

# XXIX Olimpíada Internacional de Física

Reykjavík, Islândia

## Parte Experimental

Segunda-feira, 6 de Julho de 1998

**Duração: 5 H**

### Lê isto primeiro:

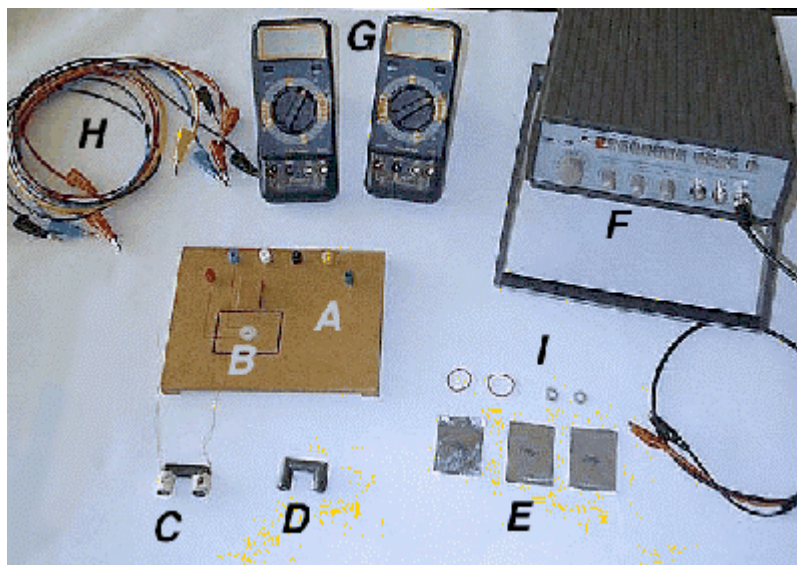
1. Utiliza apenas a esferográfica que te foi dada.
2. Usa um só lado das folhas de respostas.
3. Usa o *mínimo texto possível* nas tuas respostas; exprime-te de preferência com equações, números e desenhos. **Sumaria os teus resultados nas folhas de respostas.**
4. Indica em todas as folhas o teu nome, o número de estudante, o número da página e o número total de páginas.
5. No final no exame põe por ordem as folhas de respostas e os gráficos por ordem e deixa tudo em cima da tua mesa.
6. É permitido o uso de calculadora.

**Este conjunto de enunciados contém 9 páginas (com esta incluída).**

Exame preparado em:  
Universidade da Islândia, Departamento de Física

## Equipamento

- A Suporte com 6 tomadas para fichas-banana
- B Bobina detectora embutida no suporte
- C Núcleo de ferrite em U com duas bobinas com as marcas “A” e “B”
- D Núcleo de ferrite em forma de U sem bobinas
- E Folhas de alumínio com as espessuras de 25  $\mu\text{m}$ , 50  $\mu\text{m}$  e 100  $\mu\text{m}$
- F Gerador de sinal já com o cabo de saída do sinal
- G Dois multímetros
- H Seis fios com fichas-banana
- I Dois elásticos e dois pedaços de papel



## Multímetros

Os multímetros de que dispões para esta experiência serão utilizados para medir diferenças de potencial alternadas (AC), correntes alternadas (AC), frequências e resistências. Em todos estes casos um dos terminais a ser usado é o que está marcado com **COM**. Para as medidas de diferença de potencial, frequência e resistência o outro terminal a utilizar é o vermelho que está marcado **V- $\Omega$** . Para medires a intensidade da corrente deverás usar o outro terminal que é amarelo e que está marcado **mA**. Com o botão central terás de seleccionar a função apropriada à medida (V~ para diferenças de potencial AC, A~ para correntes AC, Hz para frequências e  $\Omega$  para resistências, servindo ainda este botão para seleccionar a escala apropriada. Para os modos AC a precisão das medidas é  $\pm (4\% \text{ da leitura} + 10 \text{ unidades do último dígito})$ ; por exemplo, o erro associado à média 2,173 é  $0,04 \times 2,173 + 0,010 = 0,097$ . **Para obteres valores precisos das medidas da intensidade da corrente é necessário mudar a escala sempre que o valor lido for inferior a 10% do máximo da escala.** Os multímetros desligar-se-ão automaticamente se durante 50 minutos não se mexer em nenhum botão.

