

Indução eletromagnética em laboratório

(*Electromagnetic induction in laboratory*)

Daniel Tiago Ribeiro¹, Abílio Monteiro Almeida e Paulo Simeão Carvalho

Departamento de Física e Astronomia, Faculdade de Ciências, Universidade do Porto, Porto, Portugal

Instituto de Física dos Materiais da Universidade do Porto, Porto, Portugal

Recebido em 20/11/2011; Aceito em 14/5/2012; Publicado em 14/12/2012

Estudou-se a indução de uma força eletromotriz provocada pelo campo magnético de um solenoide em várias bobinas de prova colocadas no interior deste. Utilizou-se uma montagem experimental - disponibilizada pela infraestrutura laboratorial para o ensino do Departamento de Física da FCUP - para determinar a dependência da força eletromotriz induzida com os mais variados fatores experimentais, a saber: número de espiras da bobina de prova, área da secção transversal da bobina de prova, ângulo do eixo da bobina de prova em relação ao eixo do solenoide, frequência angular do sinal gerador e amplitude do sinal de corrente. Determinou-se, usando este mesmo método, o valor da permeabilidade magnética do vazio e comparou-se com o valor tabelado. Este trabalho teve como objetivo desenvolver uma nova abordagem pedagógica das leis da indução eletromagnética. Efetuou-se igualmente uma reflexão sobre como abordar esta experiência no ensino secundário e quais as melhores técnicas para realizar, explorar e avaliar a atividade.

Palavras-chave: força eletromotriz, solenoide, indução eletromagnética, bobina.

We studied the induction of an electromotive force caused by the magnetic field of a solenoid at various coils placed inside it. We used an experimental setup - provided by the learning laboratory infrastructure of the Physics Department at FCUP - to determine the dependence of the induced electromotive force with very different experimental variables, namely: number of coil turns, coil cross-sectional area, coil axis angle, angular frequency of the signal, and signal amplitude of current. The value of the vacuum permeability was determined, using this same method, and compared with the known value. This study aimed to develop a new pedagogical approach of the laws of electromagnetic induction. It also made a reflection on how to approach this experience in secondary education and what are the best techniques to perform, explore and evaluate the activity.

Keywords: electromotive force, solenoid, electromagnetic induction, coil.

1. Introdução

A física é uma ciência experimental e, por isso, é necessário que os alunos que estudam física sejam incentivados a desenvolver atividades experimentais que lhes possibilitem contactar melhor com o mundo da física. A atividade experimental permite ao aluno associar a razão à observação e pode funcionar tanto como motivação do que se vai estudar, como verificação do que foi estudado.

A parte experimental em que este trabalho assenta poderá parecer complexa para uma abordagem no ensino secundário, porém, é importante notar que alguns dos pormenores da atividade poderão ser fornecidos como dados do problema e não propriamente como uma necessidade conceptual para a aprendizagem do fenómeno em causa. Contudo, um dos principais objetivos na realização desta atividade é a de estudar experi-

mentalmente as leis da indução eletromagnética. Além disso, com este trabalho, os alunos poderão melhorar o seu domínio de programas informáticos, nomeadamente folhas de cálculo. Uma outra vantagem da realização deste trabalho é o contacto com equipamento e material de laboratório menos utilizados pelos professores de física do ensino secundário.

Existem diversas formas de estudar o fenómeno da indução eletromagnética. Este fenómeno pode ser observado de um ponto de vista qualitativo ou quantitativo. A maior parte dos trabalhos experimentais para estudar a indução eletromagnética são do tipo qualitativo (satisfazem o conhecimento dos alunos detetando apenas uma corrente induzida por uma variação temporal do fluxo de campo magnético). Contudo, este trabalho pretende abordar a indução eletromagnética de uma forma quantitativa.

Este trabalho será desenvolvido sempre com uma

¹E-mail: danieltiago.ribeiro@gmail.com.

vertente fortemente pedagógica. Cada vez mais torna-se necessário para o professor estabelecer estratégias que procurem tornar o ensino da física mais completo e, complementarmente, mais atrativo. Daí a necessidade das atividades laboratoriais no contexto do ensino da física. Algumas das principais estratégias que podem ser utilizadas na exploração de trabalhos experimentais são (1) elaboração de tabelas de registo de dados, (2) controlo de variáveis, (3) elaboração de gráficos e (4) interpretação de gráficos.

Diversas são as atividades experimentais disponíveis para que um professor possa explorar com os seus alunos este fenómeno [1,2]. A atividade escolhida neste trabalho possibilita ao professor realizar um conjunto de medidas que permite avaliar o efeito de diversos parâmetros na corrente eletromagnética induzida em bobinas de prova, que estão colocadas no interior de um solenóide gerador do campo magnético.

Neste sentido a atividade a ser desenvolvida proporciona aos alunos um contacto direto com a montagem experimental. A montagem utilizada é robusta e de fácil transporte. Um dos aparelhos de medida é o osciloscópio. Embora o uso do osciloscópio exija um certo esforço, poderá verificar-se neste trabalho que é um equipamento indispensável para a determinação das grandezas físicas envolvidas nesta atividade experimental.

O trabalho procura estabelecer com os alunos pontes que os ligam ao ensino avançado da física sem que os limites cognitivos sejam suplantados. A aplicação deste método na sala de aula poderá contribuir para o desenvolvimento crítico dos alunos e o interesse pelo método experimental, base do conhecimento científico.

2. Base teórica

A indução magnética foi um fenómeno descoberto por Michael Faraday e Joseph Henry, que postularam que a força eletromotriz de um qualquer circuito fechado traduz-se na taxa de variação temporal do fluxo de campo magnético pelo circuito. Sendo V_0 a tensão da corrente induzida pelo fluxo do campo magnético ϕ_B , esta lei pode ser traduzida matematicamente por

$$V_0 = -\frac{d\phi_B}{dt}. \quad (1)$$

Assim, pode dizer-se também que num circuito fechado, localizado numa região onde exista um campo magnético, existirá uma força eletromotriz produzida pela variação temporal do fluxo de campo magnético com direção oposta. Essa oposição de direção é dada pelo sinal menos da expressão que é enunciado da lei de Lenz.

Para estudar o efeito da indução magnética é necessário um circuito fechado e um campo magnético. Uma boa aproximação desta situação será a utilização

de duas bobinas de tamanhos substancialmente diferentes. Na bobina maior (solenóide) é gerado um campo magnético por uma corrente elétrica que passa nas espiras deste. A bobina de prova mais pequena pode ser colocada no interior do solenóide e assim fica sob o efeito de um campo magnético.

Existem várias possibilidades para produzir uma variação temporal do fluxo magnético na bobina de prova. No exemplo em que a corrente geradora do campo no solenóide varia no tempo, o fluxo que atravessa a bobina dentro do solenóide também varia, sendo assim induzida uma força eletromotriz na bobina de prova. Da medição desta força eletromotriz em função de certos parâmetros decorre a verificação experimental da lei da indução magnética de Faraday.

A grandeza do campo magnético criado pela passagem de corrente elétrica nas espiras de um solenóide pode ser dada, com as aproximações devidas ao facto do solenóide ser longo, pela Eq. (2), sendo N o número de espiras do solenóide, L o seu comprimento, i a corrente que passa nas espiras e μ_0 a permeabilidade magnética do vazio [3,4]

$$B = \frac{\mu_0 N i}{L}. \quad (2)$$

2.1. Força eletromotriz induzida

Pela lei da indução magnética, a força eletromotriz gerada numa bobina de prova submetida a este campo magnético do solenóide ideal é dada pela Eq. (1). O fluxo ϕ_B de \vec{B} através de cada uma das n espiras, de área S , da bobina de prova, é dado pela Eq. (3), em que θ é o ângulo formado entre o vetor \vec{B} e o vetor $d\vec{S}$

$$\phi_B = \int_S \vec{B} \cdot d\vec{S} = B S \cos(\theta) = \frac{\mu_0 N i}{L} S \cos(\theta). \quad (3)$$

Com as devidas considerações, a amplitude máxima da tensão gerada nos terminais da bobina de prova será dada por

$$v_0 = -\frac{n\mu_0 N S \cos(\theta) \omega i_0}{L}. \quad (4)$$

Se excluirmos o sinal negativo, a expressão que nos propomos verificar do decurso desta experiência é a Eq. (5), em que V_0 é a amplitude do sinal de tensão induzido na bobina de prova (V, Volt), i_0 a amplitude do sinal de corrente que percorre o solenóide (A, Ampère), μ_0 a permeabilidade magnética do vazio ($4\pi \times 10^{-7} \text{ Hm}^{-1}$), N o número de espiras do solenóide, n o numero de espiras da bobina de prova, S a área da secção reta da bobina de prova, θ o ângulo entre os eixos do solenóide e da bobina de prova, ω a frequência angular do sinal do gerador (rad.s^{-1}) e L o comprimento do solenóide

$$V_0 = \frac{n\mu_0 N S \cos(\theta) \omega i_0}{L}. \quad (5)$$

3. Parte experimental

Para desenvolver o estudo em questão optou-se por realizar uma montagem experimental à semelhança do esquema da Fig. 1. Assim, foi necessário utilizar o seguinte material e equipamento:

- Osciloscópio de 2 canais;
- Voltímetro;
- Amperímetro;
- Gerador de sinal AC;
- Amplificador de corrente;
- Solenóide;
- Bobinas de corrente;
- Fios de ligação.

