

Método da hélice de Busch e a determinação da componente horizontal do campo magnético terrestre

(The Busch helical method and the determination of the horizontal component of Earth's magnetic field)

Marisa Almeida Cavalcante¹ e Eliane Fernanda Dias

Pontifícia Universidade Católica de São Paulo, São Paulo, SP, Brasil

Recebido em 16/5/2006; Aceito em 13/7/2006

Este trabalho apresenta uma proposta experimental no estudo dos aspectos fenomenológicos envolvidos na trajetória de um feixe de elétrons sob a ação de campos elétricos e magnéticos. Os resultados deste trabalho estão sendo usados na disciplina de Estrutura da Matéria com o objetivo que os alunos possam compreender os princípios básicos envolvidos na construção de microscópios eletrônicos tais como a convergência de um feixe divergente de elétrons e a consequente formação da hélice cilíndrica no método de Busch para a determinação da carga específica do elétron. Além disso pode-se, a partir desse movimento, determinar a intensidade da componente horizontal do campo magnético terrestre.

Palavras-chave: carga específica do elétron, campo magnético terrestre, método da hélice de Busch, raios catódicos.

This article deals with an experimental proposal for studying physical phenomena associated to the trajectory of an electron beam submitted to electric and magnetic fields. The results of this work are being used in the discipline Structure of the Matter aiming that the students can understand basic principles involved in the construction of electron microscopes as the convergence of a divergent electron beam and the consequent formation of the cylindrical helix in the Busch helical method for the determination of the ratio e/m of the electron. Besides, this work shows how we can determine the intensity of the horizontal component of the Earth's magnetic field through the produced by the cylindrical helix.

Keywords: specifies charge of electrons, Earth's magnetic field, method of the helix of Busch, cathode rays.

1. Introdução

Muitas das dificuldades dos estudantes universitários na aprendizagem significativa acerca de leis básicas do eletromagnetismo clássico estão associadas ao processo instrucional a que são submetidos. Tais processos muitas vezes dão maior ênfase a uma visão matematizada deixando de lado a compreensão dos fenômenos físicos envolvidos. Alguns trabalhos [1-5] mostram a grande importância dos aspectos fenomenológicos na construção de modelos mentais adequados que permitam descrever, explicar e utilizar leis para fazer previsões. Neste sentido a utilização da experimentação como estratégia para uma aprendizagem significativa é praticamente consensual entre os pesquisadores [6].

Os métodos da mecânica clássica permitem determinar a massa de um corpo, cuja trajetória tenha sido perturbada, desde que seja possível medir a magnitude da perturbação na trajetória e a magnitude do elemento perturbador.

Campos elétricos e/ou magnéticos exercem per-

turbações sobre a trajetória de cargas elétricas. Este efeito permite determinar a razão entre a carga e a massa de tais partículas (e/m), denominada *carga específica*.

Em 1897, J.J. Thomson [7] mediu a carga específica do elétron, $e/m = 1,7589 \cdot 10^{11}$ C/kg com um arranjo experimental que permite medir com boa precisão a perturbação causada na trajetória de elétrons por campos elétricos e magnéticos simultâneos.

O trabalho pioneiro de Thomson teve continuidade com o entusiasmo de outros pesquisadores. Em fins de 1920 estavam disponíveis várias outras técnicas para a determinação de cargas específicas de partículas elementares. Um dos experimentos, desenvolvido neste período em 1922, por Busch [8], utiliza o método da hélice. Neste método, a peça de maior relevância experimental é um tubo de raios catódicos com uma tela fluorescente numa extremidade. O tubo é imerso num campo magnético no interior de um solenóide.

¹E-mail: marisac@puccp.br.

2. Método de hélice [9]

No vácuo, um cátodo incandescente emite elétrons, que são então acelerados por uma diferença de potencial de vários milhares de volts, dirigidos a uma placa de ânodo (elétrons com velocidade v_{AK}) e a seguir entram num espaço onde existe um campo elétrico alternado (região entre as placas defletoras que está paralela ao eixo do tubo). Lá o feixe diverge produzindo uma varredura na tela conforme esquema da Fig. 1. Todos os elétrons tem mesma velocidade v_{AK} comunicada a eles pela diferença de potencial ΔV entre o cátodo e o ânodo.