### ***Gerador de sinal***

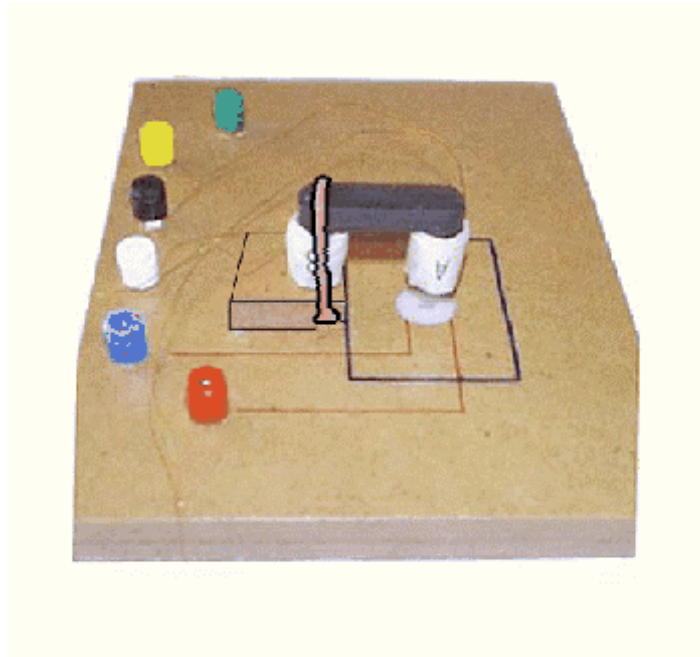
Para ligares o gerador de sinal debes pressionar o interruptor vermelho marcado **PWR**. Selecciona a escala de 10 kHz carregando no interruptor que indica **10 k**, e selecciona um sinal sinusoidal carregando no segundo interruptor da direita que tem o símbolo de uma onda. Não deverás tocar em nenhum dos outros interruptores. Põe a amplitude do sinal no máximo, rodando o botão da amplitude completamente para a direita. Para alterares os valores de frequência utiliza apenas o botão grande à esquerda. O valor seleccionado no mostrador deste botão multiplicado pela frequência de base que seleccionaste inicialmente no interruptor dá-te um valor aproximado da frequência de saída do sinal. O valor exacto desta frequência deve ser medido, todas as vezes, com um multímetro. O gerador tem uma resistência interna de 50  $\Omega$  e o sinal sai do gerador através da tomada **MAIN**.

### ***Núcleos de ferrite***

Os núcleos de ferrite devem ser manuseados com cuidado porque são muito quebradiços! A ferrite é um material magnético cerâmico com uma conductividade eléctrica baixa. As perdas por efeito Joule nestes núcleos devido às correntes induzidas são, portanto, baixas.

### ***Tomadas para fichas-banana no suporte de madeira***

Para ligares um fio de uma bobina a uma das tomadas do suporte de madeira, deverás desenroscar a parte de cima em plástico colorido. Depois enrola a fina extremidade metálica do fio de ligação na parte metálica da tomada e enrosca a parte plástica de modo a que o fio fique bem preso.



**Figura 1:** Arranjo experimental para a parte I.

### ***Parte I. Blindagem magnética por correntes induzidas (8 pontos)***

Os campos magnéticos dependentes do tempo induzem correntes nos condutores. Estas correntes, por seu lado, produzem campos magnéticos que se opõem ao campo directamente aplicado. Devido à conductividade finita dos metais, as correntes não são suficientes para blindar completamente o campo aplicado.

