

# Medida da magnetização com um magnetómetro de amostra vibrante

João Custódio *Departamento de Física e Astronomia, Universidade do Porto*

Neste trabalho foi estudado um sistema de lock-in, sistema este usado amplamente enquanto filtro para sinais de amplitudes baixas podendo também funcionar enquanto amplificador. Apenas se conseguiu usar este para o segundo fim. Através do acoplamento de dois circuitos  $RL$  verificou-se a Lei de Faraday bem como o fenómeno de batimento entre sinais. Foi descrito o perfil de um ciclo histerético de uma amostra de níquel através de uma montagem de VSM apesar de não se ter conseguido chegar a um regime de saturação. O ciclo histerético obtido mostrou-se coerente com a função de Langevin teórica que modeliza o sistema.

## I. INTRODUÇÃO TEÓRICA

### A. Ciclo Histerético

Quando um campo magnético externo  $\vec{H}$  é aplicado a um material ferromagnético como ferro (Fe), cobalto (Co) ou o usado nesta atividade laboratorial níquel (Ni) os spins dos átomos constituintes alinham-se na sua direção magnetizando o material este apresenta um momento dipolar por unidade de volume não nulo  $\vec{M}$ . Ao contrário do que se poderia esperar mesmo quando este campo  $\vec{H}$  deixa de atuar, a amostra mantém-se polarizada indefinidamente. É preciso aplicar novamente um campo  $\vec{H}'$  para desmagnetizar o material isto é fazer com que o seu momento magnético volte a zero. Assim para um mesmo campo  $\vec{H}$  aplicado a uma amostra ferromagnética esta pode ter vários valores de magnetização  $\vec{M}$  dependendo no seu historial de magnetização. É de notar que uma amostra de material com um momento magnético associado gera um campo magnético  $\vec{B}$  comportando-se aproximadamente como um dipolo daí dizer-se se que o material tem um momento dipolar associado.

Um curva do ciclo histerético de uma material apresenta o perfil como em 1. Partindo de uma magnetização nula a magnetização aumenta rapidamente até saturar, situação em que o spin de todos os átomos está alinhado com o campo magnético aplicado, não se altera assim a partir deste ponto a magnetização com o aumento do campo magnético aplicado  $\vec{H}$ . Quando se deixa cair o campo aplicado desde o nível de saturação para  $\vec{H} = 0$  podemos verificar que o momento magnético não é nulo tendo o chamado de momento magnético de remanescência (remanence em inglês). O campo magnético externo  $\vec{H}_{coer}$  necessário para voltar a ter uma magnetização nula na amostra vindo esta do nível de saturação é chamada coercitividade (coercitivity em inglês).

Ciclos histeréticos são comuns em vários domínios da física como em circuitos elétricos, elasticidade e em física da matéria condensada no estudo de spin glass.

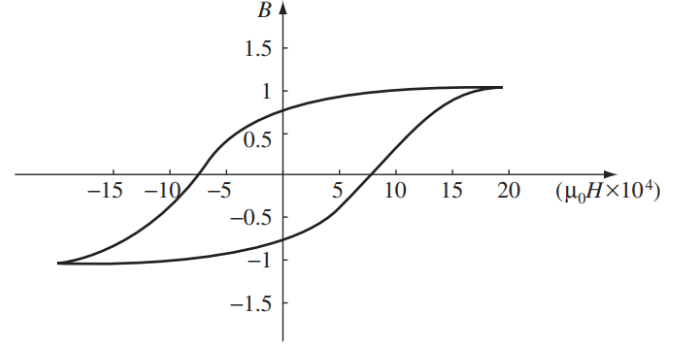


Figura 1. Ciclo Histerético típico de um material ferromagnético imagem retirada de [3]

### B. Funções de Langevin e Brillouin

As funções de Langevin surgem na física estatística no estudo de um material paramagnético ideal. Relacionado a dependência da magnetização com o campo magnético aplicado e com o número quântico do momento angular  $J$ .

$$B_J(x) = \frac{2J+1}{2J} \coth\left(\frac{2J+1}{2J}x\right) - \frac{1}{2J} \coth\left(\frac{1}{2J}x\right) \quad (1)$$

No limite do contínuo  $J$  pode assumir qualquer valor e a função de Brillouin 1 pode ser simplificada para a função de Langevin 2. Esta função é assim adequada para a descrição de ciclos histeréticos para amostras no limite clássico como aquela que iremos estudar.

$$f(x) = \coth(x) + \frac{1}{x} \quad (2)$$

### C. Técnica VSM

VSM significa "Vibrating Sample Magnetometer" e baseia-se no princípio de indução de Faraday 3 para estudar a magnetização de uma amostra de material.

