

# Estudando campos magnéticos e histerese com um anel de Rowland

(*Studying magnetic fields and hysteresis with a Rowland Ring*)

Everton Lüdke<sup>1</sup>

*Departamento de Física, Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, RS, Brasil*

Recebido em 5/11/2008; Revisado em 6/11/2009; Aceito em 1/12/2009; Publicado em 14/5/2010

Neste artigo, discuto uma implementação de um experimento simples destinado a laboratórios didáticos de eletromagnetismo como material de apoio para a investigação de campos magnéticos e histerese pelo aluno, empregando o clássico método do anel de Rowland. Um gerador de sinal produz  $H$  em um anel toroidal de material ferromagnético enquanto que o sinal captado por uma bobina sensora é amplificado e integrado, possibilitando que a curva de histerese do material seja visualizada na tela de um osciloscópio pelo método de figuras de Lissajous. Uma metodologia adequada para explorar o experimento em um grupo de alunos também é apresentada. **Palavras-chave:** campos magnéticos, histerese, anel de Rowland.

In this paper, I discuss a simple experimental setup to be used in academic teaching laboratories in electromagnetism to support the student investigation of magnetic fields and hysteresis. It employs the classical Rowland ring method. A signal generator produces  $H$  in a toroidal ring made of ferromagnetic material while the signal picked up by a sensing coil is amplified and integrated, allowing the material hysteresis curve to be seen in a oscilloscope screen by plotting Lissajous curves. A student group methodological approach to explore the experiment is also presented.

**Keywords:** magnetic fields, hysteresis, Rowland Ring.

## 1. Introdução

A determinação experimental das propriedades de  $\mathbf{B}$  e  $\mathbf{H}$  em laboratórios de física requer não somente experimentos de baixo custo e fácil construção, mas que forneça dados que permitam estudar os conceitos de eletromagnetismo de uma maneira eficiente.

Nesse artigo, apresento a análise de histerese com um anel desenvolvido originalmente por Henry A. Rowland (1848-1901) com um custo de construção muito baixo. O anel de Rowland consiste em um anel toroidal coberto uniformemente por uma bobina magnetizadora e uma bobina sensora concentrada em um pólo do anel [1], que mede o fluxo magnético produzido no interior do anel. A corrente elétrica que flui nas espiras do enrolamento primário define a intensidade do campo magnético  $\mathbf{B}$  no material. A bobina sensora de campo produz uma voltagem proporcional à taxa de variação de campo magnético no anel. Historicamente, medindo a voltagem integrada no tempo captada pela bobina de amostra com um galvanômetro balístico [2] e plotando os dados em função da corrente na bobina de magnetização, obtém-se a curva de histerese [3] para diversos materiais ferromagnéticos.

<sup>1</sup>E-mail: eludke@smail.ufsm.br.

## 2. Descrição do experimento

Uma argola de ferro com  $r_1 = 0,02837$  m e raio de seção reta de  $r = 0,00295$  m foi adquirida em uma loja de ferragens e sobre ela as espiras foram enroladas. Um carretel vazio de linha de costura foi enrolado com cerca de 12 m de fio de cobre esmaltado e o toróide foi enrolado passando-se o carretel através da sua abertura, em movimento circular de dentro para fora, construindo-se as espiras lado a lado até completar o perímetro da argola com  $N_1 = 560$  espiras próximas de fio esmaltado de cobre 28 AWG ( $\phi = 0,320$  mm). A bobina sensora foi feita com  $N_2 = 70$  espiras de fio 32 AWG ( $\phi = 0,203$  mm) enroladas sobre um trecho da argola de 1,2 cm de extensão, conforme a Fig. 1.

Se o toróide for fino o suficiente em comparação com o seu raio, o campo magnético no seu interior é da mesma ordem que o campo de um solenóide linear com o mesmo número de espiras por onde circula a mesma corrente elétrica. Com essa densidade de espiras no enrolamento de campo de  $n \sim 1492$  m<sup>-1</sup> e uma corrente instantânea de 100 mA, espera-se uma indução magnética no interior do material na ordem de  $B = \mu_r \mu_0 n I_0 \sim 940$  mT, adotando-se ( $\mu_r \sim 5000$ ) para o ferro.

