

4

Memórias magnéticas A histerese ferromagnética

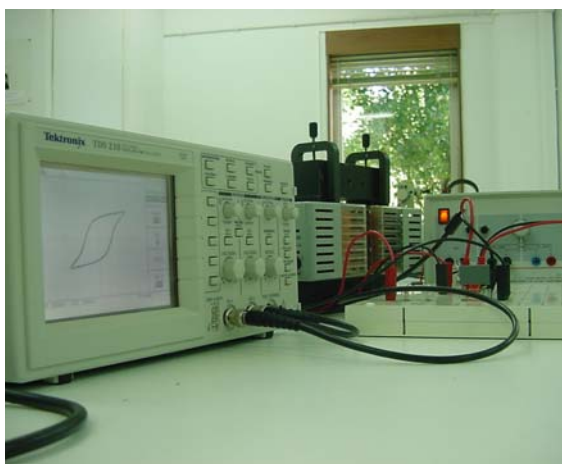
- *Compreender a relação entre campo magnético, campo magnetizante e magnetização*
- *Ilustrar as manifestações do magnetismo na matéria com a demonstração da magnetização de materiais ferromagnéticos.*
- *Exemplificar as aplicações da histerese ferromagnética*
- *Compreender o princípio de funcionamento da gravação em suporte magnético*

Introdução

As memórias de suporte magnético permitem que um circuito eléctrico guarde informação sem o consumo permanente de energia. As suas aplicações começaram com as gravações de som e agora são amplamente usadas para a gravação de imagem ou de dados por computador. O funcionamento dos discos rígidos e das *disquetes* baseia-se no mesmo princípio— a histerese ferromagnética.

Um fenómeno conhecido que está relacionando e que importa lembrar, acontece quando encostamos um pedaço de ferro a um íman (ou magnete permanente). A ponta desse material de ferro comporta-se como se fosse o próprio íman atraindo outros pedaços de ferro. Podemos reparar que, depois de se retirar o íman, o pedaço de ferro fica levemente magnetizado. Verifica-se depois que, limalha de ferro, pequenos parafusos ou pregos, são atraídos pela ponta magnetizada.

Se aproximássemos uma bússola da ponta do pedaço de ferro, confirmaríamos a presença de um



campo magnético que desviaria o ponteiro da bússola. Mais, conforme tivéssemos aproximado um pólo do magnete ou o pólo oposto, a bússola seria desviada indicando o pólo Sul ou o pólo Norte (do campo magnético, não da Terra). Este fenómeno confirma que a ponta magnetizada, memorizou a informação de qual o pólo que a magnetizou (vide Fig. 1).

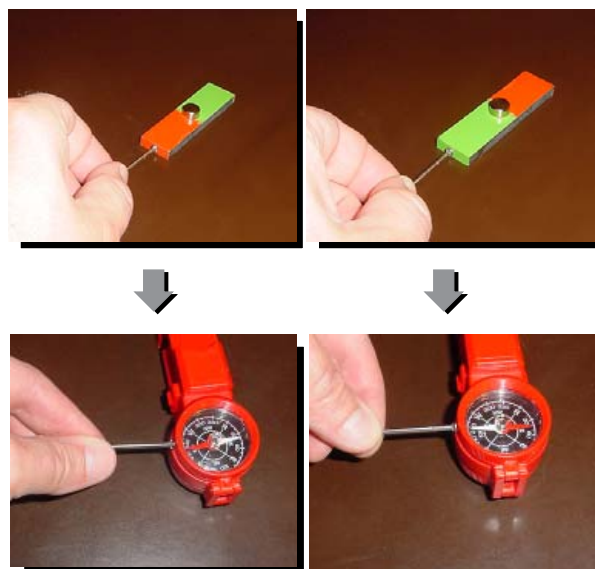


Figura 1. Efeito de memória de um material ferromagnético. Um prego é encostado ao pólo Norte do íman e depois ao pólo Sul. A deflexão da bússola quando o prego se aproxima, indica que o material ficou magnetizado permanentemente. A bússola indica o Norte (ponteiro branco) ou o Sul consoante a cabeça do prego tiver sido encostada a um lado do íman ou ao outro.