$$\varepsilon_0 = -\frac{d\Phi}{dt} \quad (3)$$

Um sistema de VSM 4 coloca uma amostra de um material cuja magnetização  $\vec{M}$  se pretende medir fixa na extremidade de uma barra não-magnética que oscila com uma dada frequência através de um altifalante. Este set up pretende garantir que a amostra apenas oscila verticalmente (no eixo da barra porta-amostra). Visto que não existe um dispositivo

que permita medir diretamente a magnetização  $\vec{M}$  de um material temos que a medir através de grandezas físicas que se relacionem com esta. Tal será feito através de 3 bobines, uma maior de campo (5) que gerará um campo magnético aproximadamente uniforme nas proximidades da amostra e duas bobines de detecção (6) em série-oposição que irão medir o campo magnético devido ao facto da amostra estar magnetizada e a oscilar, gerando assim um fluxo de campo magnético variável no tempo pelas bobines de detecção. A Lei de Faraday 3 afirma que a variação do fluxo de campo magnético pela área de um dado circuito induz uma diferença de potencial nos terminais do mesmo. Esta diferença de potencial será medida e sendo proporcional ao campo gerado pela amostra também o é à sua magnetização ( $\varepsilon \propto |\vec{M}|$ ) permitindo medir assim a menos de um fator de proporcionalidade a magnetização da amostra. A dedução matemática explicita pode ser vista no apêndice A.

$$\oint_C \mathbf{B} \cdot d\mathbf{l} = \mu_0 I_{enc} \quad (4)$$

Através da lei de Ampere 4 aplicada a um cilindro infinito ou neste caso a um cujas dimensões são muito superiores àquelas do resto da montagem, neste caso ao comprimento da amostra e ao das bobines de detecção, a intensidade do campo magnético aplicado pode ser dado no interior da bobine por

$$|\vec{H}| = \frac{NI\mu_0}{l} \quad (5)$$

em que  $N$  é o número de espiras e  $l$  o comprimento da bobine garantindo assim que  $|\vec{H}| \propto I$ . Pode-se assim obter uma curva análoga a um ciclo histerético através de  $\varepsilon(I)$  a menos de um fatores constantes visto que cada uma das quantidades nos eixos é proporcional a .

#### D. Lock-in

A técnica de lock-in tem como objetivo medir sinais periódicos de baixa amplitude que se mascaram de ruído elétrico. O lock-in funciona como um filtro para uma dada frequência de referência  $f_{ref}$  tendo o lock-in uma dada largura de banda característica  $\Delta f$  (intervalo centrado em  $f_{ref}$  em torno do qual capta frequências) sendo assim o fator de qualidade de um lock-in dado por  $Q = \frac{f}{\Delta f}$  que caracteriza o quão bem um sistema de lock-in consegue isolar uma frequência normalmente melhor do que um filtro passivo, daí a sua utilização.

O lock-in também pode ser usado enquanto um amplificador de sinal visto que proporciona um elevado ganho ao sinal de output até a um fator na ordem de  $10^9$ .

O lock-in precisa de saber qual é a frequência do sinal que quer medir sendo necessário assim um sinal periódico e estável ( $V_{ref}, f_{ref}$ ) e um sinal a ser medido que terá várias componentes oscilatórias com várias frequências ( $V_i, f_i$ ) e com diferentes amplitudes visto que não é possível gerar um sinal elétrico monocromático (com apenas uma frequência) visto que existe sempre ruído elétrico.

Na figura 2 podemos ver o circuito eletrônico simplificado que faz esta filtragem.

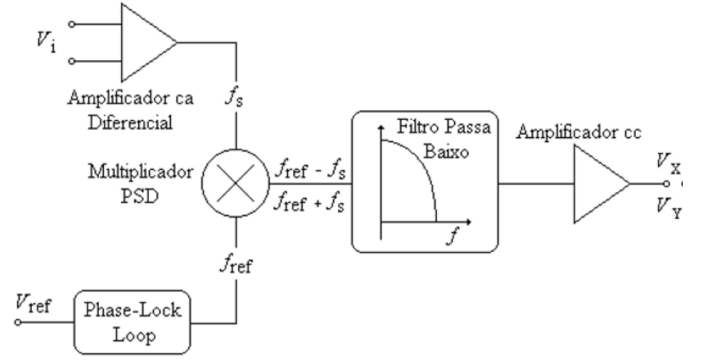


Figura 2. Diagrama de blocos da eletrônica associada a quer uma saída  $V_X$  do lock-in quer a uma  $V_Y$

Normalmente em laboratórios subtrai-se ao sinal elétrico um outro de modo a remover um sinal de fundo constante. O sinal processado pelo lock-in será devido ao amplificador de ganho  $V_S = A \times V_i$ .

O lock-in funciona com base em duas componentes, circuitos PLL (Phase-Lock Loop) e PSD (Phase Sensitive Demodulation).