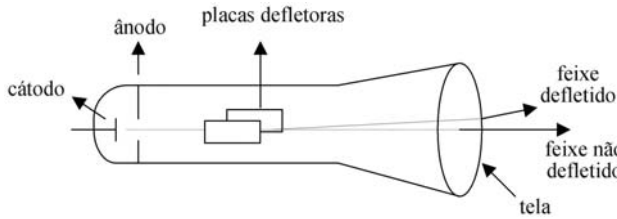


Figura 1 - Tubo de raios catódicos.

As cargas elétricas saem do filamento com uma velocidade desprezível, adquirem uma energia cinética T , enquanto perdem a energia potencial, dada por

$$T = \frac{1}{2}mv_{AK}^2 = \Delta V e \quad \text{tal que} \quad v_{AK} = \sqrt{\frac{2e\Delta V}{m}}, \quad (1)$$

onde e é a carga do elétron.

Com a finalidade de convergir este feixe divergente num ponto, aplica-se um campo magnético \mathbf{B} paralelo ao eixo da ampola, que pode ser produzido facilmente por um solenóide. Um elétron que entra na região entre as placas defletoras com velocidade v_{AK} passa a ter velocidade decomposta em duas componentes: a componente axial $v_a = v_{AK}$ e a componente radial v_n (onde v_n é imprimida ao elétron pelo campo elétrico existente entre as placas defletoras). O efeito da indução magnética \mathbf{B} não afeta a componente *axial* v_a , porque esta é paralela a \mathbf{B} , e somente afetará a componente radial da velocidade v_n que é normal a \mathbf{B} , esta indução magnética verga a componente radial numa trajetória circular de raio r , portanto

$$m \frac{v^2}{r} = ev_n B \quad \text{e tem-se que} \quad v_n = \frac{eBr}{m}, \quad (2)$$

onde a indução B não afeta o valor absoluto de v_n , mas somente a sua direção.

O tempo t exigido para um círculo completo (distância $= 2\pi r$) é

$$t = \frac{2\pi r}{v_n}. \quad (3)$$

Sustituindo a Eq. (2) na Eq. (3), temos

$$t = \frac{2\pi m}{Be}. \quad (4)$$

A Eq. (4) mostra que o tempo t é independente do raio r ; assim as partículas mais velozes percorrem círculos proporcionalmente maiores, portanto, t não depende da velocidade v_n , não dependendo do campo elétrico aplicado entre as placas defletoras.

A trajetória completa de um elétron consiste, portanto, da superposição do movimento retilíneo uniforme paralelo ao eixo, e a revolução num plano perpendicular ao eixo, dando origem à uma hélice cilíndrica. A Fig. 2 demonstra trajetórias hélices-cilíndricas sofridas pelos elétrons ao deixarem as placas defletoras.

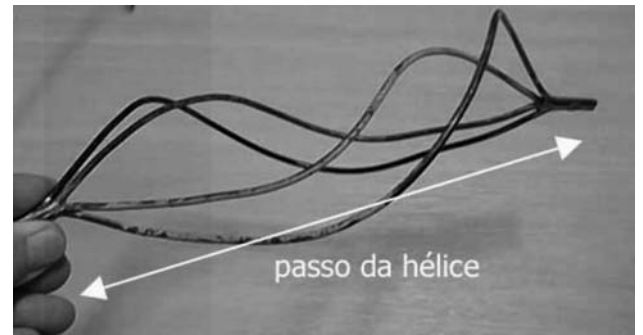


Figura 2 - Trajetória hélice-cilíndrica com “dois raios distintos”.

Todas as hélices que emergem das placas defletoras chegam juntas, periodicamente, num mesmo ponto do eixo e temos que saber a que distância s uma única hélice toca o eixo.