Qualitativamente esta observação poderia ser resumida da seguinte forma:

- A magnetização do pedaço de ferro é elevada quando este está encostado ao íman.
- Após o afastamento do íman o ferro fica levemente magnetizado.
- A orientação desta magnetização permanente, depende do pólo do íman que inicialmente foi aproximado podendo ser invertida com a reaproximação ao pólo oposto do íman.

O facto de a magnetização num sentido não ser

anulada após a magnetização no sentido oposto, indica que a magnetização do material ‘seguiu caminhos diferentes’. O termo histerese descreve este fenómeno.

O magnetismo na matéria

O comportamento de um material na presença de um campo magnético pode ser classificado em 3 categorias:

1. Materiais ferromagnéticos, por exemplo o ferro, o níquel ou as suas ligas; este tipo de materiais são fortemente atraídos quando sujeitos a campos magnéticos.
2. Materiais paramagnéticos, por exemplo o alumínio; estes materiais são atraídos muito fracamente por um íman.
3. Materiais diamagnéticos, por exemplo o bismuto ou a água; estes materiais são repelidos por um íman.

O ferromagnetismo é claramente, entre estas 3 categorias, a que produz um efeito mais intenso, e por isso, o mais conhecido.

Quando um material está sujeito a um campo magnético exterior, o campo \vec{B} dentro do material é dado pela seguinte relação:

$$\vec{B} = \mu_o(\vec{M} + \vec{H}) \quad (\text{Eq. 1})$$

O vector \vec{M} é designado de magnetização da matéria e o vector \vec{H} por campo magnetizante (alguns autores usam designações diferentes para estas grandezas). A constante μ_o é a permeabilidade magnética do vácuo. A Eq. 1 descreve o campo magnético dentro material como o resultado de 2 contribuições— a contribuição do próprio material descrito por $\mu_o\vec{M}$ e a contribuição do campo exterior $\mu_o\vec{H}$.

No entanto, a magnetização de um material não é constante, mas depende da intensidade do campo magnetizante exterior, obedecendo à seguinte relação:

$$\vec{M} = \chi_m \vec{H} \quad (\text{Eq. 2})$$

onde a constante de proporcionalidade χ_m é designada por susceptibilidade magnética. Assim a Eq. 1 pode ser reescrita do seguinte modo:

$$\vec{B} = \mu_0(1 + \chi_m) \vec{H} \quad (\text{Eq. 3})$$

No entanto, esta equação é mais frequentemente escrita na forma

$$\vec{B} = \mu_0 \mu_r \vec{H} \quad (\text{Eq. 4})$$

onde

$$\mu_r = 1 + \chi_m \quad (\text{Eq. 5})$$

A constante μ_r é designada por permeabilidade (magnética) relativa e descreve-nos quantas vezes o campo magnético dentro de um material é maior do que no vácuo.

Tabela 1. Grandezas e unidades

Grandeza	Unidades (SI, outras)
Campo magnético, \vec{B}	tesla (T), gauss (1Gs=10 ⁻⁴ T)
Campo magnetizante, \vec{H}	A.m ⁻¹ , oersted (1 Oe=1000/4π A.m ⁻¹)
Magnetização (da matéria), \vec{M}	A.m ⁻¹
Permeabilidade magnética relativa, μ_r	(adimensional)
Susceptibilidade magnética, χ_m	(adimensional)

A susceptibilidade magnética de um material χ_m pode ser ter valores muito diferentes consoante o tipo de material. Assim, temos:

- $\chi_m \gg 1$ para materiais ferromagnéticos,
- $\chi_m > 0$ para materiais paramagnéticos,
- $\chi_m < 0$ para materiais diamagnéticos.

A descrição microscópica desta variação, é feita com base na mecânica quântica e está fora do âmbito do presente trabalho.

O ferromagnetismo e a histerese magnética

Nos materiais ferromagnéticos a permeabilidade

relativa μ_r (e também χ_m) pode ter valores típicos da ordem de 5000. Este valor indica que o campo dentro do material é muito maior do que o campo magnetizante exterior.

Considere-se o enrolamento representado na Fig. 2 com N espiras e que é percorrido por uma corrente I . O módulo do campo magnetizante \vec{H} é dado por

$$H = \frac{N}{l} I = nI \quad (\text{Eq. 6})$$

sendo l o comprimento do enrolamento e n o número de espiras por metro. O sentido de \vec{H} é dado pela regra da mão direita (sentido do polegar esticado quando I tem o sentido dos dedos dobrados).