O circuito PLL gera dois sinais sinusoidais de frequência igual ao de referência  $f_{ref}$  mas desfasados de  $90^\circ/\frac{\pi}{2}rad$ . O circuito PSD compara o sinal de entrada com o de referência através da sua sobreposição que resulta num batimento dependendo da fase entre os sinais bem como as suas frequências [2] tendo como output os sinais:

$$V_X^{PSD} = \frac{1}{2} V_S (\cos [(\omega_{Ref} + \omega_i) t + \phi] + \cos [(\omega_{Ref} - \omega_i) t + \phi]) \quad (6)$$

$$V_Y^{PSD} = \frac{1}{2} V_S (\sin [(\omega_{Ref} + \omega_i) t + \phi] + \sin [(\omega_{Ref} - \omega_i) t + \phi]) \quad (7)$$

Estes sinais são de seguida passados por filtros passa-baixo de modo a eliminar as componentes de frequência  $\omega_{Ref} + \omega_i$ . O lock-in devolve assim os sinais resultantes desta filtragem 8 e 9:

$$V_X \simeq \frac{1}{2} V_S \cos [(\omega_{Ref} - \omega_i) t + \phi] \sim \frac{1}{2} V_S \cos \phi \quad (8)$$

$$V_Y \simeq \frac{1}{2} V_S \sin [(\omega_{Ref} - \omega_i) t + \phi] \sim \frac{1}{2} V_S \sin \phi \quad (9)$$

O sinal de saída é convertido em grandezas típicas de um fasor:

$$R = \sqrt{V_X^2 + V_Y^2} \simeq V_S \quad (10)$$

$$\phi = \arctan \left( \frac{V_Y}{V_X} \right) \quad (11)$$

Sendo  $\phi$  a diferença de fase entre os dois sinais.

O lock-in tem de ter a sua largura de filtro passa-baixo adequada, deve escolher-se uma constante de tempo na ordem de grandeza das flutuações a determinar.

## II. OBJETIVOS

Explorando um lock-in enquanto amplificador pretendeu-se caraterizar o ciclo histerético magnético de uma amostra de níquel com um sistema de VSM (Vibrating Sample Magnetometer).

Também tínhamos como objetivo usar o lock-in enquanto aparelho de medida para sinais de baixa amplitude, isto é, usar o lock-in enquanto filtro de frequências.

## III. MÉTODO EXPERIMENTAL

### A. Acoplação de circuitos RL e estudo do Lock-in

Começámos por montar os circuitos A e B de 3 e verificar as nossas previsões IV.

Ligámos os geradores de sinal com frequências  $f_1$  e  $f_2$  e tentámos usar o sinal  $V_2$  de maior amplitude enquanto o de referência e o sinal  $V_1$  de menor amplitude como se fosse ruído. Na secção de Análise e discussão de resultados V serão abordados os aspetos que inviabilizaram esta parte da atividade laboratorial.

Estudámos como  $f_1$  influencia a tensão nos terminais de  $L_2$  bem como o efeito do acoplamento dos sistemas através das bobinas.

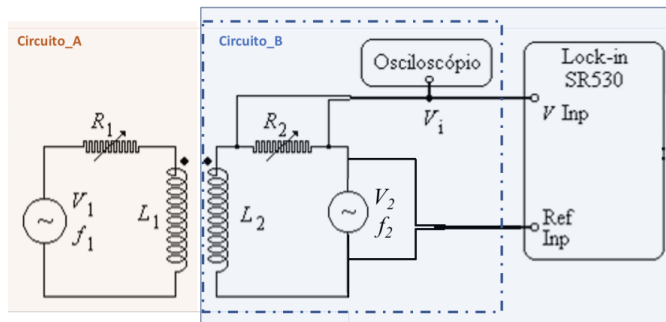


Figura 3. Circuitos RL para estudo

- 1)  $R_{1,2} = 230 \pm 5\Omega$
- 2)  $L_1$  Bobine 900Wd, 6Ω, 24mH
- 3)  $L_2$  Bobines 1200Wd, 12Ω, 37.5mH
- 4)  $V_{1,2}$  Geradores de sinal com frequências  $f_{1,2}$

### B. Medição do ciclo histerético

Começamos por efetuar a montagem 4 e obter o  $I_{max}$  da nossa montagem ( $I_{max} \simeq 1A$ ). Usar um valor de  $I$  superior a este resultaria no aquecimento da bobine devido a efeito de Joule e poderia danificar o equipamento. Usámos uma frequência de  $120.0 \pm 0.1Hz$  para o altifalante no VSM 4 com uma amplitude de modo a esta ser detetável nas bobines. Garantimos que o lock-in identificava o sinal de referência e variámos a corrente  $I$  registando a amplitude do sinal no lock-in estando este em modo de medição ( $R, \phi$ ). Variámos  $I$  do seguinte modo para percorrer todo o ciclo histerético.

- 1)  $I_{max} \rightarrow I = 0$
- 2) Inverter Polaridade
- 3)  $I = 0 \rightarrow I_{max}$
- 4)  $I_{max} \rightarrow I = 0$
- 5) Inverter Polaridade

$$6) I = 0 \rightarrow I_{max}$$

$$7) I_{max} \rightarrow I = 0$$

Foi seguido este percurso visto que se não variássemos o campo  $H$  de maneira "contínua" iríamos estar a fazer uma medição errada tendo em conta que a resposta de magnetização do material depende do seu historial magnético.