Para descrever o efeito de blindagem de folhas de alumínio vamos utilizar a seguinte lei experimental

$$B = B_0 e^{-\alpha d} \quad (1)$$

onde  $B$  é o campo de indução magnética, que atravessa as folhas.  $B_0$  é o campo de indução magnética no mesmo ponto na ausência das folhas,  $\alpha$  é um parâmetro designado por coeficiente de atenuação e  $d$  é a espessura da folha.

### **Experiência**

Coloca o núcleo de ferrite com as bobinas, de pernas para baixo, no pequeno bloco de madeira colado ao suporte, de forma que a bobina A fique por cima da bobina detectora de campos magnéticos que está embutida no suporte, como mostra a figura 1. Prende o núcleo de ferrite no bloco com a ajuda dos elásticos, fazendo-os passar por cima do núcleo e pela ranhura por baixo do pequeno bloco. Considera desprezável o erro no valor apresentado da espessura das folhas de alumínio e também que é desprezável o erro nas medidas de frequência.

(1 ponto) Liga os fios das bobinas A e B às tomadas livres (duas das tomadas estão já ligadas à bobina detectora como mostram as linhas no suporte). Mede a resistência das três bobinas para teres a certeza de que as ligações estão bem feitas. Os valores deverão ser inferiores a  $10\ \Omega$ . Escreve os valores que mediste na folha de respostas.

(5 pontos) Faz medições para testar a equação (1) e determinar o valor da constante  $\alpha$ , usando as folhas de alumínio (espessuras de  $25 - 175\ \mu\text{m}$ ) e várias frequências no intervalo  $6 - 18\ \text{kHz}$ . Para cada frequência, aplica uma tensão sinusoidal à bobina A, coloca a(s) folha(s) no interior do quadrado desenhado no suporte por cima da bobina de detecção e mede a voltagem aos seus terminais. Escreve os resultados no campo 2 da folha de respostas.

(2 pontos) Faz o gráfico de  $\alpha$  em função da frequência.

## ***Parte II. Acoplamento de fluxos magnéticos (12 pontos)***

Vais estudar a reacção de duas bobinas montadas num núcleo fechado de ferrite a uma tensão alternada externa ( $V_g$ ) fornecida por um gerador de sinal sinusoidal.

### ***Teoria***

Na discussão teórica que se segue, e no tratamento dos dados, considera-se que a resistência óhmica das duas bobinas e os efeitos de histerese do núcleo não têm influência significativa nas correntes e diferenças de potencial medidas. No entanto, devido a estas simplificações, pode haver pequenas diferenças entre os resultados medidos e os calculados.

### ***Uma só bobina***

Vamos primeiro considerar o caso em que está ligada apenas uma única bobina onde passa uma corrente  $I$ . O fluxo magnético  $\Phi$  criado pela corrente no núcleo de ferrite dentro da bobina é proporcional à corrente  $I$  e ao número  $N$  de voltas do fio na bobina.

O fluxo depende ainda de um factor geométrico  $g$ , que depende do tamanho e da forma do núcleo, e da permeabilidade magnética  $\mu = \mu_r \mu_0$ , que descreve as propriedades magnéticas do material de que é feito o núcleo. A permeabilidade relativa é designada por  $\mu_r$  e a permeabilidade do espaço vazio por  $\mu_0$ .

O fluxo magnético  $\Phi$  é pois dado por

$$\Phi = \mu g N I = c N I \quad (2)$$

onde  $c = \mu g$ . A tensão induzida é dada pela lei de Faraday da indução,

$$\varepsilon(t) = -N \frac{d\Phi(t)}{dt} = -c N^2 \frac{dI(t)}{dt} \quad (3)$$

A forma convencional de descrever a relação entre corrente e tensão numa bobina é através da auto-indutância da bobina  $L$ , definida por