Para se saber esta distância s , parte-se do cálculo da velocidade axial comum de cada elétron $v_a = v_{AK}$ (Eq. 1) usando o tempo t (Eq. 4) de uma revolução completa, donde

$$s = v_{AK} t = \sqrt{\frac{2e\Delta V}{m}} \times \frac{2\pi m}{Be} = \frac{2\pi}{B} \sqrt{2\Delta V \frac{m}{e}}. \quad (5)$$

Para todas as hélices, os raios voltam ao eixo à mesma distância s , enquanto a componente normal da velocidade executa um MCU, a componente paralela ao campo \mathbf{B} se desloca em linha reta, percorrendo a distância s que corresponde ao passo da hélice.

Esse resultado matemático sugere o seguinte procedimento, para a determinação da carga específica do

elétron; para uma dada distância s entre a placa defletora e a tela, o valor do campo magnético B produzido pelo solenóide, é variado até que seja produzido o primeiro ponto na tela fluorescente. Portanto, pela Eq. (5), tem-se

$$\frac{e}{m} = \frac{8\pi^2 \Delta V}{B^2 s^2}. \quad (6)$$

Este método de determinação da carga específica do elétron, a partir da convergência de um feixe divergente de elétrons é conhecido como método de Busch.

3. Proposta experimental

1. Estudo qualitativo: Visualização da hélice cilíndrica através do tubo de Braun

Para permitir ao aluno uma maior compreensão do processo de formação da hélice cilíndrica utilizamos o tubo de Braun da Fig. 3.

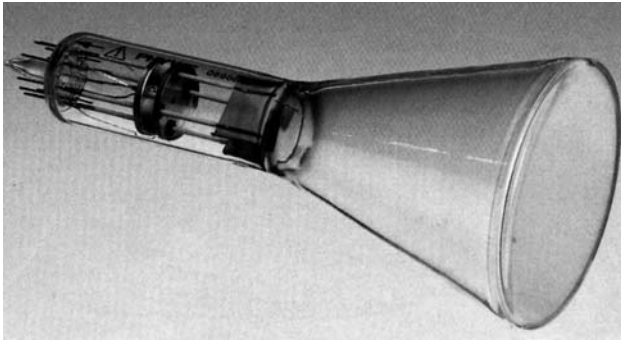


Figura 3 - Tubo de Braun produzido pela Phywe normalmente utilizado para demonstrações do experimento de Thomson de determinação da carga específica do elétron.

Este tubo apresenta um resíduo de gás no seu interior de tal modo que nos permite uma visualização da trajetória do feixe em ambientes escurecidos.

Aproveitando-nos desta propriedade do tubo adaptamos a ele um conjunto de bobinas de Helmholtz ao invés do solenóide, de tal modo a alinhar a direção do campo magnético ao eixo do tubo. Com esta adaptação das bobinas consegue-se visualizar no interior do tubo a formação da hélice cilíndrica à medida que o campo magnético é ajustado até se obter a convergência total do feixe.

A Fig. 4 mostra o arranjo experimental elaborado para este fim.

2. Método da hélice e determinação da componente horizontal do campo magnético terrestre, adaptando-se um tubo de osciloscópio antigo

Para a execução do experimento utilizamos um tubo de osciloscópio da marca RCA modelo 5UP1 que apresenta dois conjuntos de placas defletoras (pinos 6 e 7 e

pinos 9 e 10) para a aplicação do campo elétrico alternado, que diverge o feixe de elétrons (Fig. 5).