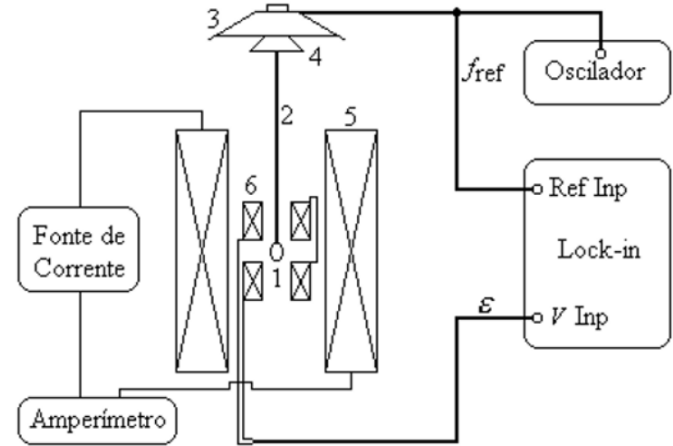


Figura 4. Sistema de VSM

- 1) Amostra Magnética de Níquel
- 2) Barra porta-amostra
- 3) Altifalante
- 4) Estrutura de Cartão
- 5) Bobine de campo
- 6) Bobines de deteção em série-oposição

## IV. PREVISÕES

Quando tivermos apenas o circuito A ligado esperamos medir nos seus terminais o sinal sinusoidal apenas gerado pelo gerador  $V_1$  nos terminais da bobine  $L_1$ .

Quando acoplarmos os dois circuitos através das duas bobines e ligarmos apenas o gerador de sinal  $V_1$  o campo magnético variável pela bobine  $L_1$  irá induzir na bobine  $L_2$  uma tensão pela lei de Faraday 3. Os dois sinais, o que percorre o circuito A e o que percorre o circuito B irão estar desfazados de  $90^\circ$  mas com iguais frequências.

Quando ligarmos os dois geradores de sinal com os sistemas acoplados, no circuito B o sinal lido será a sobreposição dos sinais gerados por  $V_1$  e  $V_2$  que estarão desfazados. Se aproximarmos as duas frequências poderemos verificar o fenómeno de batimento [2].

No uso do VSM quando o usar em modo ( $R, \phi$ ) espero obter  $V_S$  ou seja a amplitude do sinal e para  $\phi$  a fase do sinal que pode ser ajustado para um valor arbitrário.

## V. ANÁLISE E DISCUSSÃO DE RESULTADOS

### A. Acoplamento entre circuitos

Ligando apenas o circuito A ao medir a tensão nos seus terminais verificámos um comportamento sinusoidal como esperado garantindo assim que este tinha o comportamento desejado.

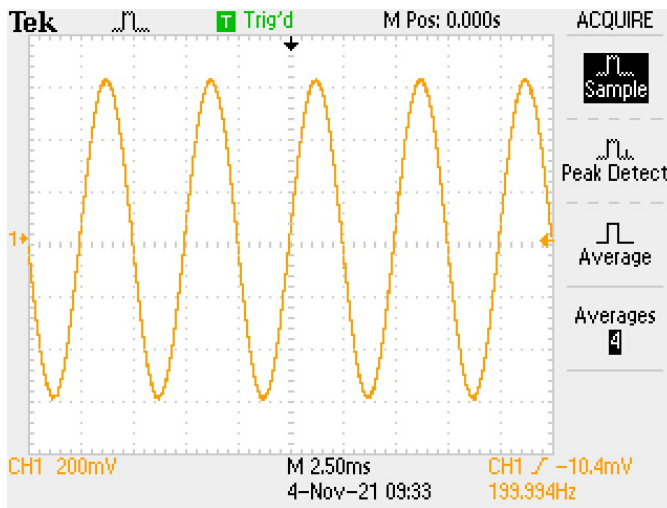


Figura 5. Tensão nos terminais de  $L_1$  apenas com o circuito A ligado

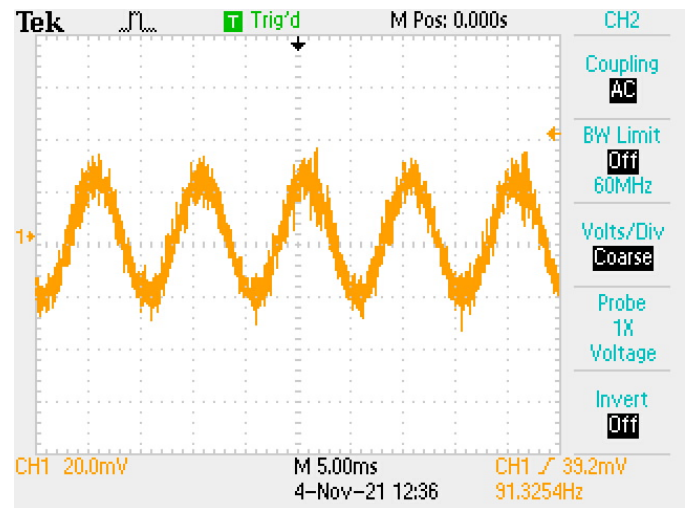


Figura 7. Sinal induzido no circuito B para  $f = 91,0 \pm 0,1\text{Hz}$

Verificámos a lei de Faraday 3 qualitativamente ao acoplar os dois circuitos  $RL$  e estando apenas o gerador de sinal do circuito A ligado medimos a tensão nos terminais de  $R_2$ .

