
Medida da magnetização com um magnetómetro de amostra vibrante

Laboratório de Física III

Departamento de Física e Astronomia da Faculdade de Ciências da Universidade do Porto

Índice

1. Objetivos	3
2. Introdução	3
2.1 Técnica VSM – Vibrating Sample Magnetometer	4
2.2 Técnica Lock-in	7
3. Referências	10
4. Preparação do Trabalho	10
5. Trabalho Experimental	11
5.1 Demonstração da técnica lock-in com circuito indutivos acoplados	11
5.2 Medida do ciclo histerético de uma amostra ferromagnética com VSM	13
6. Questões	14

1. Objetivos

Neste trabalho a utilização do instrumento lock-in é revisitada, e ilustrada numa configuração especial para a caracterização do ciclo histerético magnético de amostras magnetizáveis através do Magnetómetro de Amostra Vibrante (Vibrating Sample Magnetometer). Os objectivos concretos são:

- 1) Solidificar a utilização do amplificador lock-in;
- 2) Medir o ciclo histerético de amostras ferromagnéticas pela técnica VSM;
- 3) Introdução ao estudo dos materiais magnéticos e suas propriedades;

2. Introdução

O conhecimento experimental da dependência da magnetização (**M** - momento magnético por unidade de volume) de um dado material com fatores controláveis, como por exemplo o campo magnético aplicado (**H**) ou a temperatura (**T**), é imprescindível para o estudo e caracterização das suas propriedades magnéticas. Para a medida da magnetização utilizam-se dispositivos cujo funcionamento combina efeitos magnéticos associados à magnetização com efeitos eléctricos e/ou mecânicos nos quais intervêm outras grandezas físicas diretamente mensuráveis (como a força ou a resistência eléctrica¹). Os métodos usuais de medida da magnetização podem ser divididos em três principais categorias:

- 1) medida da força exercida sobre uma amostra submetida a um campo magnético não- uniforme;
- 2) medida da indução magnética na vizinhança da amostra;
- 3) medidas indirectas de fenómenos que envolvem as propriedades magnéticas (tais como a resistência eléctrica ou a *strain*);

Todos os métodos de indução magnética, dos quais a técnica adoptada neste trabalho é um exemplo, envolvem a medida da tensão eléctrica induzida numa ou várias bobinas de detecção (*pick-up coils*) por uma variação de fluxo magnético, quando a posição relativa da amostra e das espiras de detecção é alterada (ver fig. 1).

¹ Existe uma variedade grande de magnetómetros com diferentes tipos de funcionamento - uma lista resumida pode ser consultada aqui: <https://www.rfwireless-world.com/Articles/Magnetometer-basics-and-Magnetometer-types.html>. Em particular, os magnetómetros de Força de Faraday e os magnetómetros de efeito Hall (ler/reler protocolo do trabalho do efeito Hall) usam a medição da força e a diferença de potencial como medidas indirectas da magnetização.

Antes de prosseguir, importa relembrar as diferentes grandezas magnéticas e em particular a diferença entre os vectores densidade de fluxo de campo magnético ou indução (**B**) e força de campo magnético (**H**), cujas unidades SI são Tesla (T) e Ampère por metro (A/m), respectivamente. Considerando o exemplo de um campo magnético aplicado a um material magnético, estas duas grandezas relacionam-se através da seguinte relação:

$$\vec{B} = \mu_0(\vec{H} + \vec{M})$$

Assim, podemos definir o vector força de campo magnético (**H**) como o campo magnético que um dado magnete (fonte de campo) disponibiliza à sua vizinhança, enquanto que o vector densidade de fluxo de campo magnético (**B**) descreve a densidade (e direcção) das linhas de campo que atravessam uma determinada área (S) na vizinhança do magnete. Se esta determinada área (S) estiver localizada no interior de um material magnetizável, então o vector **B** pode ser pensado como o campo magnético total resultante da soma do campo magnético aplicado (**H**) e da magnetização (**M**).