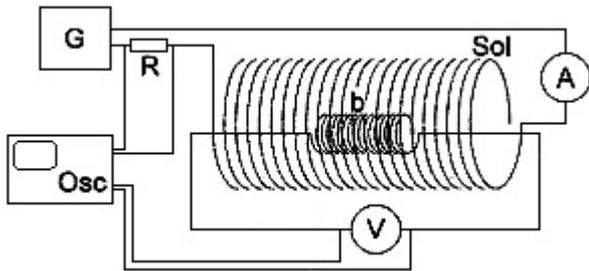


Figura 1 - Esquema do circuito elétrico da montagem experimental.

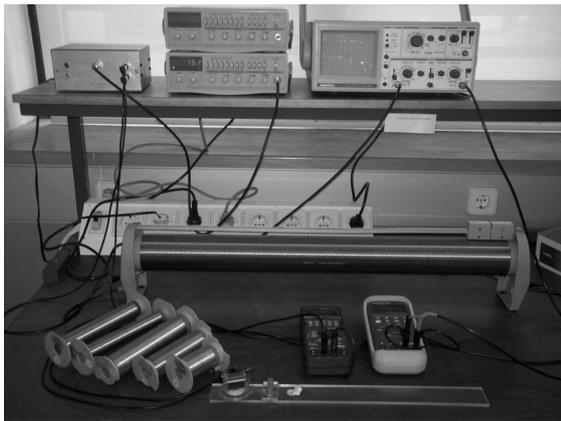


Figura 2 - Fotografia da montagem experimental.

Depois do esquema de montagem produzido (Fig. 2) realizou-se o procedimento experimental abaixo explicado:

- No sentido de estudar a dependência de V_0 com os vários parâmetros efetuaram-se múltiplos estudos fazendo variar, em cada um deles, apenas uma grandeza física deixando, naturalmente, todas as outras constantes.
- Sistematizaram-se cinco estudos diferentes:
 - $V_0 = f(n)$;
 - $V_0 = f(S)$;
 - $V_0 = f(\omega)$;
 - $V_0 = f(i)$;
 - $V_0 = f(\cos(\theta))$.

- Realizaram-se as representações gráficas para cada uma das dependências e verificou-se a potencial existência da relação linear esperada.
- Para cada uma das dependências utilizaram-se os resultados experimentais para determinar, com ajuste linear, a quantidade μ_0 e comparou-se com o valor tabelado, $4\pi \times 10^{-7} \text{ Hm}^{-1}$.

4. Resultados e discussão

Ao longo do trabalho dispôs-se de 10 bobinas diferentes com as seguintes características:

- Bobina 1 - 300 espiras; 40,40 mm de diâmetro;
- Bobina 2 - 300 espiras; 32,20 mm de diâmetro;
- Bobina 3 - 300 espiras; 25,15 mm de diâmetro;
- Bobina 4 - 200 espiras; 40,40 mm de diâmetro;
- Bobina 5 - 100 espiras; 40,40 mm de diâmetro;
- Bobina 6 - 100 espiras; 25,10 mm de diâmetro;
- Bobina 7 - 400 espiras; 40,40 mm de diâmetro;
- Bobina 8 - 500 espiras; 40,40 mm de diâmetro;
- Bobina 9 - 300 espiras; 45,00 mm de diâmetro;
- Bobina 10 - 300 espiras; 50,00 mm de diâmetro.

Estas bobinas foram elaboradas propositadamente no sentido de se poder realizar um estudo sistemático com um mínimo de cinco pontos para cada dependência. Dado que existiu a possibilidade de estudar-se um mínimo de cinco pontos para cada dependência, a aproximação gráfica pelo método dos mínimos quadrados pode ser considerada válida.

No início da experiência verificou-se a gama de valores para os quais a montagem experimental revelava um comportamento linear. Para determinar os valores limite de utilização observou-se, no osciloscópio, a figura de Lissajous relativa aos dois sinais (do solenóide e da bobina de prova). Como o desfasamento entre os dois sinais sinusoidais é de $\frac{\pi}{2}$, a figura de Lissajous é uma circunferência (ou uma elipse de eixos horizontal e vertical, no caso das amplitudes não serem iguais). Uma forma de verificar quando o sistema perde as suas características lineares é por observar o aparecimento de distorções na figura de Lissajous acima referida. Se a figura mantiver a forma circular ou elíptica referida anteriormente, então o sistema comporta-se linearmente. (Fig. 3). Contudo, a partir do momento em que a figura começa a deformar-se, a montagem já não se encontra no regime linear (Fig. 4). Utilizando esta técnica, verificou-se que se devem utilizar correntes inferiores a 500 mA e frequências inferiores a 2 kHz.

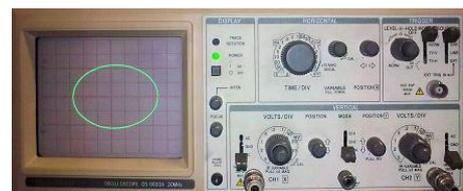


Figura 3 - Figura de Lissajous no regime linear.



Figura 4 - Figura de Lissajous no regime não linear.

Por outro lado, um dos instrumentos de medida utilizado, o multímetro, regista valores eficazes nas suas medições de intensidade de corrente e de diferença de potencial. No caso da atividade experimental desenvolvida, foi sempre utilizado um sinal sinusoidal e, por isso, as funções $i(t)$ e $V(t)$ foram sempre do tipo $i = i_0 \cos(\omega t)$ e $V = V_0 \cos(\omega t)$, respetivamente. Calculando a função do valor quadrático médio para cada uma das funções sinusoidais originais obtém-se

$$i_{ef} = \frac{i_0}{\sqrt{2}}, \quad (6)$$

$$V_{ef} = \frac{V_{E0}}{\sqrt{2}}. \quad (7)$$

Os valores i_{ef} e V_{ef} são exatamente os valores que os instrumentos de medida (amperímetros e voltímetros, por exemplo) registam. Conforme verificável, ao longo das considerações teóricas, os valores que são utilizados correspondem às quantidades reais, i_0 e V_0 , e não aos valores eficazes, i_{ef} e V_{ef} . Por isso, tomou-se o cuidado de converter os valores lidos de intensidade de corrente e tensão eficazes nos seus valores reais - isto para as leituras realizadas nos multímetros. Contudo, um osciloscópio regista medições reais de intensidade de corrente e diferença de potencial, sendo, por isso, apenas necessário converter os valores de corrente e tensão registados nos multímetros. É necessário evidenciar aqui também que as leituras efetuadas nos multímetros dependem das escalas em que estão a ser medidas, podendo este tipo de leituras ser uma potencial fonte de erro.

É digno de nota que um dos parâmetros a ser estudado é a dependência $V_0 = f(\omega)$. Devido ao facto das frequências de *input* serem do tipo linear, foi necessário, igualmente, efetuar registos de frequências convertidas em frequências angulares, notando sempre que o fator

de conversão entre frequências lineares e frequências angulares é $\omega = 2\pi f$.

Realizar-se-á, de seguida, uma consideração pormenorizada a cada dependência de uma forma individual.

4.1. Dependência $V_0 = f(n)$

Inicialmente anotaram-se os valores das variáveis que se iriam manter constantes ao longo do estudo desta dependência. Essas quantidades foram registadas nas duas primeiras colunas da Tabela 1. Nestas colunas poder-se-á verificar que foram utilizados valores de intensidade de corrente elétrica abaixo de 500 mA e frequência linear não superiores a 2000 Hz, como previamente delineado.

Depois disso, utilizando as bobinas de diâmetro igual e número de espiras diferente, foram registados sucessivos valores de diferença de potencial real que, por terem sido registados no osciloscópio, não tiveram necessidade de ser convertidos. Por outro lado, a medição da intensidade de corrente do circuito foi medida num multímetro; daí a necessidade de converter os valores de i_{ef} para i_0 . Esse registo pode ser consultado na segunda parte da Tabela 1.