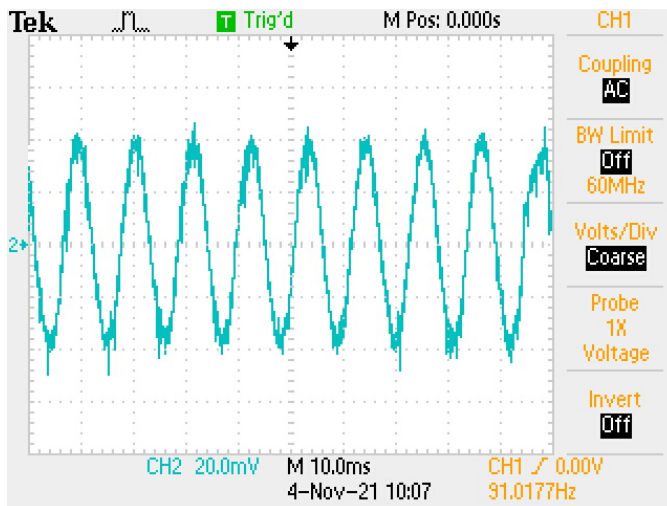


Figura 6. Tensão nos terminais de  $R_2$  com circuitos acoplados sem fonte  $V_2$  ligada

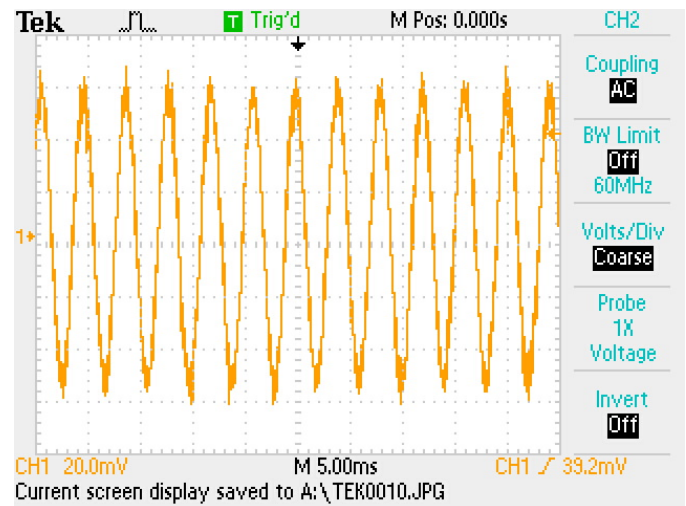


Figura 8. Sinal induzido no circuito B para  $f = 250,0 \pm 0,1\text{Hz}$

Verificámos que quando aumentávamos o valor de  $f_1$  a amplitude do sinal induzido pelo circuito A no circuito B aumentava. Tal é coerente com a lei de Faraday quando o sinal gerado por  $V_1$  é sinusoidal. Visto que a tensão induzida na bobine 2 é igual a menos de um sinal à variação do fluxo magnético sobre esta num dado intervalo de tempo o aumentar da frequência do sinal 1, fará com que o fluxo varie mais num mesmo intervalo de tempo e teremos portanto uma maior tensão induzida no circuito B A.

Quando ligámos os dois gerados de sinal  $V_1$  e  $V_2$  observámos que o sinal nos terminais da resistência  $R_2$  foi o previsto teoricamente tendo sido observado um batimento:

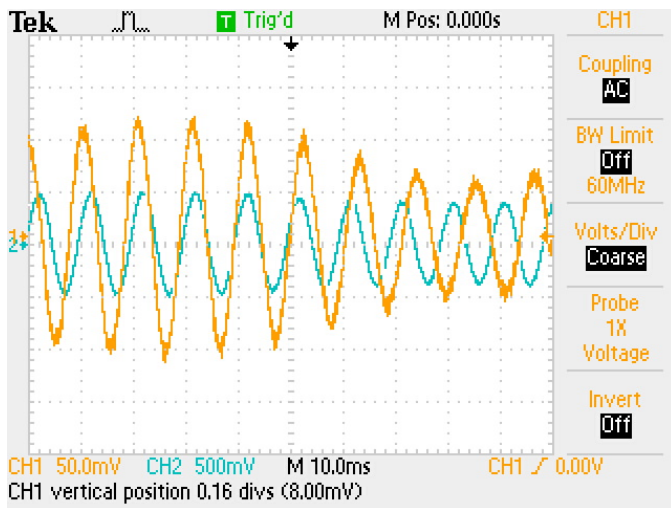


Figura 9. Batimento obtido com  $f_1 = 93,0 \pm 0,1 \text{ Hz}$  e  $f_2 = (1,0 \pm 0,1) \times 10^2 \text{ Hz}$