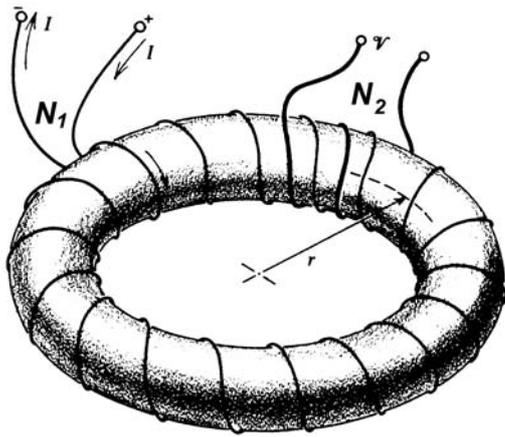


Figura 1 - Ilustração dos elementos de projeto do anel de Rowland (Adaptado de [1]), mostrando detalhes práticos do enrolamento das bobinas. O anel é fino, possuindo raio de simetria  $r$  e diâmetro  $2R$ .

O campo magnético no interior do anel de Rowland fino de raio  $R \sim r_1 \sim r_2$  e área de seção transversa  $A$ , com uma corrente alternada  $I = I_m \cos(\omega t)$  circulante no enrolamento primário com  $N_1$  espiras de fio de cobre esmaltado é dada por [1]

$$H = \left( \frac{N_1 I_o}{2\pi R} \right) \cos(\omega t). \quad (1)$$

Uma espira de prova com  $N_2$  espiras próximas é enrolada em uma seção do anel onde se desenvolve uma força eletromotriz induzida, dada pela variação do fluxo da indução magnética  $B$  no seu interior  $V_e = N_2 d\phi/dt = N_2 A dB/dt$ . Acoplando o sinal da espira de prova à entrada de um amplificador operacional configurado como um integrador de Miller de ganho  $G$  e constante de integração  $\tau = RC$ , temos que

$$V_b = -\frac{1}{RC} \int_0^\tau V_e(t) dt = -\left( \frac{N_b A}{RC} \right) B.$$

Logo a voltagem de saída do amplificador integrador é proporcional ao valor médio do campo magnético  $B$  dentro do intervalo de integração e a aplicação dessas equações possibilita a calibração da escala dos desenhos em papel milimetrado em unidades de  $\mathbf{B}$  e  $\mathbf{H}$ .

O gráfico da histerese é determinado plotando  $V$  no eixo da abscissa e  $I_0$  no eixo das ordenadas, tendo sido empregado um osciloscópio analógico Goldstar OS9040D em modo de figura de Lissajous com a entrada de deflexão  $x$  conectada ao ponto  $V_x$  do circuito da Fig. 2 e a deflexão vertical conectada ao ponto  $V_y$ . Aumentando a intensidade do feixe, os alunos podem superpor uma folha de papel milimetrado e traçar as curvas de histerese diretamente com lápis preto.