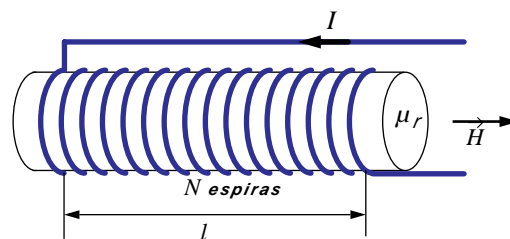


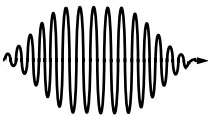
Figura 2. Magnetização de um material ferromagnético por um campo magnético variável produzido por um enrolamento.

No meio deste enrolamento introduz-se um material ferromagnético. Se variarmos a corrente I (ou seja, variarmos H) e medirmos o campo \vec{B} dentro do material, obteremos uma curva semelhante à representada na Fig. 3 a).

Tabela 2. Algumas relações e constantes importantes

Campo magnético dentro de um material ferromagnético	$\vec{B} = \mu_0(\vec{M} + \vec{H})$
Magnetização e campo magnetizante	$\vec{M} = \chi_m \vec{H}$
Permeabilidade relativa e susceptibilidade magnética	$\mu_r = 1 + \chi_m$
Campo magnetizante	$H = \frac{N}{l} I = nI$
Permeabilidade magnética	$\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \text{ W.A}^{-1}.\text{M}^{-1}$

Inicialmente, o campo \vec{B} cresce consideravel-



mente até atingir um máximo ou ocorrer saturação. Quando se reduz a corrente o campo magnético \vec{B} não tem a mesma variação. Na Fig. 3 b) está representado a continuação do processo. Quando $H=0$ o campo \vec{B} não é nulo, indicando que o *material permaneceu magnetizado, mesmo na ausência de campo magnetizante (efeito de memória)*.

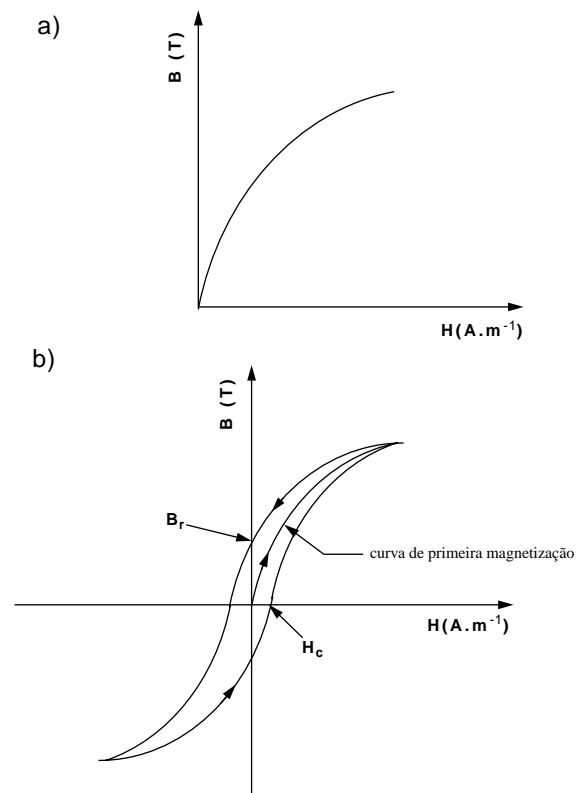


Figura 3. a) Curva típica da primeira magnetização. b) Histerese típica da magnetização de um aço macio.

Ao valor do campo \vec{B} que permanece designa-se por campo remanescente, B_r . Para anular este campo é necessário inverter a corrente I (ou seja, o campo \vec{H}) até um valor $-H_c$ (c de coercivo). A continuação do aumento de I neste sentido, produz uma magnetização permanente $-B_r$ quando a corrente é novamente anulada.

A repetição do processo de magnetização, num sentido e no outro segue então 2 caminhos diferentes, conforme a magnetização cresce ou decresce. É esta diferença de caminhos que se

designa por histerese. A aproximação de uma bússola de uma das pontas do material indicaria em que sentido a magnetização tinha sido realizada.