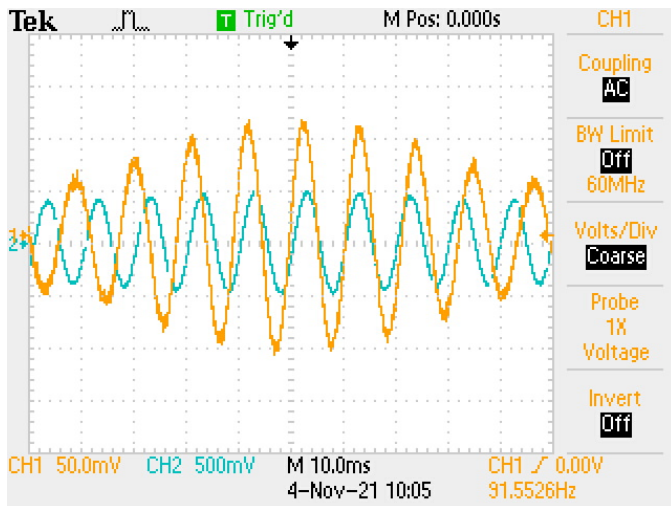


Figura 10. Batimento obtido com  $f_1 = 91,0 \pm 0,1 \text{ Hz}$  e  $f_2 = (1,0 \pm 0,1) \times 10^2 \text{ Hz}$

### B. Lock-in enquanto filtro

A quando a tentativa de utilização do lock-in enquanto filtro surgiram problemas e não conseguimos obter resultados para efetuar o seu estudo. Começámos por ter de trocar as fontes de tensão  $V_{1,2}$  de circuitos visto que uma delas apenas conseguia fornecer uma dada amplitude de sinal, tendo portanto de fazer o papel de ruído. Quando aumentávamos o sinal  $V_1$ , a fazer o papel de ruído obtínhamos o seguinte sinal que se apresentava sinusoidal mas que a partir de uma dada frequência saturava.

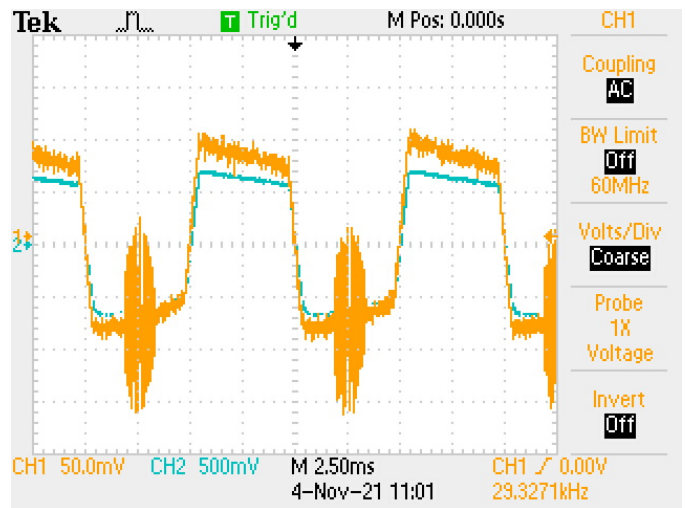


Figura 11. Sinal lido na tentativa de uso do lock-in enquanto filtro

Tal resultado evidencia algum tipo de mau contacto aspeto que foi combatido pelos experimentalistas ao longo de toda a atividade laboratorial. Neste caso tal não permitiu o estudo do lock-in enquanto filtro.

### C. Histerese Magnética

No estudo da Histerese foi efetuado um ajuste com uma função de Brillouin 1 com argumento de  $c(x - B_0)$  e multiplicada por uma constante  $a$ . A função de Brillouin descreve ciclos histeréticos de materiais de paramagnéticos mas visto que temos um gráfico de quantidade proporcionais a  $\vec{M}$  e  $\vec{H}$  então temos de usar fatores de correção  $a, c, B_0$  ao efetuar o ajuste aos dados experimentais obtidos.

Foram feitos dois ajustes ao ir de  $I_{max}$  para  $I_{min}$  e vice-versa. É de notar que para inverter o sentido de  $\vec{H}$  teve de se trocar a polarização da fonte de tensão. Tal foi efetuado meramente trocando os cabos das entradas da fonte de tensão. Ao efetuar a troca verificamos que surgiu um offset ao haver um "salto" no  $\varepsilon$  medido. Em torno de  $I = 0$  os pontos experimentais apresentam assim maiores resíduos. Tal offset é típico de quando se muda alguma configuração/escala de um aparelho eletrónico a meio de medições.

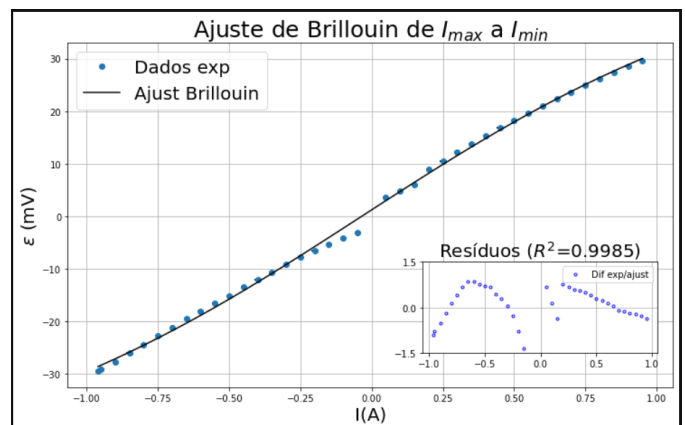


Figura 12. Ajuste de Brillouin aos dados experimentais com parâmetros:  $a = (6,6 \pm 0,6) \times 10^1 \text{ mV}$ ,  $c = 1,6 \pm 0,2 \text{ A}^{-1}$ ,  $B_0 = (-3,4 \pm 0,4) \times 10^{-2} \text{ A}$