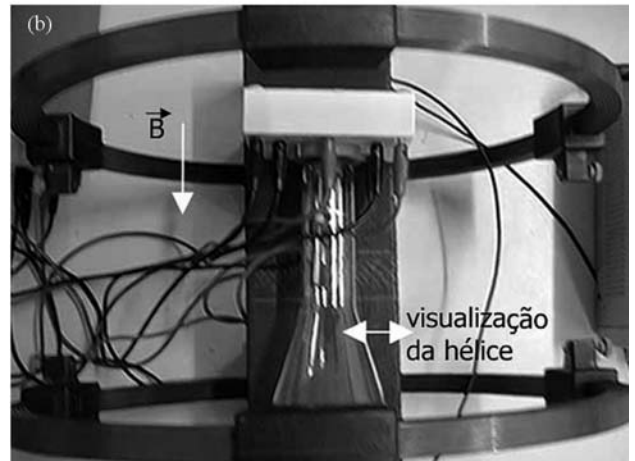
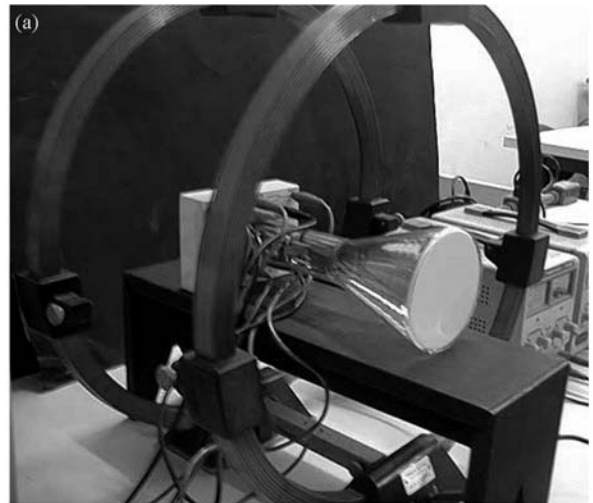


Figura 4 - Arranjo experimental adotado para a verificação da trajetória do feixe de elétrons no método de Busch. Esta montagem explora os aspectos fenomenológicos da interação entre o campo magnético e um feixe divergente de elétrons. O campo magnético é produzido a partir das espiras de Helmholtz e a ampola apresenta resíduo de gás no seu interior permitindo a sua visualização. Vista lateral 4(a) e vista superior 4(b).

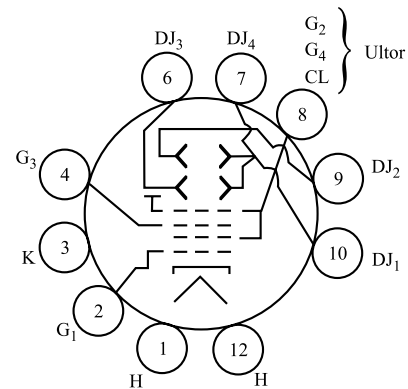


Figura 5 - Esquema de conexão dos pinos da válvula 5UP1 da RCA.

O circuito utilizado para a aceleração e foco do feixe está representado na Fig. 6.

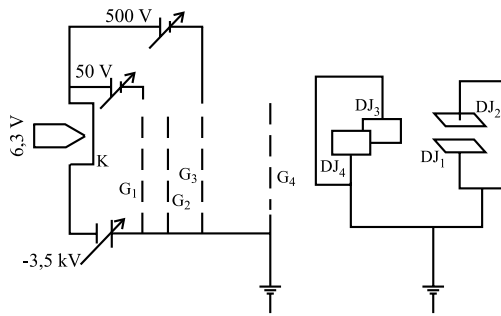


Figura 6 - Diagrama esquemático indicando as tensões aplicadas em cada uma das grades aceleradoras para a obtenção e foco do feixe de elétrons.

O solenóide, onde o tubo é inserido, foi construído a partir de um tubo de PVC de diâmetro 14,5 cm e comprimento igual a 50 cm (o que nos permitiu dentro de aproximações considerá-lo longo). Um enrolamento com 6436 espiras utilizando fio 24 nos garantiu estabelecer correntes elétricas abaixo do limite tolerado que corresponde a 270 mA.

As Figs. 7(a) e 7(b) mostram o arranjo experimental construído. Para a execução do experimento devemos alinhar o eixo da ampola na direção da componente horizontal do campo magnético terrestre (CMT) utilizando uma bússola como mostra a Fig. 7 (b). Desta forma podem existir duas condições para a convergência do feixe; uma com o campo gerado para a convergência com mesma direção e sentido da componente horizontal do CMT e outra de mesma direção e sentido oposto à componente horizontal do CMT. Como consequência os resultados obtidos para o valor de corrente elétrica são diferentes para cada uma destas condições estabelecidas no experimento: condição em que o sentido do campo magnético gerado pelo solenóide é coincidente com o sentido da componente horizontal do campo magnético da Terra e à condição em que o vetor campo magnético gerado pelo solenóide está em oposição à componente horizontal do campo magnético da Terra. Diante destes resultados, estabelecemos um método em que o valor da componente horizontal do campo magnético terrestre pode ser obtido. Para isso vamos considerar as relações matemáticas que envolvem as duas condições mencionadas para a obtenção do valor de e/m :

