sinal. Por outro lado, o osciloscópio fornece toda a informação sobre a função sinusoidal, incluindo os valores RMS, se devidamente escolhida a opção correspondente. Note ainda que $\omega = 2\pi f$ (rad s⁻¹), sendo f a frequência linear (Hz).

Bobina	Diâmetro (mm)	n (número de espiras)
1	41,00	300
2	33,00	300
3	26,00	300
4	41,00	200
5	41,00	100
6	26,00	100
7	41,00	442
8	41,00	542

Tabela 1: Características das bobinas disponíveis. A bobina 6 é a que permite variar θ .

1.2.2 Medições

- Tal como indicado nos objetivos, o estudo a efetuar neste trabalho é basicamente verificar a relação dada pela equação 1.

$$V_{E_0} = \mu_0 \frac{NnS \cos \theta \omega i_0}{L} \quad (1)$$

em que:

- V_{E_0} : amplitude do sinal de tensão $V_E = V_{E_0} \cos(\omega t)$ induzido na bobina de prova (V, volt);
- i_0 : amplitude do sinal de corrente $i = i_0 \sin(\omega t)$ que percorre o solenoide (A, ampère);
- μ_0 : permeabilidade magnética do vazio ($4\pi \times 10^{-7}$ Hm $^{-1}$);
- N : número de espiras do solenoide;
- n : número de espiras da bobina de prova;
- S : área da secção recta da bobina de prova ($S = \pi D^2/4$) com diâmetro D ;
- θ : ângulo entre os eixos do solenoide e da bobina de prova;
- ω : frequência angular do sinal do gerador (rad s $^{-1}$);
- L : comprimento do solenoide.

- Não esquecer que

- no voltímetro e amperímetro está a medir as amplitudes RMS (root-mean-square) de um sinal sinusoidal, ou seja:

$$V_{RMS} = \frac{V_{E_0}}{\sqrt{2}}; i_{RMS} = \frac{i_0}{\sqrt{2}} \quad (2)$$

- para poder testar a expressão anterior, é suposto que a *bobina de prova seja considerada de comprimento pequeno relativamente ao do solenoide*, de modo a que o campo magnético que a atravessa possa ser considerado aproximadamente constante. Além disso, a bobina de prova deverá ser introduzida no interior do solenoide, centrada e com o eixo alinhado com o do solenoide.
- Para estudar a dependência de V_{E_0} de cada um dos parâmetros, deverá, naturalmente, variar um deles de cada vez, mantendo os restantes constantes. Sistematicamente, estude, em ordem de prioridade:
 1. V_{E_0} em função de ω (bobina 1). *Este é um estudo obrigatório.*
 2. V_{E_0} em função de i_0 (bobina 1). *Este é um estudo obrigatório.*
 3. V_{E_0} em função de n (bobinas 1, 4, 5, 7, 8). *A realizar se tiver tempo.*
 4. V_{E_0} em função de S (bobinas 1, 2, 3). *A realizar se tiver tempo.*
 5. V_{E_0} em função de $\cos \theta$ (bobina 6). *A realizar se tiver tempo.*
- As diferentes experiências são realizadas atuando no gerador que alimenta o solenoide (i_0 , ω) e/ou escolhendo as bobinas de prova (n , S) com as características apropriadas.

- Verifique as dependências lineares esperadas, recorrendo a uma análise gráfica adequada (gama experimental bem escolhida, distribuição homogénea dos registos ao longo da gama, utilização do método dos mínimos quadrados num ajuste linear, etc.)
- Com base nos resultados das várias análises gráficas, determine μ_0 para cada caso, assim como a respetiva incerteza em valor absoluto e relativo. Compare o resultado com o valor de referência $\mu_{0\text{ref}} = 4\pi \times 10^{-7} \text{ Hm}^{-1}$.
 - Todos os estudos em que faz a variação de um dos parâmetros referidos, passam por um ajuste e cada um deve dar uma estimativa para o valor de μ_0 .
 - Então deve coligir estes resultados numa tabela final que inclua $u(\mu_0)$, $\%u(\mu_0)$, erro de μ e indicação de maior ou menor confiança.