Depois do registo cuidadoso dos resultados experimentais da dependência da tensão real com o número de espiras das bobinas de prova, elaborou-se um gráfico que relaciona as duas variáveis (Fig. 5). Na Eq. (5), aquela a que este trabalho se propõe comprovar, a diferença de potencial varia linearmente com o número de espiras das bobinas de prova. Este facto ficou comprovado com a elaboração do gráfico e respetivo cálculo da equação da reta de ajuste aos pontos experimentais pelo método dos mínimos quadrados. Note-se que o quadrado do coeficiente de correlação de Pearson, r , que corresponde ao coeficiente de determinação, r^2 , é muito próximo de 1, o que traduz um comportamento muito próximo do linear. Além disso, o cálculo do declive da reta, m , apresenta um valor de incerteza, Δm , inferior a 2%, o que revela que o método é muito preciso. Um olhar atento à Eq. (5) mostrará que se espera que, para qualquer dependência, o valor da ordenada na origem deverá ser 0; e é de notar que o valor calculado para esta dependência é de $0,001 \pm 0,004$, abarcando assim na incerteza, a ordenada na origem igual a 0.

Tabela 1 - Registos experimentais da dependência $V_0 = f(n)$ (valores de diferença de potencial registados no osciloscópio).

i_{ef} / A	0,1006	Bobina	$n / \text{espiras}$	V_0 / V
i_0 / A	0,1423	1	300	0,19
f / Hz	918	4	200	0,13
$\omega / \text{rad Hz}$	5768	5	100	0,065
$\mu_0 / \text{H m}^{-1}$	$4\pi \times 10^{-7}$	7	400	0,260
$N / \text{espiras}$	485	8	500	0,320
L / m	0,7500			
D / m	0,04040			
$\theta / ^\circ$	0			

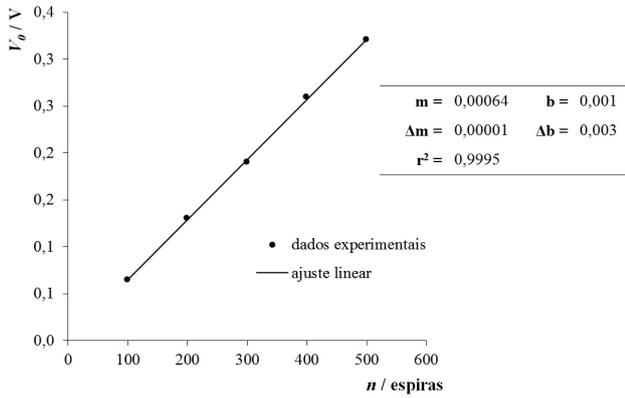


Figura 5 - Gráfico que traduz a dependência $V_0 = f(n)$ e parâmetros matemáticos da reta de ajuste (valores de diferença de potencial registados no osciloscópio).

É necessário, por outro lado, referir que os valores acima registados para o estudo desta dependência foram medidos no osciloscópio. Contudo, foi realizado exatamente o mesmo estudo utilizando os multímetros disponíveis para efetuar a medição da intensidade de corrente e das diferenças de potencial nos terminais da bobina de prova. No final da discussão de cada uma das dependências, realizar-se-á uma comparação quanto ao método de registo de dados e avaliar-se-á qual o método com uma maior percentagem de exatidão para a realização desta atividade experimental.

Interessa agora mencionar que os valores registados utilizando os multímetros disponíveis para efetuar a medição da intensidade de corrente e das diferenças de potencial nos terminais da bobina de prova podem ser consultados na Tabela 2. Note-se que a única diferença é precisamente a origem dos registos experimen-

tais, visto que se continuou a obedecer ao critério previamente estabelecido: trabalhar com intensidades de corrente elétrica abaixo de 500 mA e frequências lineares de sinal elétrico não superiores a 2000 Hz. Ao trabalhar nas mesmas condições experimentais permitirá, mais à frente, comparar os métodos experimentais, como já referido.

Por outro lado, o estudo gráfico da mesma dependência, porém, relativa aos dados colhidos nos multímetros, pode ser consultado na Fig. 6 que mostra um comportamento francamente retilíneo, com um coeficiente de determinação bastante próximo de 1. Além disso, a incerteza no cálculo do declive da reta de ajuste revela que o método é bastante preciso (Δm inferior a 1%). Contudo, a ordenada na origem diferente de 0 é indicativo de um erro sistemático que afetou todas as medições.

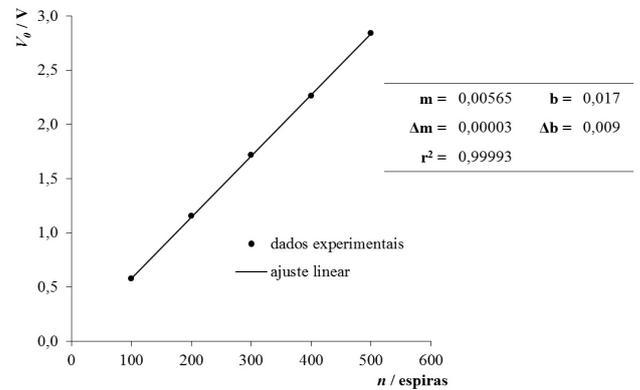


Figura 6 - Gráfico que traduz a dependência $V_0 = f(n)$ e parâmetros matemáticos da reta de ajuste (valores registados nos multímetros).

Tabela 2 - Registos experimentais da dependência $V_0 = f(n)$ (valores registados nos multímetros).

i_{ef} / A	0,185	Bobina	$n / \text{espiras}$	V_{ef} / V	V_0 / V
i_0 / A	0,262	1	300	1,214	1,717
f / Hz	1996	4	200	0,816	1,154
$\omega / \text{rad Hz}$	12541	5	100	0,407	0,576
$\mu_0 / \text{H m}^{-1}$	$4\pi \times 10^{-7}$	7	400	1,602	2,266
$N / \text{espiras}$	485	8	500	2,010	2,843
L / m	0,7500				
D / m	0,04040				
$\theta / ^\circ$	0				

4.2. Dependência $V_0 = f(S)$

A seguir anotaram-se novos valores para as variáveis que se iriam manter constantes ao longo do estudo desta nova dependência. Essas quantidades foram registadas nas duas primeiras colunas da Tabela 3. Nestas colunas poder-se-á verificar que foram novamente utilizados valores de intensidade de corrente elétrica abaixo de 500 mA e frequência linear não superiores a 2000 Hz, conforme anteriormente estabelecido.

Depois disso, utilizando as bobinas com igual número de espiras e diâmetro diferente, foram regis-

tados sucessivos valores reais de diferença de potencial elétrico (registos efetuados no osciloscópio). Esse registo pode ser consultado na segunda parte da Tabela 3. Analisando a Eq. (5), verificar-se-á que a mesma relaciona V_0 com S (e não com D); por isso foi necessário medir o diâmetro das bobinas calculando, seguidamente, a área da secção das bobinas de prova. Acrescente-se ainda o método de medição do diâmetro das bobinas de prova: para cada bobina de prova foi efetuada uma medição do diâmetro exterior da mesma com uma craveira. Contudo, esta medição não corresponde

exatamente ao diâmetro da bobina, visto que se deveria efetuar uma medição do diâmetro externo e interno da bobina, sendo o diâmetro a utilizar resultado de uma média entre os dois valores. Todavia, para se conseguir efetuar o enrolamento nas melhores condições, cada bo-

bina possuía um revestimento interno de PVC algo espesso, o que invalidaria o cálculo anterior. Por isso, decidiu-se que o diâmetro externo seria uma melhor aproximação do diâmetro real das bobinas de prova.

Tabela 3 - Registos experimentais da dependência $V_0 = f(S)$ (valores de diferença de potencial registados no osciloscópio).

i_{eff} / A	0,1007	Bobina	D / m	S / m^2	V_0 / V
i_0 / A	0,142	1	0,04040	0,001282	0,19
f / Hz	920	2	0,03220	0,000814	0,12
$\omega / rad Hz$	5781	3	0,02515	0,000497	0,08
$\mu_0 / H m^{-1}$	$4\pi \times 10^{-7}$	9	0,04500	0,001590	0,24
$N / espiras$	485	10	0,05000	0,001963	0,30
L / m	0,7500				
$n / espiras$	300				
$\theta / ^\circ$	0				

Depois do registo dos resultados experimentais da dependência da diferença de potencial real com o diâmetro das bobinas de prova, elaborou-se um gráfico que relaciona as duas variáveis (Fig. 7).

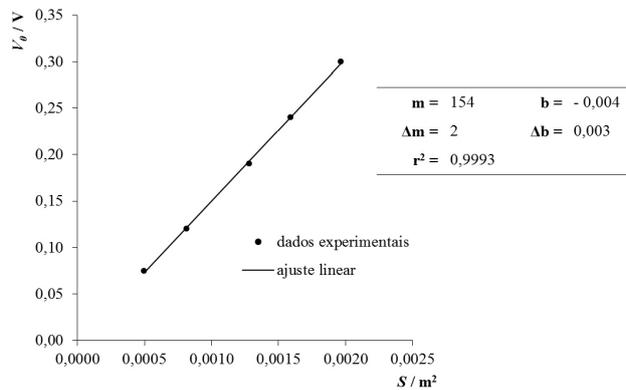


Figura 7 - Gráfico que traduz a dependência $V_0 = f(S)$ e parâmetros matemáticos da reta de ajuste (valores de diferença de potencial registados no osciloscópio).