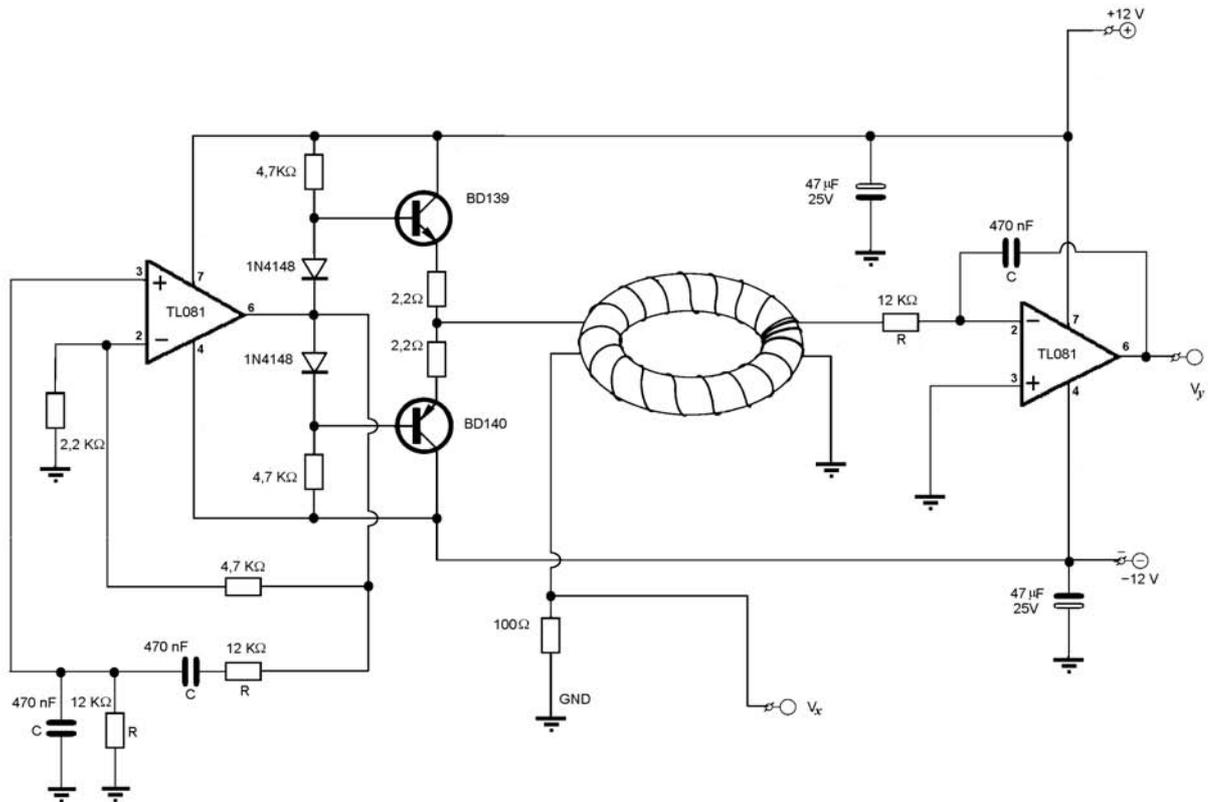


Figura 2 - Esquema eletrônico do experimento onde a frequência de varredura é determinada pelos componentes  $R$  e  $C$ . Um sinal alternado de 10 V de amplitude e frequência  $f = (2\pi RC)^{-1} = 28$  Hz com  $R = 1,2 \times 10^4 \Omega$  e  $C = 4,7 \times 10^{-7}$  F possibilita uma boa visualização.

### 3. Análise do experimento

A Fig. 3 mostra a geometria padrão da curva de histerese desenhada pelos alunos em papel milimetrado a partir das figuras de Lissajous do osciloscópio. As escalas podem ser estimadas pelos alunos, calculando os valores esperados de  $B$  e  $H$  para os valores da amplitude da corrente elétrica que pode ser obtida pela medida da diferença de potencial nos terminais do resistor de  $100 \Omega$  em série com o enrolamento primário do anel ( $I = V_x/100 \Omega$ ), com o auxílio das Eqs. (1) e (2), sabendo-se que  $V_y = V_b$ .

À medida que a força magnetizadora  $H$  varia de 0 a  $+H$  e desse ponto para  $-H$ , o valor de  $B$  segue a curva  $abcdefgb$ , de modo que o trecho  $ab$  é a curva ordinária de magnetização que determina a permeabilidade magnética. A porção  $bcdefgb$  é o laço simétrico de histerese propriamente dito, que pode ser analisado graficamente pelo aluno como a diferença de alargamento entre os ramos superiores e inferiores.

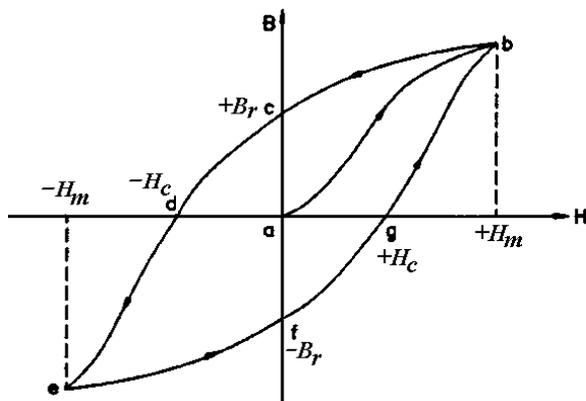


Figura 3 - Curva de histerese produzida na tela do tubo de raios catódicos.