Embora não seja necessário energia para manter a magnetização remanescente, é necessária para a produzir. Esta energia dissipada num ciclo de histerese completo é dada aproximadamente pela relação:

$$W = V \int_B \vec{H} \cdot d\vec{B} \quad (\text{Eq. 7})$$

sendo V o volume do material ferromagnético. O integral pode ser calculado geometricamente, visto que corresponde à área do ciclo de histerese conforme representado na Fig. 3 b).

Verificação experimental

Para verificarmos experimentalmente a histerese ferromagnética, iremos usar o núcleo de um transformador com dois enrolamentos (vide Fig. 4). Num enrolamento (o primário) iremos fazer passar uma corrente que possamos variar a sua intensidade. A corrente será medida através de uma resistência de baixo valor, colocada em série com o enrolamento. A medida desta corrente é directamente proporcional à intensidade do campo magnetizante \vec{H} .

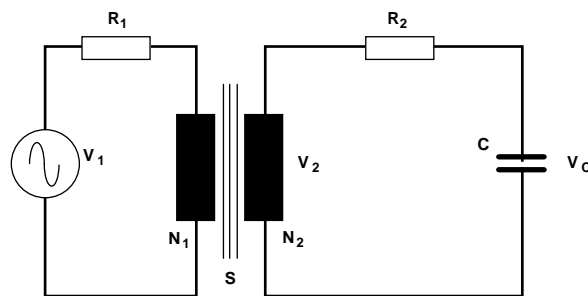


Figura 4. Esquema eléctrico da montagem para verificação experimental do ciclo de histerese. Os rectângulos negros representam os enrolamentos e os traços verticais o núcleo do transformador.

A medida da intensidade do campo \vec{B} é realizada com o recurso a um segundo enrolamento (secundário). A tensão V_2 , neste enrolamento com N_2

espiras, é descrita pela Lei de Faraday (vidé trabalho prático nº 5) que pode ser expressa por:

$$V_2 = -N_2 S \frac{dB}{dt} \quad (\text{Eq. 8})$$

onde S é a secção transversal do núcleo do transformador e B o módulo do campo magnético. Com base nesta relação, B pode ser calculado a partir do integral (não levando em conta o sinal):

$$B = \frac{1}{N_2 S} \int_t V_2 dt \quad (\text{Eq. 9})$$

Os componentes R_2 e C representados na Fig. 4 estão ligados numa montagem que funciona como um integrador de tensão. Quando $V_C \ll V_2$

$$V_C = \frac{1}{R_2 C} \int_t V_2 dt \quad (\text{Eq. 10})$$

Deste modo, B é dado por:

$$B = \frac{R_2 C V_C}{N_2 S} \quad (\text{Eq. 11})$$

A medição da tensão V_C aos terminais do condensador é proporcional a B através da constante que pode ser calculada $\frac{R_2 C}{N_2 S}$.

O uso de uma tensão V_1 alternada, permite a repetição do ciclo de histerese com uma frequência f igual à frequência de V_1 e a sua fácil visualização num osciloscópio em modo XY. Com esta montagem, não é possível observar a curva da primeira magnetização.

Equipamento

É necessário o seguinte equipamento para a realização da montagem experimental:

- 1 núcleo em U de transformador, desmontável
- 1 bobine com 50 espiras (com ligações de 10 em 10 espiras)
- 1 bobine com 250 espiras
- 1 osciloscópio digital (com saída para impressora)
- 1 impressora

- 1 gerador de tensão alternada (50 Hz) com amplitude variável e corrente até 6A.
- 1 placa de montagem
- 1 condensador de 10 μF
- 1 resistência de 100 k Ω
- 1 resistência de 0,1 Ω / 3W
- 1 cabo BNC/BNB
- 1 Tê BNC (MFF)
- 2 cabos BNC / bananas

A montagem está ilustrada na Fig. 5. Alguns dos equipamentos indicados podem ser substituídos por outros com especificações equivalentes.