A Eq. (5) mostra que a diferença de potencial varia linearmente com a área da secção das bobinas de prova. Este facto ficou comprovado com a elaboração

do gráfico e respetivo cálculo da reta de ajuste pelo método dos mínimos quadrados. Note-se que o quadrado do coeficiente de correlação de Pearson, r^2 , é muito próximo de 1, o que traduz um comportamento muito próximo do linear. O cálculo do declive da reta, m , apresenta um valor de incerteza, Δm , muito baixo quando comparado com o próprio declive (Δm corresponde a 1,3% do valor calculado para o declive da reta de ajuste aos dados experimentais), o que revela que o método é muito preciso. Esperava-se também que o valor da ordenada na origem fosse 0, e é de notar que o valor calculado para esta dependência é de $-0,005 \pm 0,004$, estando muito próximo de incluir, na incerteza, a ordenada na origem igual a 0.

Seguidamente é útil notar que foi elaborado, à semelhança da dependência anterior, um registo da dependência das diferenças de potencial com a área da secção das bobinas de prova, utilizando como ferramentas de registo de dados os multímetros, e não o osciloscópio (Tabela 4). De forma idêntica aos anteriores estudos, obedeceram-se aos limites máximos de intensidade de corrente elétrica e frequência linear de sinal elétrico.

Tabela 4 - Registos experimentais da dependência $V_0 = f(S)$ (valores registados nos multímetros).

i_{ef} / A	0,185	Bobina	D / m	S / m^2	V_{ef} / V	V_0 / V
i_0 / A	0,262	1	0,04040	0,001282	1,211	1,713
f / Hz	1996	2	0,03220	0,000814	0,797	1,127
$\omega / rad Hz$	12541	3	0,02515	0,000497	0,486	0,687
$\mu_0 / H m^{-1}$	$4\pi \times 10^{-7}$	9	0,04500	0,001590	1,559	2,205
$N / espiras$	485	10	0,05000	0,001963	1,934	2,735
L / m	0,7500					
$n / espiras$	300					
$\theta / ^\circ$	0					

Novamente foi realizado um estudo gráfico da dependência das duas variáveis em estudo (Fig. 8). O quadrado do coeficiente de correlação de Pearson, r^2 , neste caso, é menor do que o determinado com as leituras realizadas no osciloscópio. Contudo, este registo ainda revela um comportamento claramente retilíneo. Apesar da ordenada na origem e o declive terem sido determinados com elevada precisão é digno de registo, para posterior crítica, o facto de que o declive da reta de ajuste no método do osciloscópio ser menor do que o declive da reta de ajuste no método dos multímetros.

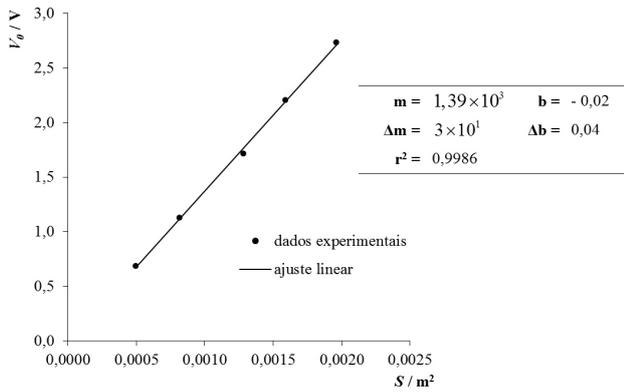


Figura 8 - Gráfico que traduz a dependência $V_0 = f(S)$ e parâmetros matemáticos da reta de ajuste (valores registados nos multímetros).

4.3. Dependência $V_0 = f(\omega)$

Após estudar a dependência das diferenças de potencial elétrico com a área da secção das bobinas, elaborou-se o estudo da dependência da diferença de potencial nos terminais da bobina de prova com a frequência angular do sinal elétrico. Os parâmetros que foram mantidos constantes ao longo deste estudo constam da primeira metade da Tabela 5. Foi realizado um registo de diferenças de potencial elétrico em função das frequências angulares do sinal abrangendo todo o intervalo de frequências lineares para as quais o método

experimental aplicado é válido [0, 2000] Hz. Além disso, é digno de nota o facto de que, sempre que a frequência era alterada, a intensidade de corrente que percorria o solenóide tinha que ser corrigida para o valor estabelecido anteriormente isto porque uma variação de frequência faz variar ligeiramente a amplitude da corrente gerada.

Depois disso foi elaborado o gráfico que traduz a dependência em estudo e, depois dos pontos marcados, a reta de ajuste aos dados experimentais foi calculada (Fig. 9). Note-se que se verifica alguma dispersão dos dados colhidos, contudo, trata-se claramente de um comportamento retilíneo. Este facto vem sublinhar a previsão que é feita pela teoria, visto que na Eq. (5) a diferença de potencial induzida na bobina de prova é diretamente proporcional à frequência angular do sinal elétrico.

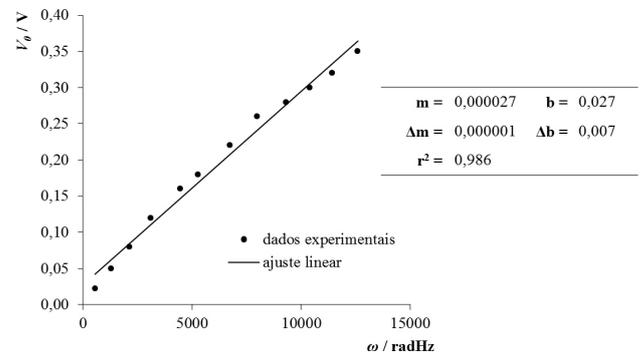


Figura 9 - Gráfico que traduz a dependência $V_0 = f(\omega)$ e parâmetros matemáticos da reta de ajuste (valores de diferença de potencial registados no osciloscópio).

À semelhança do que foi realizado para os estudos anteriores, também para este estudo foram colhidos dados provenientes dos multímetros em utilização. Esses dados experimentais podem ser consultados na Tabela 6. Note-se que também foi respeitado o intervalo aproximado para o qual o método experimental utilizado é válido, a saber [0, 2000] Hz.

Tabela 5 - Registos experimentais da dependência $V_0 = f(\omega)$ (valores de diferença de potencial registados no osciloscópio).

i_{ef} / A	0,0813	Bobina	f / Hz	$\omega / radHz$	V_0 / V
i_0 / A	0,1150		2005	12598	0,350
D / m	0,04040		1820	11435	0,320
$n / espiras$	300		1656	10405	0,300
$\mu_0 / H m^{-1}$	$4\pi \times 10^{-7}$		1484	9324	0,280
$N / espiras$	485		1271	7986	0,260
L / m	0,7500		1074	6748	0,220
$\theta / ^\circ$	0	1	842	5290	0,180
			713	4480	0,160
			495	3110	0,120
			339	2130	0,080
			206	1294	0,050
			90	565	0,022

Tabela 6 - Registos experimentais da dependência $V_0 = f(\omega)$ (valores registados nos multímetros).

i_{ef} / A	0,096	Bobina	f / Hz	$\omega / radHz$	V_{ef} / V	V_0 / V
i_0 / A	0,136		2140	13446	0,741	1,048
D / m	0,04040		1908	11988	0,648	0,916
$n / espiras$	300		1706	10719	0,574	0,812
$\mu_0 / H m^{-1}$	$4\pi \times 10^{-7}$		1418	8910	0,468	0,662
$N / espiras$	485		1211	7609	0,396	0,560
L / m	0,7500		1029	6465	0,331	0,468
$\theta / ^\circ$	0	1	794	4989	0,249	0,352
			589	3701	0,181	0,256
			440	2765	0,135	0,191
			232	1458	0,070	0,099
			126	792	0,037	0,052
			31	195	0,008	0,011

O comportamento dos dados experimentais registados a partir dos multímetros é claramente linear (Fig. 10). É digno de nota que, quando é efetuada uma comparação entre a Fig. 9 e a Fig. 10, fica claro que os dados colhidos nos multímetros revelaram uma menor dispersão do que os registados no osciloscópio. Note-se, porém, que nestes dois estudos, o declive da reta de ajuste no método do osciloscópio é menor do que o declive da reta de ajuste no método dos multímetros. Contudo, é curioso observar que em qualquer estudo, os declives das retas de ajuste determinados com a utilização dos multímetros são sempre superiores aos declives das retas de ajuste determinados pelo método do osciloscópio. Este facto será discutido no final do estudo individualizado de cada dependência.