Para o processamento dos dados, os alunos calculam os valores de  $H$  e  $B$  a partir das medidas dos potenciais  $V_1$  e  $V_2$  empregando fórmulas-padrão para o transformador toroidal encontradas em livros-texto de eletromagnetismo. No regime linear identificado na curva, eles podem determinar o valor da permeabilidade magnética do ferro com base nos valores de  $H$  e  $B$  obtidos e comparar com o valor aceito de  $6,28 \times 10^{-3} \text{ H m}^{-1}$ , e analisar os gráficos de  $B$  vs.  $H$  e  $\mu$  vs.  $H$  a partir dos dados coletados a fim de obter a coercividade  $H_c$  e a retentividade do material [5], onde os valores  $-H_c$  ocorre no ponto  $d$  e  $+H_c$  no ponto  $g$  conforme a Fig. 3.

Para a argola de ferro, os alunos facilmente concluem que os valores de coercividades são iguais, tanto na porção ascendente quanto na porção descendente da curva. Entretanto, deve-se explicar ao aluno que sólidos antiferromagnéticos [4] possuem valores de coercividades distintos para campos crescentes e decrescentes, como resultado de efeito de desvio por anisotropia

(“exchange bias”, [5, 6]), ocorrendo principalmente em filmes de materiais magnéticos e antiferromagnéticos.

A análise da curva de histerese na tela do osciloscópio permite que os alunos explorem o significado físico da retentividade de materiais ferromagnéticos que é resultante da presença de domínios magnéticos no material e que a re-orientação da  $\mathbf{M}$  ocorre às custas de troca de energia com o meio através do oscilador que gera o campo.

Os alunos também foram capazes de determinar a remanência magnética a partir de  $B_r$  interpolada nos pontos  $c$  e  $f$  na Fig. 3, concluindo que a coercividade é a medida do campo magnético reverso necessário para zerar a magnetização após o magneto estar saturado, enquanto que a remanência é a medida da magnetização remanescente quando o campo magnético aplicado possui um valor instantâneo nulo, sendo quantidades importantes para a produção de magnetos permanentes de boa qualidade.

A área da curva de histerese pode ser obtida apenas depois que a escala em papel milimetrado estiver calibrada, por aproximação gráfica. Essa quantidade é equivalente ao trabalho elétrico  $W_b$  necessário para promover a magnetização do anel e a reorientação completa dos domínios magnéticos, sendo expressa por [1]

$$W_m = -\mu_0 \oint M dH. \quad (2)$$

Como parte das atividades, os alunos percebem facilmente que o formato característico da curva é dado pela diferença das permeabilidades relativas  $\Delta\mu = \mu_0 |\mu_{r,d} - \mu_{r,m}|$  nos percursos de magnetização e desmagnetização, que se relaciona com a taxa de variação da densidade de fluxo magnético  $\mathbf{B}$  com a intensidade da força magnetizadora dada por  $\Delta\mu = \partial B/\partial H$ , mostrando que a permeabilidade magnética é uma quantidade física que só faz sentido de ser definida univocamente para materiais nos quais a curva de histerese for estreita.

### 4. Conclusões

O método prático para análise de histerese descrito nesse artigo possui um ótimo potencial didático-pedagógico para ensino das bases teóricas e experimentais do eletromagnetismo, a um custo extremamente baixo e que permite aos alunos familiarizarem-se com as definições de  $\mathbf{B}$  e  $\mathbf{H}$  e estudar a coercividade e a retentividade magnéticas de ferromagnetos.

O experimento também possibilita ao aluno aprender que relações lineares tipo  $\mathbf{M} = \chi_m \mathbf{H}$  só existem em materiais diamagnéticos e paramagnéticos e que não existem relações unívocas entre a magnetização  $\mathbf{M}$  e o campo magnetizante  $\mathbf{H}$  em ferromagnetos.

## Referências

- [1] P. Lorrain, D.R. Corson and F. Lorrain, *Electromagnetic Fields and Waves* (W.H. Freeman and Company, New York, 1988), 3rd ed., p. 375-376 and p. 422-425.
- [2] O.M. Steward, Phys. Rev.(Series I) **16**, 158 (1903).
- [3] A.E. Benfield, Am. Journ. Physics **11**, 43 (1943).
- [4] T. Gray, Science **17**, 533 (1995).
- [5] J.D. Livingston, J. Appl. Phys. **52**, 2541 (1981).
- [6] M. Kiwi, J. Magn. Magn. Mater. **234**, 584 (2001).