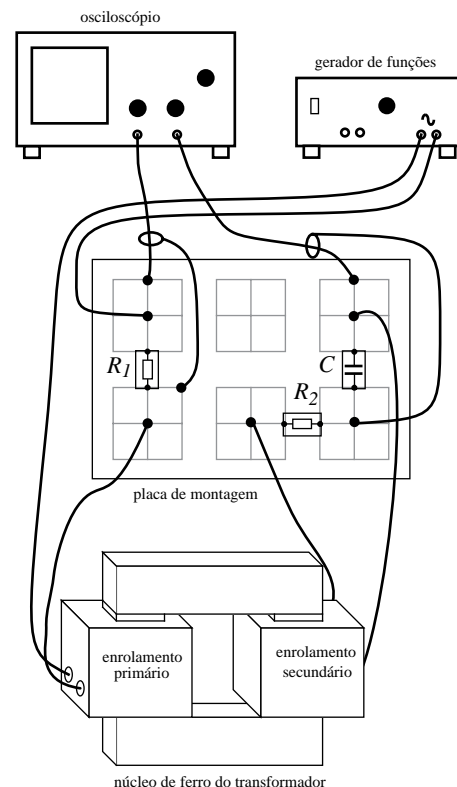


Figura 5. Montagem experimental.

Montagem experimental

1. Identifique as unidades e o equipamento necessário e os pontos de ligação dos cabos.
2. Meça e registre a secção e o perímetro médio do núcleo do transformador. Obtenha também as

medidas necessárias para calcular o volume do núcleo.

- Monte o transformador com os enrolamentos (bobinas) indicados. Use o enrolamento com 50 espiras para primário e o de 250 espiras como secundário.
- Estabeleça as ligações conforme indicadas na Fig. 5. Use a saída da fonte de tensão com o símbolo \sim .
- Ajuste a tensão da fonte de tensão alternada para o mínimo. Escolha o modo XY no osciloscópio. Certifique-se de que canal X corresponde à corrente do enrolamento primário e o canal Y à tensão do condensador do integrador.
- Ligue a fonte de tensão. Aumente um pouco a tensão ($\approx 20\%$ do máximo). Ajuste as escalas do osciloscópio e tente visualizar o ciclo de histerese. Se aparecer simétrico ao representado na Fig. 3 b) troque as ligações banana do canal correspondente.

Medidas a obter

- Ajuste a tensão para o máximo. Altere as escalas do osciloscópio, se necessário.
- Centre o ciclo obtido na origem dos eixos.
- Ligue a impressora e imprima a imagem do osciloscópio.
- Repita os pontos 1 a 3 com uma tensão um pouco menor ($\approx 80\%$ do máximo).
- Desligue a fonte.
- Calcule o valor de cada divisão grande para o eixo X (H) usando a Eq. 6 e a lei de Ohm.
- Calcule o valor de cada divisão grande do eixo Y (B) usando a Eq. 11 (compare com o exemplo da Fig. 6).
- Meça a área de cada um dos dois ciclos obtidos e calcule a energia dissipada por ciclo usando a Eq. 7. Calcule também a potência dissipada, ou seja, a energia dissipada num segundo.

Exemplo de medida

Na Fig. 6 estão representados os dois ciclos de histerese obtidos. Usou-se o enrolamento primário com $N_1=30$ espiras.

As escalas representadas são as correspondentes às divisões observadas no osciloscópio. A escala para X foi calculada do seguinte modo:

$$1div = 500 \text{ mV} = R_1 I_1$$

$$I_1(1div) = \frac{500 \text{ mV}}{0,1\Omega} = 5 \text{ A}$$

$$H(1div) = \frac{N_1 \times I_1(1div)}{l} = \frac{30 \times 5}{0,48} = 312,5 \text{ A.m}^{-1}$$

A escala Y foi calculada assim:

$$1div = 200 \text{ mV} = V_C(1div)$$

$$B(1div) = \frac{R_2 C V_C(1div)}{N_2 S} = \frac{10^5 \times 10^{-5} \times 0,2}{250 \times 0,00152} = 0,526 \text{ T}$$