4.4. Dependência $V_0 = f(i)$

No que respeita à dependência da diferença de potencial nos terminais da bobina de prova com a intensidade de corrente que percorre o solenóide, foi realizada exatamente a mesma técnica até agora aplicada. Inicialmente registaram-se as condições experimentais em que esta dependência iria ser estudada. Esses dados poderão ser consultados na primeira metade da Tabela 7.

Depois disso, da mesma forma como tinha sido realizado até então, efetuou-se o desenho do gráfico que

traduz a dependência em estudo (Fig. 11). Mais uma vez, como estava previsto, o comportamento dos pontos experimentais é claramente retilíneo. Ficou comprovado, então, que a diferença de potencial nos terminais da bobina de prova é diretamente proporcional à intensidade de corrente, i , que atravessa o solenóide. Note-se também, que o coeficiente de determinação continua, à semelhança dos casos anteriores, muito próximo de 1, o que revela uma clara dependência linear. É igualmente importante referir que para todos os estudos é de se esperar uma ordenada na origem igual a 0, o que acontece tendo em conta a incerteza na determinação.

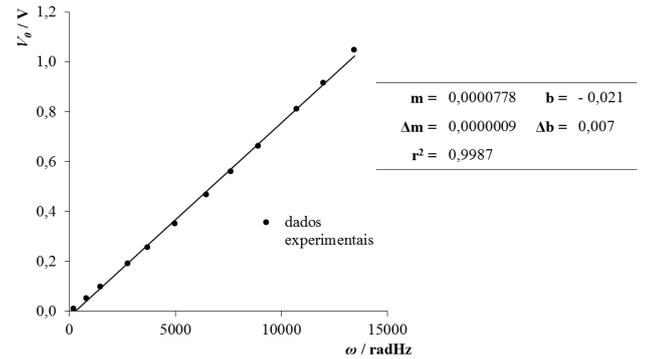


Figura 10 - Gráfico que traduz a dependência $V_0 = f(\omega)$ e parâmetros matemáticos da reta de ajuste (valores registados nos multímetros).

Tabela 7 - Registos experimentais da dependência $V_0 = f(i)$ (valores de diferença de potencial registados no osciloscópio).

f / Hz	1001	Bobina	i_{ef} / A	i_0 / A	V_0 / V
$\omega / radHz$	6289		0,301	0,426	0,650
D / m	0,04040		0,281	0,398	0,600
$n / espiras$	300		0,260	0,367	0,550
$\mu_0 / H m^{-1}$	$4\pi \times 10^{-7}$		0,241	0,341	0,520
$N / espiras$	485		0,221	0,312	0,480
L / m	0,7500		0,200	0,283	0,440
$\theta / ^\circ$	0		0,182	0,257	0,400
		1	0,160	0,227	0,360
			0,141	0,199	0,300
			0,121	0,171	0,250
			0,100	0,141	0,210
			0,081	0,115	0,170
			0,063	0,089	0,130
			0,030	0,043	0,065
			0,015	0,021	0,030

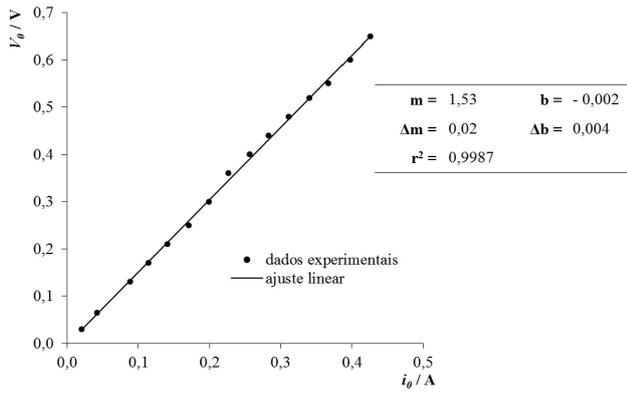


Figura 11 - Gráfico que traduz a dependência $V_0 = f(i)$ e parâmetros matemáticos da reta de ajuste (valores de diferença de potencial registados no osciloscópio).

Efetuuou-se, também, o mesmo estudo com os multímetros e extraíram-se as mesmas conclusões que nos casos anteriores (Tabela 8, Fig. 12).

4.5. Dependência $V_0 = f(\cos(\theta))$

Por fim anotaram-se os valores das variáveis que se iriam manter constantes ao longo do estudo desta dependência. Essas quantidades foram registadas nas duas primeiras colunas da Tabela 9. Nestas colunas poder-se-á verificar que foram utilizados valores de intensidade de corrente elétrica abaixo de 500 mA e frequência linear não superiores a 2000 Hz, como previamente delineado. Depois disso, foi utilizada uma pequena bobina em que era possível fazer variar o ângulo do seu eixo relativamente ao eixo do solenóide. Assim, foram registados sucessivos valores de diferença de potencial real, bem como do ângulo acima referido. Esse registo pode ser consultado na segunda metade da Tabela 9. Procurou-se nesta experiência maximizar o número de pontos experimentais com o objetivo de obter uma melhor estatística dos resultados.

Tabela 8 - Registos experimentais da dependência $V_0 = f(i)$ (valores registados nos multímetros).

f / Hz	1995	Bobina	i_{ef} / A	i_0 / A	V_{ef} / V	V_0 / V
ω / radHz	12535		0,257	0,363	1,635	2,312
D / m	0,04040		0,239	0,338	1,533	2,168
$n / \text{espiras}$	300		0,224	0,317	1,444	2,042
$\mu_0 / \text{H m}^{-1}$	$4\pi \times 10^{-7}$		0,211	0,298	1,364	1,929
$N / \text{espiras}$	485		0,200	0,283	1,299	1,837
L / m	0,7500		0,171	0,242	1,129	1,597
$\theta / ^\circ$	0		0,156	0,221	1,039	1,469
		1	0,138	0,195	0,936	1,324
			0,118	0,167	0,816	1,154
			0,097	0,137	0,693	0,980
			0,076	0,107	0,563	0,796
			0,060	0,085	0,472	0,668
			0,046	0,065	0,384	0,543
			0,026	0,037	0,260	0,368
			0,012	0,017	0,174	0,246

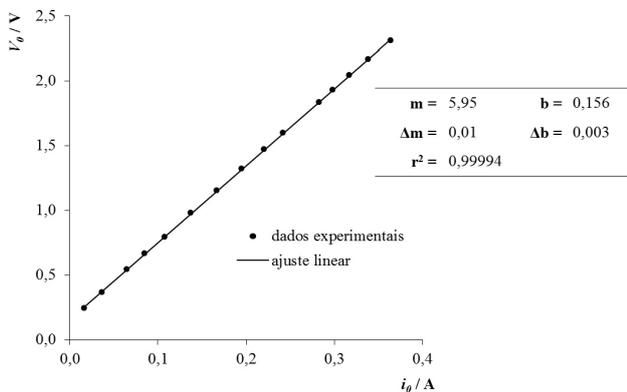
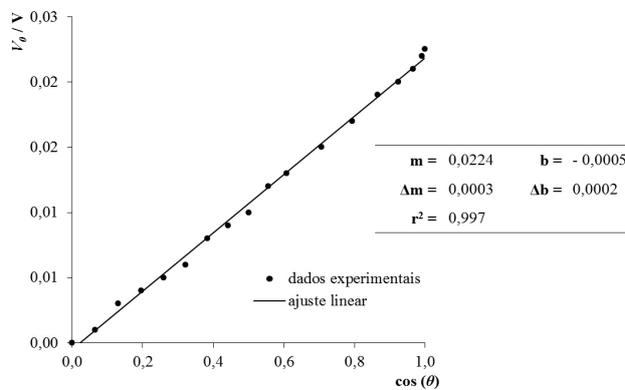


Figura 12 - Gráfico que traduz a dependência $V_0 = f(i)$ e parâmetros matemáticos da reta de ajuste (valores registados nos multímetros).

O gráfico que relaciona as duas variáveis está representado na Fig. 13. A Eq. (5) mostra que a diferença de potencial varia linearmente com o cosseno do ângulo referido. Este facto ficou comprovado com a elaboração do gráfico e respetivo cálculo da reta de ajuste pelo método dos mínimos quadrados. Note-se que o coeficiente de determinação, r^2 , é, novamente, muito próximo de 1, o que traduz um comportamento muito próximo do linear. Além disso, o cálculo do declive da reta, m , apresenta um valor de incerteza, Δm , inferior a 2%, o que revela que o método é muito preciso. Como visto anteriormente, o valor da ordenada na origem deverá ser 0, e é de notar que o valor calculado para esta dependência é de $-0,001 \pm 0,001$, abarcando assim, na incerteza, a ordenada na origem igual a 0.