$$\varepsilon(t) = -L \frac{dI(t)}{dt} \quad (4)$$

Quando um gerador de sinal sinusoidal é ligado à bobina, passa uma corrente dada por

$$I(t) = I_0 \sin \omega t \quad (5)$$

onde  $\omega$  é a frequência angular e  $I_0$  é a amplitude da corrente. Da equação (3) conclui-se que esta corrente alternada irá induzir uma diferença de potencial aos extremos da bobina dada por

$$\varepsilon(t) = -\omega c N^2 I_0 \cos \omega t \quad (6)$$

A corrente será tal que a tensão induzida é igual à do gerador,  $V_g$ . Existe uma diferença de fase de 90 graus entre a corrente e a tensão. No que respeita apenas às amplitudes  $\varepsilon_0$  e  $I_0$ , tendo em conta esta diferença de fase, temos que

$$\varepsilon_0 = \omega c N^2 I_0 \quad (7)$$

Daqui para diante deixaremos de indicar explicitamente os índices “0”.

## Duas bobinas

Vamos considerar agora que temos duas bobinas num núcleo. Os núcleos de ferrite podem ser usados para acoplar o fluxo magnético entre as bobinas. Num núcleo ideal, o fluxo seria o mesmo em todas as suas secções. Contudo, nos núcleos reais há perdas de fluxo, pelo que vai chegar à segunda bobina um fluxo menor do que o gerado pela primeira bobina. O fluxo  $\Phi_B$  na bobina secundária B está portanto relacionado com o fluxo  $\Phi_A$  na bobina primária A por

$$\Phi_B = k \Phi_A \quad (8)$$

Da mesma forma, um fluxo  $\Phi_B$  criado por uma corrente em B vai criar um fluxo  $\Phi_A = k \Phi_B$  na bobina A. O factor  $k$ , que é designado por factor de acoplamento, tem um valor menor do que um.

O núcleo de ferrite que estamos a estudar tem duas bobinas A e B tal como um transformador. Vamos considerar que a bobina A é o primário (ligado ao gerador de sinal). Se não passar corrente na bobina B ( $I_B=0$ ), a tensão induzida  $\varepsilon_A$  devida a  $I_A$  é igual e oposta a  $V_g$ . O fluxo criado por  $I_A$  na bobina B (secundário) é determinado pela equação (8) e a tensão induzida na bobina B é

$$\varepsilon_B = \omega k c N_A N_B I_A \quad (9)$$

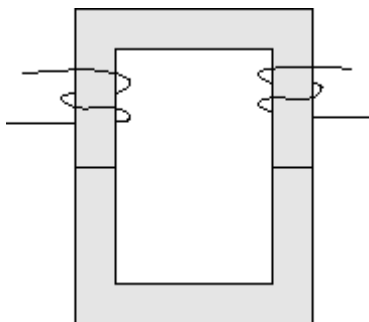
Se uma corrente  $I_B$  passar na bobina B, induzirá uma tensão na bobina A que é descrita por uma expressão semelhante. A diferença de potencial nos terminais da bobina A será então dada por

$$V_g = \varepsilon_A = \omega c N_A^2 I_A - \omega k c N_A N_B I_B \quad (10)$$

A corrente no secundário induz, portanto, uma tensão oposta no primário, resultando num aumento de  $I_A$ . Para  $\varepsilon_B$  pode ser escrita uma equação semelhante. A experiência mostra que  $k$  é independente de qual das bobinas é o primário.

## Experiência

Junta os dois núcleos em U, tal como indica a Figura 2, ligando-os bem com os elásticos. Selecciona no gerador de sinais uma onda sinusoidal de 10 kHz. Lembra-te de ajustar os multímetros para a escala mais conveniente para cada medida. Os números de espiras das bobinas A e B são  $N_A = 150$  e  $N_B = 100$  ( $\pm 1$  espira em cada bobina).