1.3 Introdução Teórica

1.3.1 Lei de Faraday

A indução magnética é um fenômeno natural ligado à eletricidade e ao magnetismo, frequentemente encontrado no dia-a-dia de um laboratório de Física (e não só!). Foi descoberta por volta de 1830, quase simultaneamente, por Michael Faraday em Inglaterra e Joseph Henry nos Estados Unidos. A indução magnética está na base do gerador eléctrico, do transformador e de muitos outros aparelhos de uso diário.

Suponhamos que um condutor eléctrico, o qual forma um circuito fechado, é colocado numa região na qual existe um campo magnético. Se o fluxo magnético ϕ_B que atravessa esse circuito variar com o tempo, observa-se uma corrente no circuito enquanto o fluxo varia. A presença de uma corrente eléctrica indica a existência de um campo eléctrico induzido, \mathbf{E} , atuando no circuito, ou, equivalentemente, de uma força electromotriz v_E ao longo dele. A medição desta força electromotriz indica que ela depende da taxa de variação do fluxo magnético, isto é, de $d\phi_B/dt$, como expresso na equação 3:

$$v_E = -\frac{d\phi_B}{dt} \quad (3)$$

relação que expressa a **lei de Faraday** da indução magnética:

Num circuito fechado, localizado numa região onde existe um campo magnético, surge uma força electromotriz a qual é oposta à variação temporal do fluxo magnético através de uma superfície apoiada no circuito.

Note-se que a geração da força electromotriz decorre da variação temporal do fluxo magnético. Tal variação de fluxo pode ocorrer quer devido a variação temporal do campo magnético, quer a variação da posição do circuito relativamente às linhas de força do campo magnético, quer a ambos os tipos de variação temporal em simultâneo.

O sinal “-” na relação anterior tem um significado físico importante, e que é traduzido pela chamada lei de Lenz. Esta lei fixa o sentido da corrente induzida num circuito por uma variação do fluxo magnético que o atravessa, e pode enunciarse da seguinte maneira:

A corrente induzida tem um sentido tal que provoca ela própria um fluxo magnético que contraria a variação do fluxo indutor. O campo magnético associado à corrente induzida tende a restaurar o valor inicial do campo magnético indutor se este variar: se ele cresce, o campo magnético induzido tende a diminui-lo; se ele decresce, o campo magnético induzido tende a aumentá-lo.

Um exemplo gráfico da lei de Lenz é o do comportamento de uma espira fechada de fio supercondutor. Na figura 4(a), a barra magnetizada move-se para a direita com velocidade v , aumentando o fluxo magnético através da espira metálica.

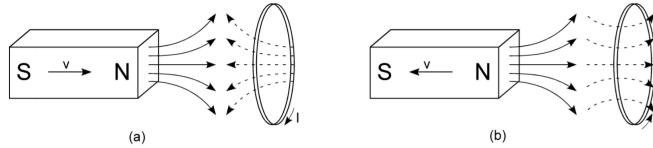


Figura 4: Exemplo ilustrativo da lei de Lenz.

A corrente induzida I produz um campo magnético \mathbf{B} cujas linhas de força estão indicadas a tracejado, o qual contraria o aumento de fluxo devido ao movimento da barra magnetizada. Na figura 4(b), a barra magnetizada, inicialmente em repouso, é deslocada para a esquerda, o que diminui o fluxo magnético através da espira. Haverá uma corrente induzida I que produzirá um campo magnético \mathbf{B} , cujas linhas de força estão indicadas a tracejado, e que contraria essa variação; isto é, as linhas de força a tracejado tendem a manter a quantidade inicial de fluxo através da espira. Em (a), a força resultante sobre a espira é dirigida para a direita, e em (b) para a esquerda.

Resumindo, independentemente da variação de qualquer campo magnético externo, o fluxo resultante através da espira supercondutora permanece constante (se o fluxo resultante variasse, haveria uma diferença de potencial diferente de zero, isto é, uma corrente infinita devida à ausência de resistência do material supercondutor, o que é obviamente impossível). Uma consequência interessante de tudo isto é que um anel supercondutor, quando colocado sobre o polo de um íman, ficará suspenso. Reciprocamente, uma barra magnetizada fica suspensa quando largada sobre um aro supercondutor (existem planos para construir comboios de alta velocidade utilizando-se bobinas supercondutoras, por forma a os comboios flutuarem sobre leitos ou “trilhos” especiais).