1ª- campo magnético do solenóide favorável (B_F) à componente horizontal do campo magnético terrestre (B_{HT}):

$$\frac{8\pi^2 V_{AK}}{(B_F + B_{HT})^2 s^2}. \quad (7)$$

2ª- campo magnético do solenóide desfavorável (B_C) à componente horizontal do campo magnético terrestre (B_{xT}):

$$\frac{8\pi^2 V_{AK}}{(B_C - B_{HT})^2 s^2}. \quad (8)$$

De qualquer modo, como temos um único valor de e/m , esperamos que a (Eq. 7) seja igual a (Eq. 8), assim temos

$$\frac{8\pi^2 V_{AK}}{(B_F + B_{HT})^2 s^2} = \frac{8\pi^2 V_{AK}}{(B_C - B_{HT})^2 s^2} \dots \rightarrow \frac{1}{B_F + B_{HT}} = \frac{1}{B_C - B_{HT}}, \quad (9)$$

e desta relação, verificamos que o valor da componente horizontal do campo magnético terrestre acaba sendo obtido através da seguinte expressão

$$B_{HT} = \frac{B_C - B_F}{2}. \quad (10)$$

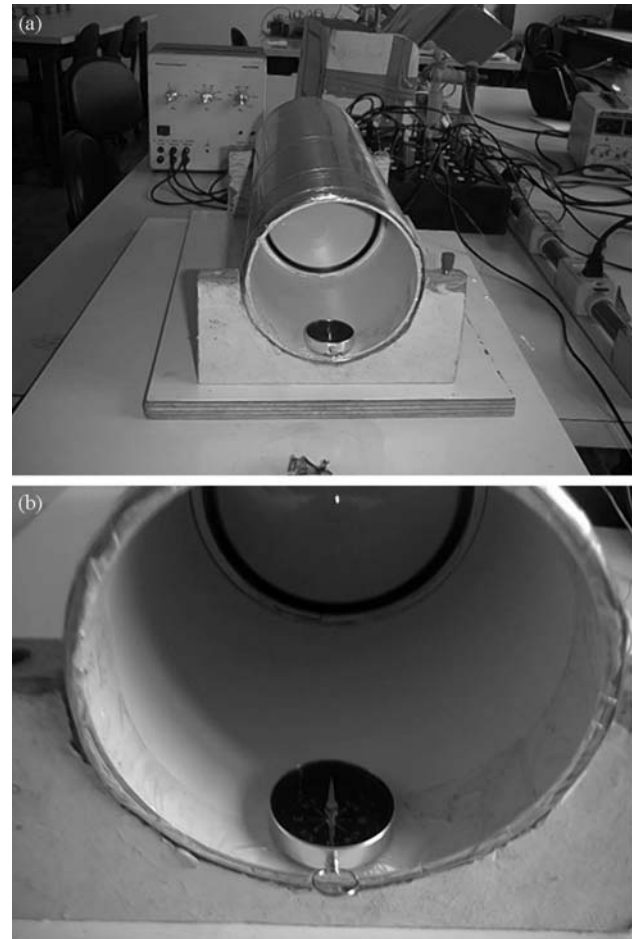


Figura 7 (a): Tubo de osciloscópio RCA modelo 5UP1 inserido no interior do solenóide construído para produzir a convergência do feixe. (b): A foto mostra também a disposição de uma bússola para ajuste da direção e sentido do campo do solenóide com relação à componente horizontal do CMT.

4. Resultados obtidos

Realizamos medidas utilizando-se os dois conjuntos de placas defletoras do tubo e as Tabelas 1 e 2 mostram os resultados para cada uma destas placas.

Tabela 1 - Resultados obtidos para o valor da componente horizontal do CMT (B_{HT}) quando se estabelece nas condições experimentais as placas associadas aos pinos 6 e 7 do tubo, com um valor médio de $21 \mu\text{T}$ e desvio padrão da amostra experimental igual a $4 \mu\text{T}$.