**Figura 2:** Transformador com o circuito magnético fechado.

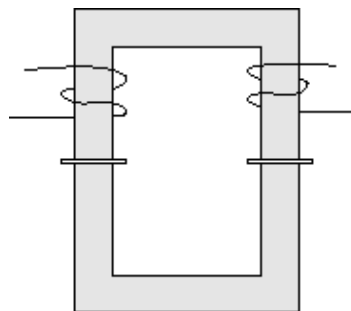
1. (3,5 pontos) Mostra que as expressões algébricas para as auto-indutâncias e factor de acoplamento  $k$  são:  $L_A = \varepsilon_A / (\omega I_A)$ ,  $I_B = 0$ ;  $L_B = \varepsilon_B / (\omega I_B)$ ,  $I_A = 0$  e  $k = (N_B I_B) / (N_A I_A)$ ,  $\varepsilon_B = 0$  e escreve os resultados no campo 1.a da folha de respostas. Desenha no campo 1.b da folha de respostas os circuitos eléctricos que mostrem como se podem medir estas grandezas. Determina os valores numéricos de  $L_A$ ,  $L_B$  e  $k$  e escreve os valores no campo 1.c da folha de respostas.
2. (2 pontos) Quando se curto-circuita o secundário, a corrente  $I_P$  no primário aumenta. Usa as equações acima para deduzir a expressão para  $I_P$  em função da tensão no primário, da auto-indutância do primário e da constante de acoplamento, escrevendo o resultado no campo 2.a da folha de respostas. Mede  $I_P$  e escreve o seu valor no campo 2.b da folha de respostas.
3. (2,5 pontos) As bobinas A e B podem ser ligadas em série de duas maneiras diferentes. Numa delas as contribuições das duas bobinas para o fluxo adicionam-se e na outra subtraem-se.
  - 3.1 Determina, a partir de grandezas medidas, a auto-indutância das duas bobinas ligadas em série  $L_{A+B}$  no caso em que as contribuições para o fluxo de uma corrente  $I$  nas duas bobinas se adicionam (reforçam uma à outra). Escreve a tua resposta no campo 3.1 da folha de respostas.
  - 3.2. Mede as tensões  $V_A$  e  $V_B$  quando as contribuições para o fluxo das duas bobinas se opõem uma à outra. Escreve os valores no campo 3.2.a da folha de respostas e a razão das tensões no 3.2.b. Deduz uma expressão para a razão das diferenças de potencial nas duas bobinas em função do número de espiras e do coeficiente de acoplamento, escrevendo-a no campo 3.2.c da folha de respostas.

4. (1 ponto) Usa os resultados obtidos para verificar que a auto-indutância de uma bobina é proporcional ao quadrado do número de espiras e escreve o resultado no campo 4 da folha de respostas.
5. (1 ponto) Verifica que é justificável desprezar a resistência do primário e descreve o teu argumento sob forma matemática no campo 5 da folha de respostas.
6. (2 pontos) As indutâncias das bobinas são drasticamente reduzidas se inserirmos pedaços finos de papel entre os dois “meios núcleos” de ferrite tal como indica a figura 3. Usa esta redução para determinar a permeabilidade relativa  $\mu_r$  da ferrite, recorrendo à lei de Ampère e à continuidade do campo de indução  $\mathbf{B}$  através da interface ferrite – papel.

Considera  $\mu = \mu_0 = 4\pi \times 10^{-7} \text{ N s}^2/\text{C}^2$  para o papel e que a espessura do papel é de  $43 \mu\text{m}$ . O factor geométrico pode ser determinado da lei de Ampère

$$\oint \frac{1}{\mu} B dl = I_{total} \quad (11)$$

onde  $I_{total}$  é a corrente total que atravessa uma superfície limitada pelo caminho de integração. Escreve a expressão algébrica para  $\mu_r$  no campo 6.a da folha de resposta e o respectivo valor numérico no campo 6.b.



**Figura 3:** Os núcleos de ferrite com os dois separadores de papel colocados.