2.1 Técnica VSM - Vibrating Sample Magnetometer

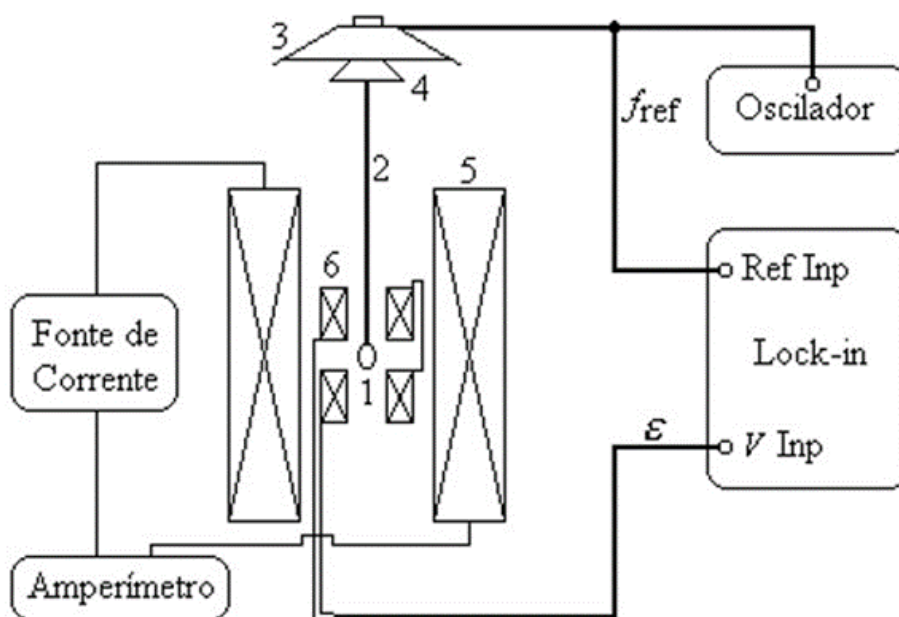


Figura 1: Diagrama bloco do magnetómetro VSM: 1 - amostra; 2 - barra porta-amostra; 3 - altifalante; 4 - estrutura de cartão; 5 - bobine de campo; 6 - bobines de detecção.

O magnetómetro de amostra vibrante utilizado neste trabalho, fig. 1, tem uma conceção e princípio de funcionamento simples. A amostra (1) é colada à extremidade inferior duma barra (2) não-magnética que é feita vibrar com uma frequência da ordem de 100 Hz através dum sistema constituído por um altifalante (3) e uma estrutura de

cartão (4) colada ao cone do altifalante. O deslocamento da amostra (através da vibração da barra) realiza-se ao longo do eixo (z) comum duma bobine (5) utilizada para produzir o campo magnético, e de outras duas interiores (6) idênticas ligadas em oposição-série, cuja função é detectar variações de fluxo magnético causadas pela vibração da amostra – bobines de detecção.

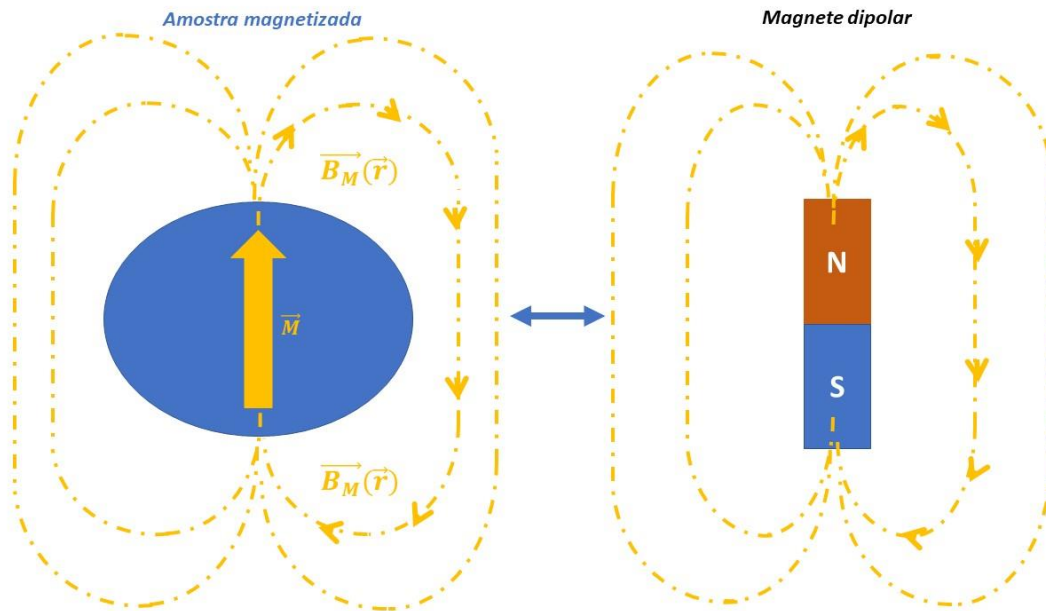


Figura 2: Representação esquemática do vector densidade de fluxo de campo magnético ou indução ($\vec{B}_M(\vec{r})$) gerado por uma amostra esférica magnetizada e equivalência com o vector de um ímã dipolar típico.