Tabela 9 - Registos experimentais da dependência $V_0 = f(\cos(\theta))$ (valores de diferença de potencial registados no osciloscópio).

i_{ef} / A	0,1002	Bobina	$\theta / ^\circ$	$\cos(\theta)$	V_0 / V
i_0 / A	0,142		0,0	1,00	0,023
f / Hz	912		7,5	0,99	0,022
$\omega / rad Hz$	5730		15,0	0,97	0,021
D / m	0,02510		22,5	0,92	0,020
$n / espiras$	100		30,0	0,87	0,019
$\mu_0 / H m^{-1}$	$4\pi \times 10^{-7}$		37,5	0,79	0,017
$N / espiras$	485		45,0	0,71	0,015
L / m	0,7500		52,5	0,61	0,013
			56,3	0,56	0,012
		6	60,0	0,50	0,010
			63,8	0,44	0,009
			67,5	0,38	0,008
			71,3	0,32	0,006
			75,0	0,26	0,005
			78,8	0,20	0,004
			82,5	0,13	0,003
			86,3	0,07	0,001
			90,0	0,00	0,000

Figura 13 - Gráfico que traduz a dependência $V_0 = f(\cos(\theta))$ e parâmetros matemáticos da reta de ajuste (valores de diferença de potencial registados no osciloscópio).

Note-se que, à semelhança do que aconteceu anteriormente, também se realizou o mesmo estudo tendo em conta as leituras realizadas nos multímetros (Ta-

bela 10). Como previsto, o gráfico dos registos experimentais revelou um comportamento retilíneo, o que comprova a dependência linear da tensão elétrica induzida com o cosseno do ângulo formado pelos eixos do solenóide e da bobina de prova (Fig. 14).

4.6. O cálculo da permeabilidade magnética

A Eq. (5), objeto de estudo ao longo da atividade laboratorial, mostra que a diferença de potencial induzida nos terminais de uma bobina de prova no interior de um solenóide é diretamente proporcional ao número de espiras a bobina de prova, n , à área da superfície da bobina de prova, S , à frequência angular do sinal sinusoidal aplicado no solenóide, ω , à intensidade de corrente real que atravessava o solenóide, i , e ao cosseno do ângulo formado entre o eixo do solenóide e o eixo da bobina de prova. Estas são as variáveis que se conseguem manipular para comprovar a Eq. (5).

Tabela 10 - Registos experimentais da dependência $V_0 = f(\cos(\theta))$ (valores registados nos multímetros).

i_{ef} / A	0,185	Bobina	$\theta / ^\circ$	$\cos(\theta)$	V_{ef} / V	V_0 / V
i_0 / A	0,262		0	1,00	0,144	0,2036
f / Hz	1996		15	0,97	0,138	0,1952
$\omega / rad Hz$	12541		30	0,87	0,122	0,1725
D / m	0,02510		45	0,71	0,095	0,1344
$n / espiras$	100	6	60	0,50	0,064	0,0905
$\mu_0 / H m^{-1}$	$4\pi \times 10^{-7}$		75	0,26	0,027	0,0382
$N / espiras$	485		90	0,00	0,003	0,0042
L / m	0,7500					

Contudo, é fácil notar que existem dois outros parâmetros dos quais a expressão depende: a permeabilidade magnética, μ_0 , e a densidade linear de espiras, N/L , que traduz a quantidade de espiras por metro que o solenóide possui. A montagem experimental não permite fazer variar esta última quantidade. Para isso seriam necessários cinco solenóides de características di-

ferentes - com diferente número de espiras por metro para que fosse possível estudar essa dependência.

Todavia, sabendo o fator N/L , é possível determinar a permeabilidade magnética do vazio (que é aproximadamente igual à permeabilidade magnética do ar), μ_0 , e calcular o erro associado à determinação. Assim, sendo m o declive da reta de ajuste correspondente a

cada uma das dependências estudadas, é possível efetuar o cálculo do valor da permeabilidade magnética do

vazio da seguinte forma

$$\mu_0 = \frac{mL}{NS\omega i_0 \cos \theta}, \quad \text{para a dependência } V_0 = f(n), \quad (8)$$

$$\mu_0 = \frac{mL}{nN\omega i_0 \cos \theta}, \quad \text{para a dependência } V_0 = f(S), \quad (9)$$

$$\mu_0 = \frac{mL}{nNSi_0 \cos \theta}, \quad \text{para a dependência } V_0 = f(\omega), \quad (10)$$

$$\mu_0 = \frac{mL}{nNS\omega \cos \theta}, \quad \text{para a dependência } V_0 = f(i_0), \quad (11)$$

$$\mu_0 = \frac{mL}{nNS\omega i_0}, \quad \text{para a dependência } V_0 = f(\cos(\theta)). \quad (12)$$

Desta forma, é possível calcular o valor da permeabilidade magnética do vazio e comparar os dois métodos utilizados (Tabela 11).

Da análise da Tabela 11 podem extrair-se várias conclusões. Em primeiro lugar, é digno de nota que todos os valores determinados para a permeabilidade magnética do vazio pelo método dos multímetros revelaram uma percentagem de erro relativo superior à determinação utilizando o método do osciloscópio. O facto do método dos multímetros não conduzir a resultados tão próximos do previsto poderá estar relacionado com o facto da medição com um multímetro estar sujeita a mudanças automáticas de escala. Este fator poderá influenciar de alguma forma no resultado final a obter. Além disso, note-se que o desvio dos resultados experimentais calculados pelo método dos multímetros é cometido, invariavelmente, por excesso; este facto é justificado precisamente assumindo a hipótese de que à medida que a diferença de potencial nos terminais da bobina de prova vai aumentando, a escala do multímetro poderá ser alterada no sentido de inflacionar os valores a registar - este comportamento faz aumentar o declive da reta de cada dependência, aumentando também o valor calculado para a permeabilidade magnética. É possível, assim, efetuar um cálculo grosseiro do valor aproximado da permeabilidade magnética que este método nos possibilita realizar. Pode dizer-se que o valor médio de permeabilidade magnética do vazio determinado pelo método do osciloscópio é de $2,09 \times 10^{-6} \text{ Hm}^{-1}$, sendo que esta determinação poderá vir afetada de uma percentagem de

erro relativo que se situa entre os 52 e os 83 pontos percentuais.

Por outro lado, o método do osciloscópio permitiu efetuar o cálculo da permeabilidade magnética com uma menor percentagem de erro relativo. Este facto revela que este método é o melhor a ser aplicado no estudo desta atividade laboratorial. À semelhança do que se fez no caso anterior, é possível calcular uma média grosseira do valor da permeabilidade magnética do vazio para o método em análise, sendo que para este método o valor calculado é de $9,36 \times 10^{-7} \text{ Hm}^{-1}$, sendo que esta determinação poderá vir afetada de uma percentagem de erro relativo que se situa entre os 22 e os 32 pontos percentuais.

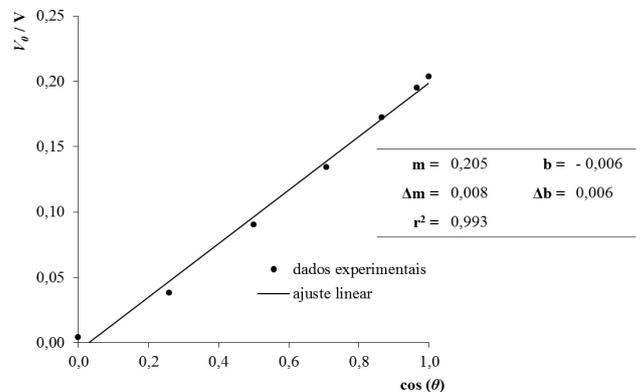


Figura 14 - Gráfico que traduz a dependência $V_0 = f(\cos(\theta))$ e parâmetros matemáticos da recta de ajuste (valores registados nos multímetros).

Tabela 11 - Valores de permeabilidade magnética do vazio calculados para cada dependência estudada.