B_F méd (T) $\times 10^{-3}$	B_C méd (T) $\times 10^{-3}$	B_{HT} (μT)
2,620	2,653	16
2,685	2,717	16
2,766	2,815	24
2,847	2,879	16
2,944	2,992	24
3,041	3,073	16
3,106	3,154	24
3,203	3,251	24
3,267	3,316	24
3,332	3,364	16
3,413	3,462	24
3,478	3,526	24
3,542	3,591	24
3,623	3,672	24
3,704	3,753	24

Tabela 2 - Resultados obtidos para o valor da componente horizontal do CMT (B_{HT}) quando se estabelece nas condições experimentais as placas associadas aos pinos 9 e 10 do tubo, com um valor médio de $20 \mu\text{T}$ desvio padrão da amostra experimental igual a $4 \mu\text{T}$.

B_F méd (T) $\times 10^{-3}$	B_C méd (T) $\times 10^{-3}$	B_{HT} (μT)
2,976	3,009	16
3,073	3,122	24
3,187	3,219	16
3,284	3,332	24
3,364	3,397	16
3,462	3,510	24
3,559	3,607	24
3,639	3,672	16
3,753	3,785	16
3,801	3,850	24
3,866	3,898	16
3,963	4,012	24
4,028	4,060	16
4,044	4,092	24
4,125	4,173	24

5. Análise dos resultados

Além da dependência com a posição (latitude e longitude) a intensidade do campo magnético sofre variações ao longo do ano, podendo ser ocasionadas por causas internas (devido ao movimento das cargas elétricas da parte líquida do núcleo terrestre) ou externas (devido à atividade solar) ao globo terrestre. Deste modo cartas magnéticas são elaboradas e atualizadas a cada cinco anos no sentido de permitir a determinação de sua intensidade. Atualmente no Brasil estas cartas magnéticas são elaboradas pela equipe do Observatório

Nacional, coordenada pelo pesquisador Dr. Luiz Muniz Barreto. Medidas através de magnetômetro de prótons permitem determinar a intensidade, inclinação e declinação do campo magnético terrestre. Utilizando essas cartas magnéticas a equipe do observatório desenvolveu um programa, distribuído gratuitamente denominado "ELEMAG" que calcula o valor do CMT para todo território brasileiro.

O programa ELEMAG calcula os valores (e a variação anual) das componentes; Declinação (D), Inclinação (I) e Intensidade Total (F) e as componentes cartesianas; Norte (X), Leste (Y) e Vertical (Z) do campo geomagnético no território brasileiro. Trata-se de um modelo polinomial do quarto grau em latitude, longitude e segundo grau em tempo. O programa é interativo, necessitando como dados de entrada: a data e as coordenadas do local (latitude e longitude) onde se deseja conhecer o campo. A data deve ser fornecida em anos juntamente com uma fração decimal que corresponde a variação do CMT referente a esse período, conforme Tabela 3.

Tabela 3 - Fração do ano que deve ser fornecida, como dado de entrada para o programa ELEMAG. Assim para um experimento realizado em 2005 no dia 17 de agosto, por exemplo, a data deve ser 2005,7.

01 jan. a 19 jan	.0
20 jan a 24 fev.	.1
15 fev a 1 abr.	.2
2 abr. a 7 maio	.3
8 maio a 13 jun.	.4
14 jun. a 19 jul.	.5
20 jul. a 25 ago.	.6
16 ago. a 20 set.	.7
1 out. a 6 nov	.8
7 nov a 12 dez.	.9
13 dez. a 31 dez	1.

Sendo assim obtivemos os seguintes resultados para os valores de intensidade do CMT:

Programa Elmag.Exe
Local: Cidade São Paulo – Data 17/11/2005
Latitude: $23^{\circ}32'51''$
Longitude: $46^{\circ}38'10''$
Elementos do campo geomagnético no Brasil.

Entre com a Data	Latitude	Longitude
2005.9	-23.547	-46.636
Variação anual		
[X] 17887	-91.3	[nT]
[Y] -6481	-0.3	[nT]
[Z] -12966	-84.9	[nT]
[H] 19026	-85,8	[nT]
[F] 23024	-23.1	[nT]
[D] -19 55'	-5.9	[min]
[I] -34 16'	-18.5	[min]

Valor esperado do campo magnético terrestre B_T (μT) = $23,024 \pm 0,065$.