É importante referir que não é necessário que o condutor seja supercondutor. Devido à lei de Lenz, qualquer condutor que for impelido para o interior de um campo magnético sofrerá a ação de uma força oposta. As correntes induzidas nessas situações são denominadas correntes de Foucault.

No caso desta experiência, temos duas bobinas, uma de dimensões relativamente reduzidas (bobina de prova) e uma outra de muito maior comprimento (solenoide) dentro da qual a primeira se pode mover, como ilustrado na figura 5. Quando uma corrente eléctrica passa nas espiras do solenoide, o campo magnético gerado no seu interior tem uma distribuição espacial razoavelmente uniforme (linhas de força uniformemente espaçadas e paralelas ao eixo do solenoide). Na situação em que a corrente geradora do campo no solenoide varia, o fluxo que atravessa a bobina de prova nele introduzida também varia, sendo assim induzida uma tensão eléctrica nesta bobina. Da medição desta tensão em função de certos parâmetros decorre a verificação experimental da lei da indução magnética, que é o objectivo primário deste trabalho.

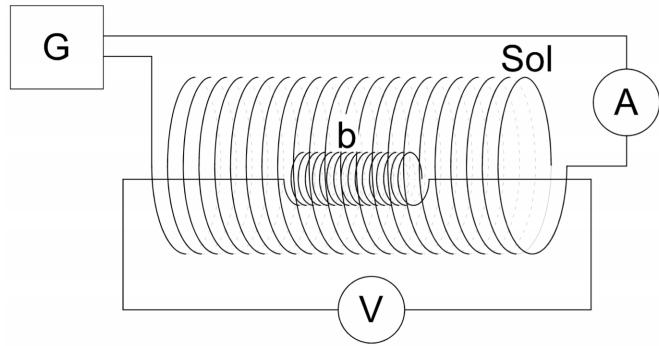


Figura 5: Bobina de menores dimensões (b), inserida no interior e no centro da bobina do solenoide (Sol), acoplado a um gerador de sinal G.

1.3.2 Campo magnético de um solenoide - Lei de Biot-Savart

A intensidade do campo magnético no eixo de um solenoide pode ser calculada a partir do valor do campo criado por uma única espira, como mostra a figura 6.

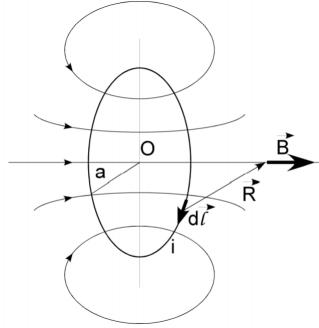


Figura 6: Campo magnético gerado por uma única espira.

Para determinar o valor do campo $\vec{B}(P)$ no eixo zz, recorre-se à **lei de Biot e Savart**. O elemento de corrente $id\vec{\ell}$ cria um campo $d\vec{B}$ dado por

$$d\vec{B} = \frac{\mu_0 i}{4\pi} \frac{d\vec{\ell} \times \hat{R}}{R^2} \quad (4)$$

Integrando sobre a espira de raio a , vem

$$\vec{B} = \left(\frac{\mu_0 i a^2}{2(a^2 + z^2)^{3/2}} \right) \hat{z} \quad (5)$$

Considerando o solenoide como formado por "espiras" elementares ocupando a extensão $[-L/2, +L/2]$, como mostrado na figura 7 pode calcular-se o campo $\vec{B}(P)$ num qualquer ponto do eixo, por sobreposição. Resultaria:

$$\vec{B} = \frac{\mu_0 N i}{2L} (\cos \beta_2 - \cos \beta_1) \hat{z} \quad (6)$$

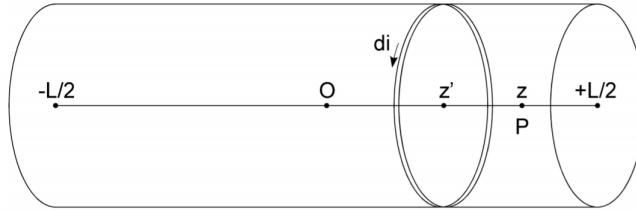


Figura 7: Considera-se que o solenoide é formado por espiras elementares ao longo da extensão $[-L/2, +L/2]$.

Para um solenoide longo, no eixo zz:

$$\vec{B} = \frac{\mu_0 N i}{L} \hat{z} \quad (7)$$

sendo N o número de espiras do solenoide, L o seu comprimento, i a corrente que passa nas suas espiras e μ_0 a permeabilidade magnética do vazio.