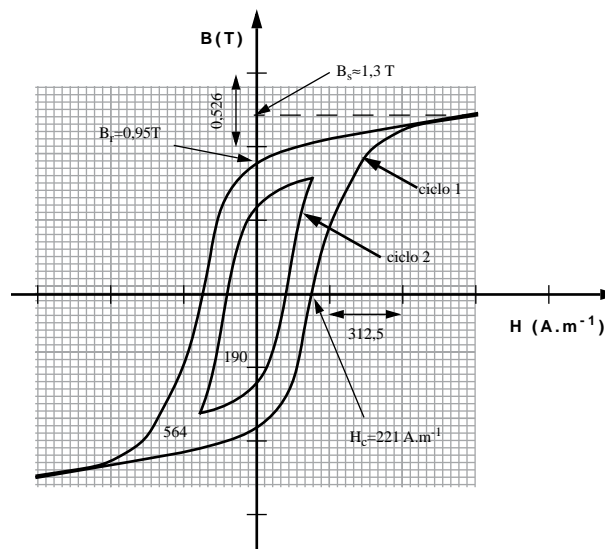
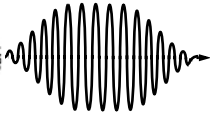


Figura 6. Ciclos de histerese obtidos do núcleo do transformador. No ciclo 1 a saturação é mais evidente. Os valores obtidos no ciclo 1 para B_r e H_c estão indicados. Os números dentro de cada ciclo correspondem à sua área, ou seja, ao número de pequenos quadros.



A curva de histerese tem a sua inclinação máxima quando cruza o eixo H . Depois a curva tem uma variação mais lenta até que atinge a saturação, zona onde o declive é menor e quase constante. O núcleo do transformador permanece magnetizado quando o campo $H=0$. O campo remanescente B_r é aproximadamente de 0,95 T. Este campo só é anulado quando o núcleo é sujeito a um campo coercivo $H_c = -221 \text{ A}\cdot\text{m}^{-1}$.

Para calcular a energia gasta em cada ciclo foi necessário resolver geometricamente a Eq. 7. O integral desta equação é igual à área de cada ciclo.

Estas áreas foram obtidas por contagem dos pequenos quadrados (cujos lados são décimas das divisões de cada escala) que estão no seu interior. Obtiveram-se 564 e 190 respectivamente para o ciclo 1 e 2.

Assim, obtemos para a energia dissipada em cada ciclo de histerese:

Ciclo 1

$$\int_B \vec{H} \cdot d\vec{B} = 5,64 \times 312,5 \times 0,526 = 927 \text{ A}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{T}$$

$$W = V \int_B \vec{H} \cdot d\vec{B} = 7,296 \times 10^{-4} \times 927 = 0,68 \text{ J}$$

($V = \text{volume do núcleo}$)

Ciclo 2

$$\int_B \vec{H} \cdot d\vec{B} = 1,90 \times 312,5 \times 0,526 = 312 \text{ A}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{T}$$

$$W = V \int_B \vec{H} \cdot d\vec{B} = 7,296 \times 10^{-4} \times 312 = 0,23 \text{ J}$$

A potência é obtida a partir do número de ciclos por segundo. Sendo a frequência da corrente 50Hz (que é a mesma frequência do campo magnetizante H) a potência é dada por:

Ciclo 1

$$P = f \times W = 50 \times 0,68 = 34 \text{ W}$$

Ciclo 2

$$P = 50 \times 0,23 = 11,5 \text{ W}$$



4

Memórias magnéticas— Relatório

Nomes:

1-

2-

3-

Data

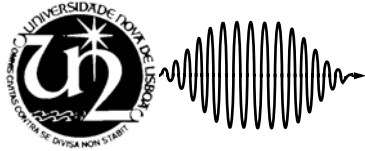
Licenciatura

Grupo

(Não use este relatório como rascunho)