Dependência	$V_0 = f(n)$	$V_0 = f(S)$	$V_0 = f(\omega)$	$V_0 = f(i_0)$	$V_0 = f(\cos(\theta))$
Método do osciloscópio					
$\mu_0/\text{H m}^{-1}$	$9,41 \times 10^{-7}$	$9,62 \times 10^{-7}$	$9,35 \times 10^{-7}$	$9,80 \times 10^{-7}$	$8,61 \times 10^{-7}$
% $\epsilon_{\text{relativo}}$	25%	23%	26%	22%	32%
Método dos multímetros					
$\mu_0/\text{H m}^{-1}$	$2,08 \times 10^{-6}$	$2,19 \times 10^{-6}$	$2,30 \times 10^{-6}$	$1,91 \times 10^{-6}$	$1,96 \times 10^{-6}$
% $\epsilon_{\text{relativo}}$	65%	74%	83%	52%	56%

É conveniente, nesta fase, efetuar uma comparação no sentido de determinar qual das dependências estudadas produz um resultado mais próximo do tabelado. De todas os controlos de variáveis efetuados, o que produziu melhores resultados foi o da variação da diferença de potencial nos terminais da bobina de prova com a intensidade real de corrente elétrica que percorria o circuito principal. Era de esperar que este método permitisse obter melhores resultados dado que nesta dependência conseguiu-se um muito maior número de pontos experimentais. Este facto permitiu minimizar os erros potencialmente cometidos em algumas medições isoladas, que seriam influentes se efetuássemos um estudo com apenas 5 pontos. Assim, pode dizer-se que o melhor método para esta atividade é o do osciloscópio e a melhor dependência é a da intensidade de corrente elétrica.

5. Implementação pedagógica

A implementação pedagógica de um trabalho experimental é o que vai determinar definitivamente se o trabalho é aplicável, exequível e avaliável no contexto de ensino. Entre outros assuntos, os principais objetivos de aprendizagem que se enquadram nesta atividade experimental são:

- Definir o fluxo de um campo magnético uniforme através de uma superfície plana como uma grandeza que depende da intensidade do campo B , da área dessa superfície S e do ângulo θ entre as linhas de campo e a normal à superfície.
- Verificar que a variação do campo magnético pode conduzir à produção de uma corrente elétrica. (Experiência de Faraday).
- Explicar o significado da lei de Faraday: a corrente induzida num circuito fechado é diretamente proporcional à variação do fluxo do campo magnético através da superfície limitada pelo circuito.
- Verificar que é possível induzir correntes alternadas.
- Definir frequência e amplitude da corrente alternada e da tensão alternada.
- Reconhecer que a frequência da corrente induzida é definida pelo dispositivo que gera esta corrente.

Na verdade, este conjunto de objetivos de aprendizagem corresponde a cerca de 30% do total de objetivos de aprendizagem habitualmente delineados para o capítulo em questão. Isto revela quão abrangente esta atividade laboratorial se torna. Por isso, é necessário estabelecer estratégias de implementação, exploração e avaliação da atividade experimental em questão.

5.1. Quando implementar a atividade

O *timing* para a implementação de uma atividade experimental é de suma importância, visto que pode fazer com que uma indução de uma lei se possa tornar uma

simples e, por vezes, pouco interessante verificação de uma lei. É certo que pode ser difícil para os alunos, do ponto de vista conceptual, compreenderem e efetuarem uma indução de uma lei. Contudo, é muito mais útil, sem dúvida, recorrer a esta técnica do que simplesmente exibir uma determinada lei e pedir aos alunos que a comprovem.

A implementação desta atividade experimental promove uma abordagem indutiva das leis da indução eletromagnética. Contudo, existem alguns conceitos que devem ser abordados previamente no sentido de proporcionar ao aluno um melhor entendimento da atividade experimental. É essencial que o aluno compreenda o que é um campo magnético e como ele pode ser produzido. É igualmente importante que o aluno compreenda o que se entende por uma corrente elétrica alternada e, conseqüentemente saber o que é o período, a amplitude e a frequência de um sinal elétrico. É também essencial que o aluno compreenda que a variação temporal do fluxo de campo magnético gerado por uma corrente elétrica alternada produz um sinal elétrico induzido de corrente alternada.

Partindo do pressuposto que esses pré-requisitos são assegurados, o professor está em condições de introduzir a atividade experimental aos alunos com o objetivo de lecionar a parte de indução eletromagnética. A abordagem à atividade laboratorial poderá ser realizada em sensivelmente duas aulas de 90 minutos. Poderá, *a priori*, parecer demasiado dispor de dois blocos de aulas para uma atividade experimental desta natureza. Contudo, o tempo utilizado numa exploração completa desta atividade laboratorial dotará os alunos de competências que os farão compreender muito melhor exercícios e problemas que lhes serão propostos *a posteriori*.

O período ideal para a implementação desta atividade é, portanto, um fator de grande importância para determinar o sucesso ou o insucesso na aquisição de conhecimentos por parte dos alunos. Todavia, não interessa apenas quando esta atividade deverá ser integrada no plano das aulas. É necessário estabelecer estratégias de exploração da atividade experimental. É nessa linha de raciocínio que o próximo tema fará a sua reflexão.

5.2. Como explorar a atividade

Uma boa exploração de uma atividade experimental possibilita aos alunos aprofundarem os seus conhecimentos acerca do assunto em questão, ao invés de realizarem a atividade com o único intuito de obter um resultado final. Por isso, é essencial, ao longo da atividade, estabelecer metas intermédias que guiarão o processo de ensino e aprendizagem. Pode dizer-se que os grandes objetivos de cálculo desta experiência são:

- Verificar que $V_0 \propto n$;
- Verificar que $V_0 \propto S$;
- Verificar que $V_0 \propto \omega$;

- Verificar que $V_0 \propto i_0$;
- Verificar que $V_0 \propto \cos(\theta)$;
- Calcular o valor μ_0 ou o fator $\frac{N}{L}$.

Todavia, existem outros objetivos relacionados com o tratamento dos dados, a operação da montagem experimental e dos instrumentos de medida que não devem ser ignorados, como por exemplo:

- Montagem de um circuito elétrico;
- Manipulação de um osciloscópio;
- Realização de medições respeitando os algarismos significativos;
- Elaboração de uma folha de cálculo que relacione as variáveis em estudo.

Se esta é a primeira vez que o aluno terá contacto direto com o osciloscópio, será, sem dúvida, oportuno reservar parte do primeiro bloco de aulas para explicar o funcionamento e o registo da medida. Esta é a técnica básica para que o aluno compreenda o porquê da utilização deste dispositivo. Posteriormente, poder-se-á começar por discutir a indução eletromagnética do ponto de vista qualitativo. Para isso, será conveniente realizar uma muito rápida atividade demonstrativa de sala de aula em que se liga uma bobina a um amperímetro e, com a ajuda de um íman, se verifica que a variação temporal do fluxo de campo magnético produz uma corrente elétrica na bobina.

Depois desta primeira abordagem será conveniente exibir aos alunos uma montagem experimental já feita, destacando que a corrente que passa no solenóide produz um campo magnético. Será conveniente nesta parte explicar que a bobina que se encontra no interior do solenóide deverá estar ligada ao osciloscópio para que se consiga medir as características do sinal elétrico induzido pela variação temporal do fluxo de campo magnético provocada pelo solenóide. A seguir, poder-se-á ligar um gerador de corrente contínua e verificar a existência de um campo magnético com um medidor de campo magnético. Todavia, apesar da existência de campo magnético, como este é constante ao longo do tempo, não se verificará corrente induzida (exceto nos momentos em que se liga e desliga a montagem experimental).

Após esta fase introdutória, poder-se-á passar ao controlo de variáveis. Para isso, será proveitoso questionar os alunos acerca de que variáveis poderão influenciar a corrente elétrica induzida numa qualquer bobina. Os alunos, muito provavelmente, referirão de imediato as dimensões da bobina, dimensões que são estabelecidas pelo número de espiras, n , e pela área da superfície transversal da bobina de prova, S . É claro que os alunos poderão referir que o tipo de solenóide também pode influenciar a corrente elétrica induzida na bobina de prova, porém, será necessário referir que essa variável não é passível de ser controlada visto ser uma constante ao longo da atividade experimental. Contudo, as três restantes variáveis poderão ser mais difíceis para que os

alunos as refiram de imediato. Por isso, talvez sejam necessária uma discussão guiada no sentido dos alunos concluírem que a intensidade da corrente no solenóide, a frequência angular do sinal e o ângulo entre os eixos do solenóide e da bobina de prova contribuem igualmente para a variação da tensão induzida na bobina de prova. Nesta fase, as tabelas de registo de dados experimentais poderão ser planificadas, à semelhança das tabelas desenvolvidas no registo de resultados efetuado atrás. Será útil, ao longo da atividade, nunca referir a Eq. (5) como uma equação a provar. Assim, serão os alunos, com a técnica traçada até ao momento, que obterão naturalmente a Eq. (5), à parte das constantes μ_0 e $\frac{N}{L}$. É essencial que os alunos compreendam que existe um fator de conversão entre a tensão e a intensidade de corrente que é lida nos multímetros utilizados e o valor real dessas grandezas físicas, chamando a atenção para as Eqs. (6) e (7).