De acordo com o programa ELEMAG obtivemos para a data e local em que o experimento foi realizado o valor de $(19,03 \pm 0,09) \mu\text{T}$ para a componente horizontal do CMT.

A Tabela 4 mostra que os resultados obtidos incorporam o valor esperado para a componente horizontal do CMT esperado. O desvio experimental é inerente ao método e está associado às pequenas alterações na corrente elétrica de convergência para os dois casos, tendo em vista que a interferência da componente horizontal do CMT é da ordem de μT .

Tabela 4 - Resultados obtidos para o valor da componente horizontal do campo magnético terrestre para os dois conjuntos de placas defletoras.

Placas	Componente horizontal do CMT (μT)
Pinos 6 e 7	(21,0 \pm 4,0)
Pinos 9 e 10	(20,0 \pm 4,0)

6. Conclusão

Em primeiro lugar há de se reforçar que, embora o experimento proposto não tenha nos permitido atingir resultados de alta precisão, ele pode se tornar um recurso altamente satisfatório para a compreensão dos fenômenos envolvidos na interferência de campos magnéticos e elétricos na trajetória de elétrons representando uma boa estratégia para a aprendizagem significativa dos alunos de fenômenos do eletromagnetismo clássico. Muitas vezes tais fenômenos acabam sendo apenas desenvolvidos matematicamente devido à ausência de recursos que permitam aos professores valorizar os aspectos mais conceituais das leis físicas.

A proposta apresentada neste trabalho permite ao professor explorar os aspectos fenomenológicos envolvidos dando sustentabilidade para a construção de um modelo mental [4] que satisfaça a realidade física. Nesta proposta o aluno pode interagir com o experimento de modo a verificar a ação dos campos elétricos e magnéticos na trajetória do elétron até compreender como se dá a convergência e a divergência do feixe.

O aparato experimental para a determinação do campo magnético terrestre pode ser facilmente reproduzido, uma vez que aproveita tubos de osciloscópios muitas vezes em desuso nos laboratórios de Física.

Na atividade experimental proposta em sala de aula, pretende-se adotar uma postura flexível que possibilite discussões e reflexões acerca dos fenômenos estudados de tal modo que os alunos possam perceber de que maneira se dá a interferência do campo magnético terrestre nas medidas de corrente elétrica necessária para a convergência do feixe. A partir desta constatação os alunos poderão propor um método para a determinação da intensidade da componente horizontal do campo magnético terrestre.

Este trabalho foi desenvolvido, durante o ano de 2005 pela segunda autora em seu trabalho de conclusão de curso e, em 2006 está sendo implementado no curso de Estrutura da Matéria o que nos permitirá acompanhar através de avaliações sucessivas e comparativas, aos anos anteriores o grau de aproveitamento dos alunos.

Referências

- [1] C. Furió e J. Guisasola, *Ensenanza de Las Ciencias* **16**, 131 (1998).
- [2] I.M. Greca e M.A. Moreira, *Ensenanza de Las Ciencias* **16**, 289 (1998).
- [3] J. Guisasola e J.M. Almudí, *Ensenanza de Las Ciencias* **21**, 79 (2003).
- [4] M.A. Moreira e A.O. Pinto, *Rev. Bras. Ens. Fis.* **25**, 317 (2003).
- [5] S. Velazco e J. Salina, *Rev. Bras. Ens. Fis.* **23**, 308 (2001).
- [6] M.S.T. Araujo e M.L.V.S. Abib, *Rev. Bras. Ens. Fis.* **25**, 176 (2003).
- [7] J.B. Hoag e S.A. Korff, *Electron and Nuclear Physics* (D. Van Nostrand Company, Inc., New York, 1948), 3rd ed.
- [8] H. Busch, *Physikalische Zeitschrift* **23**, 438 (1922).
- [9] S. Mascarenhas, *Experiências Avançadas de Física* (Escola de Engenharia de S. Carlos, São Carlos, 1962), p. 14-19.