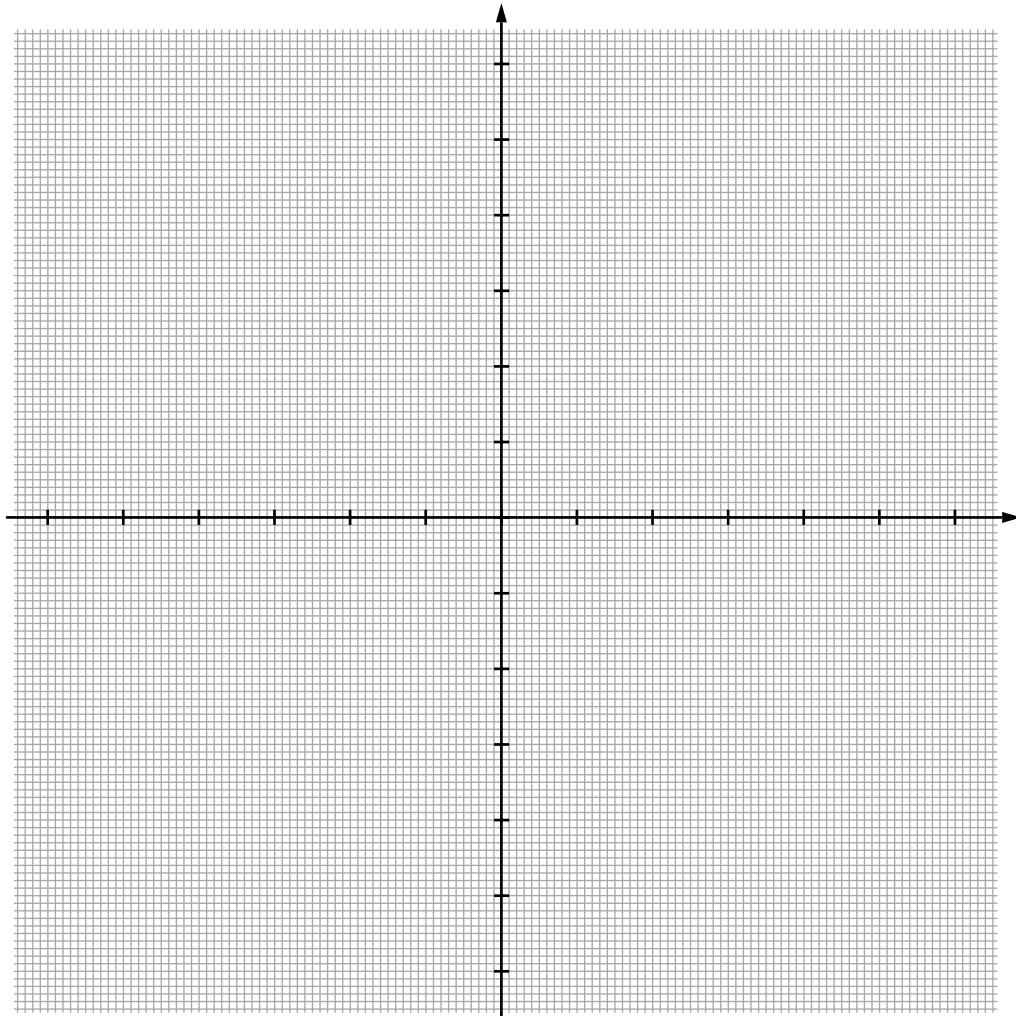
Registo dos dados

Registe o que achar necessário para a correcta identificação da sua experiência (poderão, eventualmente, ser usadas condições diferentes das indicados). Indique as dimensões do núcleo do transformador, o seu volume, a sua secção e o seu perímetro médio.

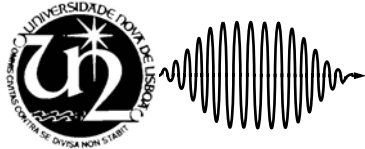


Representação gráfica

Por decalque ou outro processo, passe os ciclos de histerese obtidos para as seguintes grelhas. Identifique correctamente cada gráfico e os respectivos os eixos. Indique o valor de cada divisão.



Valores dos campos remanescentes, coercivos.



Cálculo da energia e da potência.

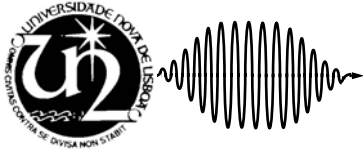
Discussão

Comente os resultados que obteve. Como se compararam com os resultados representados na Fig. 6.

Explique como se poderia produzir um magnete permanente. O material do núcleo do transformador daria um bom magnete permanente? Porquê?

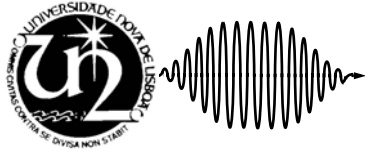
Num dos ciclos de histerese obtidos, indique em que posições o material do núcleo pode funcionar como memória. Quantos estados diferentes existem?

Proponha um método simples de ‘memorizar’ uma sequência de 8 bits. Como poderia ser lida essa informação.



Conclusão

Faça uma avaliação objectiva do trabalho. Refira quais dos objectivos propostos foram alcançados. Proponha eventuais alterações.



(Use se necessário apenas para relatório)