Seja $\vec{H} = H\vec{u}_z$, o campo magnético aplicado à amostra, V o volume da amostra e $\vec{m} = V\vec{M}\vec{u}_z = m\vec{u}_z$ o seu momento magnético. A existência da magnetização \vec{M} na amostra manifesta-se pelo aparecimento, em redor desta, duma indução magnética associada $\vec{B}_M(\vec{r})$ (ver fig. 2). Como em qualquer ponto \vec{r} do espaço, a grandeza de \vec{B}_M é proporcional ao momento magnético da amostra, o fluxo de \vec{B}_M através de cada uma das bobines de detecção, considerando-as centradas em $z = \pm h$, pode ser escrito como

$$\Phi_m^\pm = \pm F\left(z \pm \frac{h}{2}\right) m,$$

Sendo $F()$ uma função geométrica que depende de:

- Posição $\left(z \pm \frac{h}{2}\right)$ da amostra relativamente ao centro de cada bobine de detecção;
- Número de espiras de cada bobine de detecção;
- Parâmetros de configuração geométrica das bobines;

O fluxo total \vec{B}_M que atravessa as duas bobines ligadas em série, é então:

$$\Phi_M(z) = \Phi_M^+(z) + \Phi_M^-(z) = \left[F\left(z + \frac{h}{2}\right) + F\left(z - \frac{h}{2}\right) \right] m$$

$$\Phi_M(z) = K(z)m$$

Enquanto a função $F()$ é simétrica em torno de $z = \pm \frac{h}{2}$, a resultante $K(z)$ é anti-simétrica, e a sua derivada $K'(z)$ simétrica.

O fluxo magnético total nas bobinas de detecção inclui ainda a contribuição devida ao campo aplicado, mas esta é, em princípio, constante no tempo. Se a amostra for centrada em $z = 0$, a sua posição instantânea pode ser escrita como:

$$z(t) = A \cos(\omega t) \quad (1)$$

em que A representa a amplitude de vibração, suposta suficientemente pequena para se desprezar a variação espacial do campo aplicado, e ω a frequência angular correspondente à frequência do movimento oscilatório da barra+amostra. A f.e.m. induzida nas bobinas de detecção é, segundo a lei de Faraday-Henry, dada por:

$$\varepsilon(t) = -\frac{d\Phi_M}{dt} = -K'(0) \frac{dz}{dt} m = [K'(0) A \omega m] \sin(\omega t) \quad (2)$$

Esta equação permite a determinação da magnetização $M \propto m$ a partir da medida experimental da f.e.m, ε :

$$\varepsilon(\omega) = K'(0) A \omega m$$

e conhecidos os valores $K'(0)$ e A , o que habitualmente é feito através de uma calibração com uma amostra padrão cuja magnetização é bem conhecida.

No presente trabalho limitar-nos-emos a medir ε . No entanto, a variação de ε com o campo aplicado reproduz com muito boa aproximação, a menos dum factor constante, os aspectos quantitativos e qualitativos da variação de M com H , permitindo-nos estudar também o comportamento histerético das amostras ferromagnéticas, pela medida de curvas como aquela que se apresenta na fig. 3.²

² Usando a expressão $\vec{B} = \mu_0(\vec{H} + \vec{M})$ é possível converter \vec{M} em \vec{B} e transformar a representação da Figura 3 num gráfico de $\vec{B}(\vec{H})$. Este tipo de representação é particularmente útil na comparação de magnetes duros (hard magnets). Através desta representação pode ser facilmente estimada a "maximum energy product" – o valor máximo de energia (kJ m^{-3} ou MG Oe) que pode ser armazenada no determinado magnete – através da determinação da área do maior rectângulo que é possível desenhar num quadrante e dentro da curva histerética $\vec{B}(\vec{H})$. Num magnete de Nd-Fe-B (tipicamente usados nas turbinas eólicas) este valor máximo de energia é superior a 400 kJ m^{-3} .