1.3.3 Lei de Ampère

Bem no interior de um solenoide longo, o campo \vec{B} é uniforme, sendo nulo no exterior. Tal resulta da aplicação da **lei de Ampère** (equação 8):

$$\oint_C \vec{B} \bullet d\vec{s} = \mu_0 i_{interior} \quad (8)$$

em que C é um percurso fechado, e $i_{interior}$ é a corrente total que flui através da área limitada por C . Considerando percursos C rectangulares no interior do solenoide (C_1) e na sua superfície (C_2) com lados infinitesimais normais ao eixo zz, conforme mostra a figura 8:

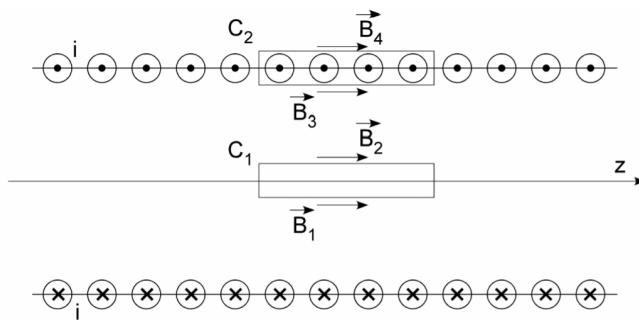


Figura 8: Percursos no interior do solenoide (C_1), e na sua superfície (C_2).

Para C_1 , $i_{interior} = 0$, donde $\vec{B}_1 = \vec{B}_2 = \frac{\mu_0 N i}{L} \hat{z}$.

Para C_2 , $i_{interior} = \frac{N i}{L}$ donde $\vec{B}_3 = \vec{B}_4 = 0$ (pois $\vec{B}_3 = \vec{B}_1 = \vec{B}_2$).

Assim, o campo \vec{B} é praticamente uniforme no interior do solenoide e tem a direção do seu eixo, valendo $\vec{B} = \frac{\mu_0 N i}{L} \hat{z}$, sendo nulo no exterior.

1.3.4 Força electromotriz induzida

Pela lei da indução magnética, a força electromotriz gerada numa bobina de prova submetida a este campo magnético do solenoide ideal é dada por

$$v_E = - \frac{d\phi_B}{dt} \quad (9)$$

onde o fluxo ϕ_B de \vec{B} através de cada uma das n espiras, de área S , da bobina de prova, é dado por:

$$\phi_B = \int_S \vec{B} \bullet d\vec{S} = BS \cos \theta = \mu_0 \frac{NS \cos \theta i}{L} \quad (10)$$

em que θ é o ângulo $(\vec{B}, d\vec{S})$.

Considerando as n espiras da bobina de prova, o fluxo total através da bobina de prova vale:

$$\phi_{total} = n\phi_B = \mu_0 \frac{nNS \cos \theta i}{L} \quad (11)$$

Substituindo em (9), tem-se (sendo todos os parâmetros constantes no tempo, excepto i):

$$v_E = -\mu_0 \frac{nNS \cos \theta}{L} \frac{di}{dt} \quad (12)$$

Se a corrente i que cria o campo do solenoide variar de forma sinusoidal

$$i = i_0 \sin \omega t \quad (13)$$

tem-se então uma força electromotriz cossinusoidal gerada na bobina de prova:

$$v_E = -\mu_0 \frac{nNS \cos \theta \omega i_0}{L} \cos \omega t \quad (14)$$

Isto é, a amplitude da tensão gerada nos terminais da bobina de prova é

$$v_{E_0} = -\mu_0 \frac{nNS \cos \theta \omega i_0}{L} \quad (15)$$

Quanto à fase da tensão gerada nos terminais da bobina de prova relativamente à fase da corrente no solenoide, basta atender às respectivas dependências temporais.

É esta relação que se pretende verificar no decurso desta experiência. Para tal usam-se diversas bobinas de prova (variando n, S), e diversas amplitudes e frequências de corrente no solenoide (i_0, ω). O ângulo θ pode também ser variado, usando uma bobina de prova rotatória.

1.4 Referências

1. M. Alonso, E.J. Finn, “Fundamental University Physics”, vol 2, Addison-Wesley 1967.