Depois da fase de preparação e planificação da atividade experimental é necessário passar aos estudos individualizados de cada uma das variáveis. Nesta fase será útil estudar com os alunos o limite máximo de intensidades de corrente e frequências para as quais o sistema se comporta linearmente. Assim, podem construir-se as figuras de Lissajous referentes aos dois sinais (original e induzido) e referir que a diferença de potencial induzida estará desfasada de 90° em relação ao sinal original e, por isso, a figura a observar deverá ser um círculo. É importante também referir que o sistema deixa de ser fiável a partir do momento em que ocorrer uma distorção da figura de Lissajous. Assim, conseguir-se-á estudar com os alunos as limitações do sistema em utilização. Como grande parte da primeira aula será tomada pela planificação da atividade experimental, será útil estudar, nesta aula inicial, as dependências mais simples, ou seja:

- Verificar que $V_0 \propto n$.
- Verificar que $V_0 \propto S$.

Desta forma, os alunos, numa primeira aula, concluirão que a diferença de potencial medida nos terminais da bobina de prova é proporcional ao número de espiras da bobina de prova, n , e à área da secção transversal da bobina de prova, S .

Numa segunda aula dedicada à execução desta atividade, os alunos poderão efetuar um estudo exaustivo de como a diferença de potencial nos terminais da bobina de prova varia com a frequência angular do sinal, com a intensidade da corrente do sistema principal e com o ângulo formado pelos eixos do solenóide e da bobina de prova. Assim, efetuar-se-á a análise das três dependências restantes:

- Verificar que $V_0 \propto \omega$.
- Verificar que $V_0 \propto i_0$.
- Verificar que $V_0 \propto \cos(\theta)$.

Depois dos alunos concluírem que para cada dependência existe uma relação de proporcionalidade direta, em grande grupo poder-se-á tentar chegar próximo

da Eq. (5). A equação que é suposto os alunos conseguirem obter é

$$V_0 = k \times nS\omega i_0 \cos(\theta). \quad (13)$$

Na Eq. (13), o valor de k traduz uma constante arbitrária pela qual a expressão que os alunos definiram é multiplicada. Nesta altura o professor deverá referir que esta constante, k , resulta do produto da permeabilidade magnética do vazio, μ_0 , uma constante universal, pela densidade linear de espiras do solenóide, $\frac{N}{L}$, que pode ser facilmente calculada contando o número de espiras do solenóide e medindo o comprimento do mesmo. Assim, o professor poderá solicitar aos alunos que calculem a densidade linear de espiras do solenóide, $\frac{N}{L}$, e, para cada dependência estudada, calculem o valor da permeabilidade magnética do vazio e comparem com o valor tabelado, a saber, $4\pi \times 10^{-7} \text{ Hm}^{-1}$.

5.3. Como avaliar a atividade

A exploração de uma atividade é o passo vital para que se verifique uma compreensão completa do trabalho experimental em questão. Contudo, a importância da avaliação não deve ser descorada. A avaliação de uma atividade é o processo pelo qual se recolhem e interpretam informações que implicam juízos de valor, com vista a tomar decisões. Nesta linha de raciocínio, e dada a complexidade da atividade laboratorial em questão, o método de avaliação que melhor se aplica à situação em causa é o relatório escrito. Nos atuais currículos, tanto ao nível das capacidades (resolução de problemas, raciocínio, interpretação e comunicação), como das atitudes e valores (gosto pela pesquisa, persistência, responsabilidade), a execução de relatórios escritos é bastante valorizada. O grande potencial formativo dos relatórios escritos é verificado não só porque os relatórios estão mais associados a objetivos curriculares de aplicação de conhecimentos a situações novas e de desenvolvimento de algumas capacidades, mas também porque estes documentos de avaliação não se limitam a reproduzir ou resumir textos consultados. No relatório deverão constar os registos experimentais de uma forma metódica e os pormenores relevantes da experiência, porém, dada a complexidade do tema, uma introdução teórica completa poderá ser suprimida.

Todavia, existem outros métodos de avaliação que poderão ser aplicados nesta atividade. Como a primeira aula poderá servir para uma introdução ao manuseamento de instrumentos de medida e integração com o método de controlo sistemático de variáveis, a utilização de um registo de observações não será necessária. Contudo, este registo deverá constar da segunda aula de 90 minutos reservada a uma manipulação da atividade experimental bastante mais autónoma. Assim, poder-se-á tornar a atividade o mais formativa possível.

6. Conclusões

Toda a exploração desta abordagem experimental das leis da indução eletromagnética forneceu uma visão mais clara das técnicas que podem ser elaboradas para que os alunos compreendam melhor este fenómeno físico. A abordagem inicial deste trabalho permitiu compreender todos os aspetos teóricos relacionados com as leis da indução eletromagnética e as suas relações com a equação que serve de base às verificações das dependências experimentais propostas neste trabalho.

Apesar de todas as dependências experimentais propostas terem conduzido à mesma conclusão qualitativa - a proporcionalidade direta entre a diferença de potencial induzida nos terminais das bobinas de prova - o mesmo não aconteceu quando os resultados foram analisados quantitativamente. Os resultados obtidos revelaram uma diferença clara no método utilizado para efetuar medições - leituras de diferenças de potencial efetuadas no multímetro ou no osciloscópio. Quando se utilizaram as leituras provenientes do multímetro para calcular o valor da permeabilidade magnética do vazio, μ_0 , o valor obtido foi, em média, $2,09 \times 10^{-6} \text{ Hm}^{-1}$, sendo que esta determinação vem afetada de uma percentagem de erro relativo que se situa entre os 52 e os 83 pontos percentuais. Por outro lado, quando se utilizaram as leituras provenientes do osciloscópio para calcular o valor da permeabilidade magnética do vazio, μ_0 , o valor obtido foi, em média, $9,36 \times 10^{-7} \text{ Hm}^{-1}$, sendo que esta determinação vem afetada de uma percentagem de erro relativo que se situa entre os 22 e os 32 pontos percentuais. Isto revela claramente que a determinação tendo como base o osciloscópio conduz a resultados muito mais próximos do valor esperado de $4\pi \times 10^{-7} \text{ Hm}^{-1}$.

O trabalho experimental poderá eventualmente ser melhorado com a utilização de mais quatro solenóides para ser possibilitado o estudo da dependência da diferença de potencial com a densidade linear de espiras do solenóide.

Este trabalho possibilitou igualmente desenvolver um estudo experimental metódico e direcionado acerca da temática. Esta análise permitiu conhecer melhor as capacidades diversificadas que esta experiência explora e refletir sobre as estratégias de ensino e aprendizagem que podem ser incrementadas no ensino secundário e, naturalmente, pré-universitário. Concluiu-se, igualmente, que, dada a complexidade da atividade experimental proposta, o melhor momento para introduzi-la será quando o aluno compreender o que é um campo magnético e como ele pode ser produzido; o que se entende por uma corrente elétrica alternada e, conseqüentemente o que é o período, a amplitude e a frequência de um sinal elétrico; e que a variação temporal do fluxo de campo magnético gerado por uma corrente elétrica alternada produz um sinal elétrico induzido de corrente alternada. Depois de uma análise

aprofundada à atividade, concluiu-se que esta deverá ser explorada em dois blocos de aulas de 90 minutos, sendo que o primeiro bloco servirá para o aluno contatar com novo equipamento experimental, notar pormenores importantes acerca da execução experimental e realizar as primeiras duas dependências programadas. A segunda aula servirá para o aluno concluir o trabalho por estudar as restantes três dependências experimentais. Nesta linha temporal é conveniente o professor utilizar como método de avaliação uma folha de registo de observações que deverá ser implementada na segunda aula. Por fim, a melhor forma para avaliar esta atividade experimental será pela elaboração de um relatório escrito com uma elevada incidência no registo de dados cuidado e extração de conclusões relevantes, podendo a introdução teórica ser ligeiramente subvalorizada.

Este trabalho deixou claro e evidente a importância da experiência na área da física. É importante que os alunos possam ter contato com atividades experimentais formativas e com um grau de dificuldade médio a elevado, no sentido de os motivar à aprendizagem da

ciência. Por outro lado, é imperativo que os professores possam promover o contato dos seus alunos com equipamento que, *grosso modo*, não é utilizado ou por falta de formação, ou por falta de tempo. Este trabalho serve, assim, de incentivo a todos os docentes da área da física a promoverem um ensino de qualidade nas suas escolas.

Referências

- [1] *Indução Eletromagnética*, disponível em <http://www.if.ufrgs.br/fis/sumulas/keller/rot15.pdf>. Acesso em 13/6/2011.
- [2] *Força Eletromotriz Induzida*, disponível em <http://www.if.ufrgs.br/fis182/labs/lab6.pdf>. Acesso em 13/6/2011.
- [3] R. Serway, *Physics for Scientists and Engineers* (Thomson-Brooks/Cole, Belmont, 2004).
- [4] *O Solenóide e o Toróide*, disponível em <http://www.fisica.ufs.br/egsantana/elecmagnet/magnetico/cMagnetico.html>. Acesso em 13/6/2011.