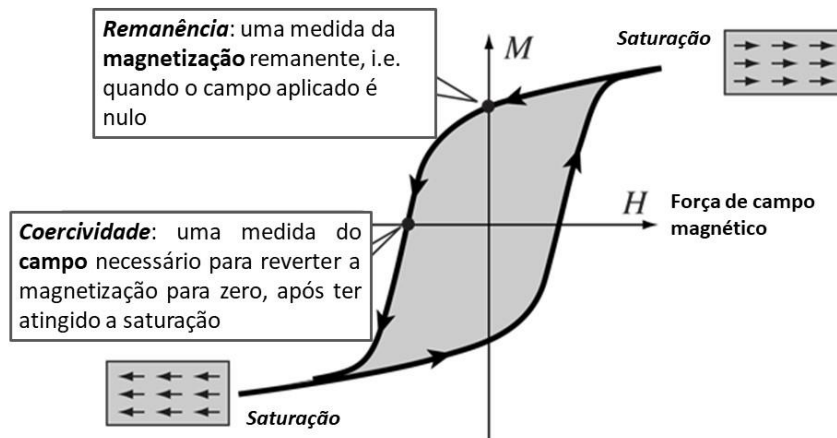


Figura 3: Representação esquemática de um ciclo histerético de uma amostra ferromagnética. Destaque para o significado das grandezas de magnetização remanente, magnetização de saturação e campo coercivo.

2.2 Técnica *lock-in*

A técnica *lock-in* é de extrema importância na medição de sinais periódicos caracterizados por muito baixa razão SNR (signal-to-noise ratio), isto é, sinais de muito pequena amplitude mascarados por ruído eléctrico.

O funcionamento *lock-in* equivale à aplicação de um filtro eléctrico de largura de banda arbitrariamente pequena e sintonizado numa frequência particular do sinal que se pretende medir, isolando-o assim do ruído indesejado. Numa utilização típica do *lock-in* poderemos ter, por exemplo, uma frequência de referência $f = 10 \text{ kHz}$, e um filtro *lock-in* equivalente com largura de banda $\Delta f = 0.01 \text{ Hz}$, a que corresponde o factor de qualidade:

$$Q = \frac{f}{\Delta f} = 10^6$$

Este factor expressa a capacidade de isolar uma frequência, e no caso dos *lock-in* apresenta um valor muito para além das capacidades de filtros electrónicos passivos. Além de filtragem, um *lock-in* proporciona também elevado ganho $A_{max} = \left[\frac{V_{out}}{V_{sinal}} \right]_{max} \sim 10^9$.

O *lock-in* funciona não só como um instrumento de medida, mas também um amplificador que pode ser incluído numa cadeia de processamento de sinais. Para tal, a componente de sinal extraída resulta num novo sinal amplificado em tensão, de valores da ordem de Volts, útil quer no controlo de instrumentação, quer na aquisição automática de sinal.

As medidas *lock-in* partilham alguns princípios básicos. Esta técnica requer que o circuito experimental seja excitado com uma frequência fixa numa região

relativamente “calma” do espectro de ruído. O lock-in detecta então a resposta do circuito numa largura de banda muito estreita e centrada na frequência de excitação. Na figura 4, mostra-se o diagrama de blocos simplificado do amplificador lock-in. Fornecem-se dois sinais ao instrumento:

- (i) um sinal periódico de referência V_{ref} , estável, à frequência f_{ref} do sinal que interessa medir (frequência do sinal de modulação);
- (ii) o sinal V_i contendo, em geral, várias componentes oscilatórias a frequências arbitrárias f_i (ou ω_i), entre as quais se encontra o sinal que se pretende medir.

Nos lock-in de laboratório é comum poder subtrair dois sinais eléctricos, tal que $V_i = V_A - V_B$, por exemplo para remover um sinal de fundo constante, pelo que o amplificador diferencial AC localizado na entrada do diagrama de blocos pode ser muito útil. O sinal processado pelo lock-in é então $V_s = A \times V_i$.