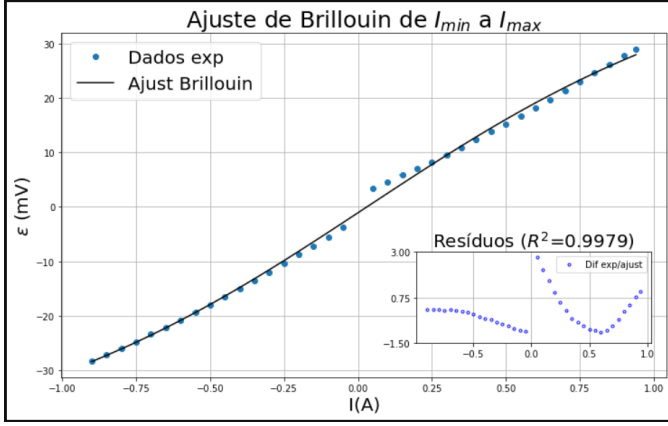


Figura 13. Ajuste de Brillouin aos dados experimentais com parâmetros:  $a = (6, 0 \pm 0, 5) \times 10^1 mV$ ,  $c = (1, 8 \pm 0, 2) A^{-1}$ ,  $B_0 = (3, 0 \pm 0, 4) \times 10^{-2} A$

Não são apresentados barras de erro visto que são muito pequenas para serem visíveis no gráfico  $u(\varepsilon) = 0.003 mV$  e  $u(I) = 0.01 A$ . É de notar que os resíduos não apresentam distribuições completamente aleatórias. Pode ser visto que o offset em torno de  $I = 0$  tem uma manifestação clara. Concluímos assim que a função de Brillouin se ajusta bem ao perfil histerético observado. Além disso ao obtermos curvas diferentes ao ir de  $I_{max}$  para  $I_{min}$  e vice-versa verificámos que o historial magnético da amostra afeta portanto a sua magnetização  $\vec{M}$  quando sujeito a um mesmo campo magnético externo  $\vec{H}$  neste caso, quando uma mesma frequência percorre o sinal.

#### D. Perguntas do protocolo [1]

- 1) Porque estão as bobines de deteção do VSM 4 em série-oposição?

Quando a bobine de campo induz um campo magnético nas bobines de deteção que podemos aproximar como uniforme visto que o comprimento da bobine de campo é muito superior ao das de deteção estas vão ter tensões induzidas simétricas que se vão cancelar. Medimos assim apenas o campo devido à magnetização da amostra a ser estudada. Se as bobines não estivessem em série-oposição seria introduzido um erro sistemático inviabilizando a experiência visto que como o campo  $\vec{H}$  aplicado, é superior ao gerado pela amostra  $\vec{B}$  a tensão medida seria principalmente devida ao campo de excitação e não ao da amostra magnetizada.

- 2) Porque é que a barra porta-amostra deve ser não-magnética?

A barra não pode ser magnética pois se tal fosse, também a sua magnetização produziria um campo magnético e estaria a ser medida nas bobines de deteção introduzindo um erro sistemático na experiência.

- 3) Faça uma estimativa do campo magnético máximo aplicado.

Aplicando a lei de ampere à bobine e assumindo o campo no interior uniforme obtemos que o campo no interior da bobine é  $B = \frac{NI\mu_0}{l}$ . Estimamos uma ordem de grandeza tomando  $N \sim 10^2$ ,  $I_{max} \sim 1 A$  e  $l \sim 10^{-1} m$ . Obtemos  $B_{max} \sim 1.26 \times 10^{-4} T$ .

- 4) Se a fase  $\phi_0$  for ajustada de forma a que os sinais entrada-ref fiquem em oposição de fase, que impacto teria nas medidas?

Se tivéssemos  $\phi_0 = \frac{\pi}{2}$  então no lock-in mederíamos uma mesma amplitude. Nas medidas de  $V_x$  e  $V_y$  teríamos  $V_y = 0$  e toda a medida da amplitude em  $V_x$  I-D.

- 5) Em geral, a fase 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  $\varepsilon(t)$ , em relação ao sinal que alimenta o altifalante.

Ao ir de  $I_{max}$  para  $I_{min}$  a fase média foi de  $\phi_0 = 129,6^\circ \pm 0,3^\circ$ . Tal é devido ao facto do sinal induzido devido ao acoplamento de circuito ser desfazado de  $\frac{\pi}{2}$  radianos e da indutância e impedância das bobines de deteção não ser nula atrasando assim o sinal. Poder-se-ia medir até a indutância e impedância das mesmas ao estudar a diferença de fase no lock-in.