O funcionamento do lock-in baseia-se em dois componente-chave: circuitos PLL - *Phase-Lock Loop* e PSD - *Phase Sensitive Demodulation*. O circuito PLL detecta a frequência de um sinal referência V_{ref} , gerando uma componente sinusoidal a essa

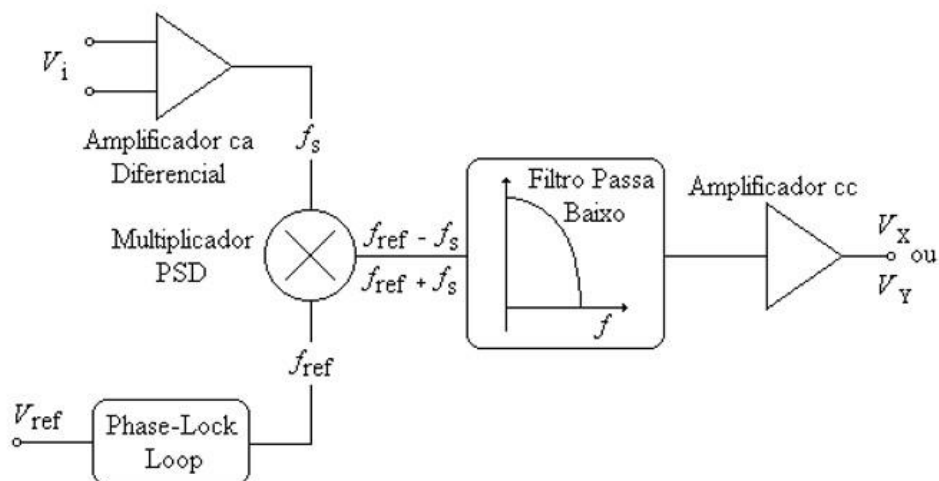


Figura 4: Diagrama de blocos simplificados da electrónica associada a uma das saídas V_x ou V_y do lock-in.

mesma frequência ω_{ref} . Efectivamente, o lock-in contém dois blocos similares àquele apresentado na fig. 4, mas em que os dois PLLs geram duas componentes sinusoidais em quadratura ($\cos(\omega_{ref}t)$, $\sin(\omega_{ref}t)$). Assim, estes circuitos seguem automaticamente a frequência principal do sinal de referência, mas com respostas desfasadas de 90 graus.

O circuito PSD compara o sinal de entrada (AC) com o sinal de referência proveniente do circuito PLL, resultando no batimento entre estes sinais. Esta desmodulação é sensível à fase, fazendo com que a saída do PSD apresente a fase ϕ resultante da diferença de fase entre sinal e referência. Dos dois blocos PSD resultam os sinais em quadratura:

$$V_X^{PSD} = \frac{1}{2} V_S [\cos[(w_{ref} + w_i)t + \Phi] + \cos[(w_{ref} - w_i)t + \Phi]]$$

$$V_Y^{PSD} = \frac{1}{2} V_S [\sin[(w_{ref} + w_i)t + \Phi] + \sin[(w_{ref} - w_i)t + \Phi]]$$

que são filtrados por filtros passa-baixo (FPB) encarregues de atenuar as componentes de alta frequência correspondentes a $(f_{ref} + f_i)$. Sobrevivem as componentes DC de frequência $(f_{ref} - f_i) \rightarrow 0$ contidas na reduzida largura do FPB. O sinal lock-in é aquele resultante da filtragem, apresentando duas saídas em quadratura:

$$V_X \sim \frac{1}{2} V_S \cos[(w_{ref} - w_i)t + \Phi] \sim \frac{1}{2} V_S \cos[\Phi]$$

$$V_Y \sim \frac{1}{2} V_i \sin[(w_{ref} - w_i)t + \Phi] \sim \frac{1}{2} V_i \sin[\Phi]$$

Para sinais em fase com o sinal de referência, a saída V_X será máxima. Se a fase for diferente de zero $|V_{X,Y}| \leq V_i$ e $-\pi < \Phi < \pi$.

O sinal de saída do lock-in pode ser convertido em grandezas *fasor* por operações sobre estes dois canais: grandeza R ,

$$R = \sqrt{V_X^2 + V_Y^2} \cong V_S$$

e fase Φ ,

$$\Phi = \arctan\left(\frac{V_Y}{V_X}\right)$$

correspondente à diferença de fase entre referência e o sinal pretendido.

É relevante adicionar que os instrumentos de laboratório lock-in disponibilizam normalmente um sinal AC proveniente de um oscilador interno a frequência fixa que pode ser utilizado, à falta de outro sinal de referência exterior, para suportar a realização de medidas. No caso dos lock-in da *Stanford Research*, comuns no laboratório, a ligação BNC a este sinal de saída é feita pela face traseira do instrumento.

Finalmente, a largura do filtro passa baixo é controlada através da selecção da constante de tempo adequada, no painel frontal do instrumento. Deve escolher-se uma constante de tempo cerca de 3 a 5 vezes maior que o tempo característico de flutuações que se desejem eliminar, mas não demasiado grande que esconda processos mais rápidos que se desejam observar. Tem de haver um bom compromisso entre sensibilidade e eliminação de ruído.

3. Referências

- [1] Feynman, Leighton and Sands, *The Feynman Lectures on Physics*, vol. II, cap 36.
- [2] Jiles. *Introduction to Magnetism and Magnetic Materials*.
- [3] Rose, Shepard and Wulff. *The structure and Properties of Materials*, v. IV, cap. 9, 10.
- [4] <http://magnetism.eu/esm/2005-constantia/slides/sander-slides.pdf>
- [5] <http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbase/Solids/magperm.html#c1>
- [6] Stephen Blundell, *Magnetism in Condensed Matter*, Oxford Series in Condensed Matter Physics.

4. Preparação do Trabalho

Para a tarefa de exploração do amplificador lock-in é importante compreender a função dos circuitos utilizados, representados na figura 5.

1. Se ligar apenas o circuito A:
 - a) que sinal de tensão V_{L1} espera medir aos terminais de $L1$?
 - b) atendendo a que o gerador alimenta o circuito com tensão variável, que acontece na vizinhança da bobine de indutância $L1$?
2. quais as semelhanças e/ou diferenças entre os circuitos A e B? note que as tensões V_1 e V_2 serão fornecidas por geradores distintos.
3. Com ambos os geradores ligados a frequências arbitrárias f_1 e f_2 , que espera obter como sinais V_{L1} e V_{L2} , observados no osciloscópio, quando as bobines de indutâncias L_1 e L_2 estiverem na proximidade uma da outra? Tome o gerador de $V_2(f_2)$ como «um simulador» de um sinal de interesse, e o gerador de $V_1(f_1)$ como «simulador» de ruído que irá sobrepor-se ao sinal de interesse, contaminando-o em diferentes frequências e com diferentes razões Sinal-Ruído (muito alta, e muito baixa).
4. Relembrando a introdução, e considerando a montagem final proposta, qual a função da ligação de V_2 à entrada «Ref Inp» do lock-in, na figura 5.

Quanto ao VSM,

1. Porque se partilha a frequência do sinal do oscilador (gerador de sinais) que alimenta o altifalante com a entrada «Ref Inp» do lock-in?
2. Relembre que a medida do lock-in pode ser visualizada em dois modos: par grandeza R e fase ϕ ; ou par V_x e V_y . No VSM há duas oscilações importantes:
 - a) oscilação da amostra, induzida pelo altifalante, eq. 1, $z(t) = A \cos(\omega t) \propto V_{ref}$
 - b) medida da fem $\epsilon(t)$ (equação 2), $\epsilon(t) = [K'(0) A \omega m] \sin(\omega t) = V_{inp}^{LockIn}(t)t$

Note que os dois sinais fornecidos ao lock-in se esperam desfasados de 90 graus (em quadratura). Podemos relacionar o «sinal a medir» com as «medidas lock-in» como:

$$\varepsilon(t, w_{ref}) = R \exp(jw_{ref}t + (\Phi - \Phi_0))$$

$$\varepsilon(t, w_{ref}) = V_X \cos(w_{ref}t - \Phi_0) + V_Y \sin(w_{ref}t - \Phi_0)$$

onde Φ_0 é uma constante que pode ser ajustada no próprio lock-in antes de iniciar as medidas.

Sabendo que $\varepsilon(t)$ e $z(t)$ estão em quadratura, qualitativamente, que espera obter nos pares (R, ϕ) e (V_X, V_Y) ?