#### E. Aspetos a melhorar numa próxima execução e fontes de erro experimental

- 1) Efetuar as medidas no lock-in para o estudo do ciclo histerético estando o sinal de referência e o sinal a medir em quadratura, ou seja, desfazados de  $\frac{\pi}{2}$  tal pode ser alterado diretamente no lock-in através de um offset.
- 2) Numa próxima execução devemos tentar chegar a um regime de saturação. Tal pode ser feito aplicando uma maior corrente tendo no entanto as bobines de ser de um material com menor capacidade térmica mássica para não aquecerem tão facilmente. Em alternativa poder-se-á alterar o VSM acrescentando núcleos de ferro (não vibrantes) em torno da amostra de modo a que para uma mesma corrente pudéssemos ter campos magnéticos aplicados  $\vec{H}$  com maior intensidade para uma mesma corrente.
- 3) Devemos efetuar a montagem experimental com cabos diferentes de modo a evitar maus contactos que inviabilizem a experiência. Estes também deveriam ser de comprimentos mais variados do que os que tínhamos disponíveis de modo a não ter cabos curtos demais (ficarem esticados leva a possibilidade de maus contactos) nem compridos demais (maior energia dissipada por efeito de Joule).
- 4) A montagem experimental estava ao lado de uma janela aberta em corrente de ar devido às condições climáticas, tal propicia um ambiente mais humido no qual os aparelhos de medida eletrónicos já não apresentam uma medição tão precisa. Devia ter-se fechado a janela.
- 5) Modelizámos em 4 que a amostra iria oscilar apenas na direção vertical mas tal pode não se verificar visto que a barra porta-amostra pode não estar completamente vertical ou a estrutura de cartão que o suporta lassa. Argumentos de alinhamento como este valem também para as bobines de deteção que se não estiverem completamente paralelas podem estar a medir parte do campo de excitação quando este é variado.

## VI. CONCLUSÃO

Verificámos qualitativamente a lei de indução magnética de Faraday 3 ao acoplar dois circuitos RL. Podemos verificar o fenómeno de batimento ao sobrepor dois sinais de frequências próximas.

Conseguimos medir com sucesso o ciclo histerético pelo VSM de uma amostra de níquel apesar de não termos chegado a um regime de saturação 1. Os resultados obtidos mostraram-se coerentes com as funções de Langevin 2 teóricas que pretendem modelizar este sistema.

Não conseguimos usar o lock-in enquanto filtro para medir sinais de baixa amplitude devido a maus contactos.

## APÊNDICE

Seendo  $V$  o volume da amostra e  $\vec{H} = H\hat{u}_z$  o campo magnético aplicado pela bobine de campo o momento magnético total da amostra é dado por  $\vec{m} = VM\hat{u}_z$ . O momento magnético da amostra faz como que esta tenha um campo de indução magnética associado  $\vec{B}_{\vec{m}}(\vec{r})$  a amostra comporta-se em aproximação como um dipolo. Podemos expressar o fluxo pelas bobines de detecção nas posições  $z = \pm \frac{h}{2}$  para um dado valor  $m$  de magnetização por

$$\Phi_m^\pm(z) = \pm F\left(z \pm \frac{h}{2}\right)m \quad (12)$$

é de notar que esta função  $F$  depende da geometria da montagem do VSM, quão longe estão as bobines radialmente da amostra, quais as suas dimensões e qual o número de espiras destas. O fluxo total pelas duas bobines de detecção pode ser assim dado por:

$$\Phi_M(z) = K(z)m \quad (13)$$

$$K(z) = F\left(z + \frac{h}{2}\right) - F\left(z - \frac{h}{2}\right) \quad (14)$$

Ao calcular o fluxo magnético nas bobines de detecção deve se ter em conta o campo aplicado pela bobine de campo mas tal contribuição será aproximadamente nula por estas estarem em série-oposição (ver V-D).

Tomamos que a amostra é centrada em  $z = 0$  e que a sua oscilação pode ser descrita como

$$z(t) = A \cos(\omega t) \quad (15)$$

em que  $\omega = 2\pi f$  sendo  $f$  a frequência de oscilação do altifalante. É de notar que a amplitude de oscilação  $A$  deve ser suficientemente pequena para desprezar a variação espacial do campo aplicado. Usando a lei de Faraday 3 obtemos que:

$$\varepsilon = [K'(0)A\omega m] \sin(\omega t) \quad (16)$$

A partir da medida experimental da tensão induzida  $\varepsilon$  podemos assim determinar a magnetização  $M \propto m$  visto que:

$$\varepsilon(\omega) = K'(0) \times A \times \omega \times m \quad (17)$$

Através de uma amostra padrão poder-se-iam determinar os valores de  $K'(0)$  e  $A$ . Nesta atividade tal não foi efetuado visto que não disponibilizávamos de uma amostra padrão.

## REFERÊNCIAS

- [1] *Medida da magnetização com um magnetómetro de amostra vibrante*, 2020/2021. Protocolo fornecido em Laboratórios de Física 3.
- [2] A. P. French. *Vibrations and Waves*. CBS PUB & DIST PVT LTD INDIA, 2003.
- [3] David J. Griffiths. *Introduction to Electrodynamics*. PEARSON, 4th edition, 2012.