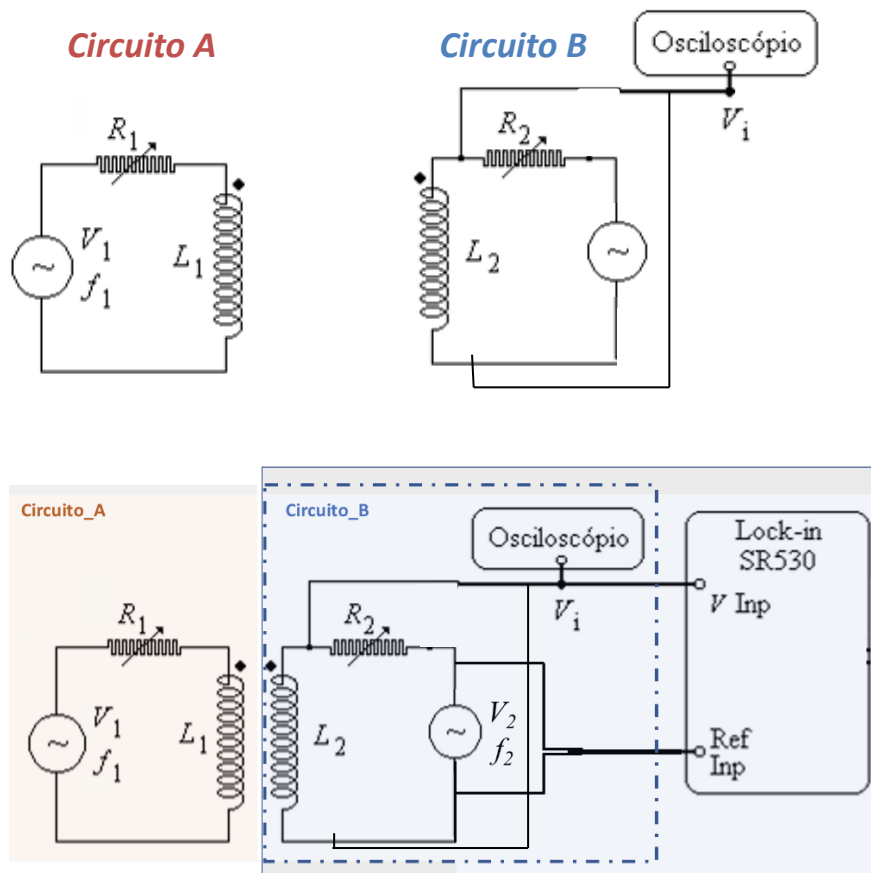


Figura 5: Circuitos RL acoplados para demonstração da técnica lock-in: circuito_A, circuito oscilante, à frequência f_1 ; circuito_B, circuito oscilante à frequência f_2 , e medida da tensão em R_2 ; circuito_final, circuito geral, com acoplamento electromagnético entre circuitos A e B.

5. Trabalho experimental

5.1 Demonstração da técnica lock-in com circuitos indutivos acoplados

Equipamento disponível

Para a realização dos circuitos da figura 5 necessitará de:

- dois reóstatos R_1 e R_2 ($R_{\max} = 230 \, \Omega$);
- duas bobines de indutâncias L_1 e L_2 ;
- dois geradores de sinal para excitação dos circuitos (R_1, L_1) e (R_2, L_2)
 - $V_1 \sim 1 \, \text{V}$, $f_1 \sim 300 - 4000 \, \text{Hz}$;
 - $V_2 \sim 1 \, \text{V}$, $f_2 \sim 1 \, \text{kHz}$;
- osciloscópio para observação directa da forma do sinal V_i .
- lock-in para medida da componente de V_i à frequência f_2 ;
- cabos de ligação
- multímetro para controlo de corrente

Procedimento

Tendo em conta os circuitos na figura 5:

1. Monte o circuito A, e confirme as suas previsões de preparação do trabalho. No fim, desligue o circuito.
2. Monte o circuito B, e confirme as suas previsões para o ponto 2 da preparação do trabalho.
3. Ligue os dois geradores garantindo que as frequências f_1 e f_2 são diferentes. Aproxime as duas bobines, e verifique as suas previsões para o ponto 3 da preparação do trabalho.

Tome o gerador de $V_2(f_2)$ como «um simulador» de um sinal de interesse, e o gerador de $V_1(f_1)$ como «simulador» de ruído que irá sobrepor-se ao sinal de interesse, contaminando-o em diferentes frequências e com diferentes razões Sinal-Ruído. Sugestão: ajuste o sinal V_2 de forma a que a sua amplitude seja consideravelmente menor que a amplitude do sinal associado a V_1 sobreposto.

4. Adicione, finalmente, o lock-in, de acordo com o circuito final da figura. Note que os geradores de sinal dispõem de uma saída TTL (onda quadrada de 5 V de amplitude, à frequência seleccionada, síncrona com o sinal V_2 gerado) que pode ser utilizada para referência. Esta saída coaxial de sinal pode estar identificada como saída TTL, ou localizar-se no painel traseiro do gerador, normalmente com a designação *Sync Out*.

- a) Varie a frequência f_1 do oscilador do circuito 1, observando no osciloscópio o que acontece à tensão V_i nos terminais de L_2 . Observe simultaneamente o efeito

no sinal medido no lock-in. Se necessário, ajuste as resistências R_1 e R_2 por forma a observar uma maior interferência dos dois circuitos.

b) Registe o que acontece quando f_1 se aproxima de f_{ref} .

c) Estude o efeito da alteração do acoplamento entre as duas bobines.

5.2 Medida do ciclo histerético duma amostra ferromagnética com o magnetómetro VSM.

Equipamento

- gerador AC : $V_1 \sim 1\text{ V}$,
 - saída de baixa impedância, a $f_1 \sim 120\text{ Hz}$, para excitação do altifalante;
 - saída TTL para utilizar como referência do amplificador lock-in.
- lock-in para medida da força electromotriz induzida nas bobines de detecção («pick-up»);
- magnetómetro VSM com amostra montada;
- fonte de corrente DC variável ($|I_H| \leq 1\text{ A}$) para alimentar a bobine de produção do campo magnético;
- multímetro para medida da corrente eléctrica I que produz o campo magnético;

Procedimento

1. Monte o circuito da fig. 1.
2. Fixe a corrente I no valor máximo ($I_{m\acute{a}x}$) e registe o seu valor. Evite manter a corrente no valor máximo por períodos de tempo longos, para evitar efeitos de aquecimento da bobine de campo.
3. No gerador de sinais, ajuste a frequência ($f_{ref} \sim 120\text{ Hz}$) e a amplitude da alimentação do altifalante de modo a obter um sinal ϵ apreciável nas bobines de detecção.
4. Certifique-se que o lock-in conseguiu identificar a frequência referência f_{ref} . Ajuste a fase ϕ_0 do lock-in de modo a garantir a quadratura entre sinal a medir e referência. Seleccione a sensibilidade adequada para realizar boas medidas. Seleccione o modo de visualização das medidas (R, ϕ) ou (V_x, V_y) que preferir, e de acordo com o discutido em preparação do trabalho.

5. Varie discretamente, e com suficiente detalhe, a corrente I registando, para cada valor de I , a saída V_x de ϵ . Para medir o ciclo histerético completo, siga a seguinte sequência de operações na variação de I :

- a) diminua I desde $I_{\text{máx}}$ a 0;
- b) com $I = 0$, inverta a polaridade da fonte de corrente;
- c) aumente I desde 0 a $I_{\text{máx}}$;
- d) diminua I desde $I_{\text{máx}}$ a 0;
- e) com $I = 0$, inverta a polaridade da fonte de corrente;
- f) aumente I desde 0 a $I_{\text{máx}}$;
- g) termine as medidas anulando I .

6. Tentar ajustar uma função de *Brillouin* à curva histerética medida, em que a magnetização m :

$$m \propto \epsilon \propto \times \text{Brillouin} (c \times (B - B_0))$$

com a e c constantes a determinar, função das características da amostra, e B_0 o campo inverso, também determinável pelo procedimento de ajuste. Nas condições da experiência proposta, a função de *Brillouin* pode aproximar-se pela função de *Langevin*:

$$L(x) = \coth(x) - 1/x$$

(veja, por exemplo [6, secção 2.4, pag.s 23 – 29] e o resumo apresentado em https://en.wikipedia.org/wiki/Brillouin_and_Langevin_functions). A partir desta curva, estime a corrente máxima necessária para atingir a saturação na amostra.

6. Questões

1. Trace o gráfico correspondente à dependência da Magnetização induzida \vec{B}_M em função do campo magnético \vec{H} aplicado.
2. Conclua sobre o comportamento da magnetização em função do campo aplicado, nomeadamente o fenómeno de histerese, ilustrado na fig. 3.
3. Faça uma estimativa do campo magnético máximo aplicado.
4. Porque é que a barra porta-amostra deve ser não-magnética ?
5. Porque se utiliza um par de bobinas de detecção ligadas em série-oposição ?
6. Em geral, a fase ϕ_0 ajustada no lock-in é não nula. Atendendo a todos os elementos na montagem VSM, e ao procedimento da medida VSM, tente identificar possíveis causas para o atraso/avanço de $\epsilon(t)$, em relação ao sinal que alimenta o altifalante.

-
7. Se a fase ϕ_0 for ajustada de forma a que os sinais entrada-ref fiquem em oposição de fase, que impacto teria nas medidas?