

Medida de magnetização com um magnetómetro de amostra vibrante

José P. S. Costa

Departamento de Física e Astronomia

Faculdade de Ciências da Universidade do Porto

29 de Outubro de 2021

Resumo

Neste trabalho foram analisados circuitos indutivos e a importância do lock-in aplicado em sistemas infetados com ruído, sendo este fundamental quando queremos medir valores nestas situações.

Observou-se ainda o comportamento histerético de um material ferromagnético recorrendo à técnica de VSM¹.

1. Introdução teórica

a. Indutores e circuitos RL

Uma bobine armazena energia num campo magnético quando uma corrente atravessa a mesma. O campo magnético é gerado dentro da bobine paralelo ao eixo desta, cujo sentido respeita a regra da mão direita e o modulo é tanto maior quanto maior for a corrente.

$$B \approx \mu \frac{NI}{l}$$

Ao aproximar duas bobinas ocorre um efeito de indução magnética, onde as bobines provocam fluxos de campo magnético uma na outra, onde fazem variar a sua diferença de potencial.

Um circuito RL tem a seguinte representação:

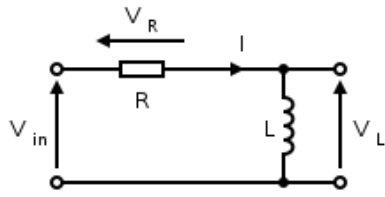


Figura 1: Circuito RL

Onde $V_L = \frac{L_s}{R+L_s} V_{in}$, quando V_{in} é uma onda sinusoidal $s = \omega i$ temos então:

$$V_L = \frac{L\omega i}{R + L\omega i} V_{in} = \frac{L\omega i (R - L\omega i)}{R^2 + L^2\omega^2} V_{in} = \frac{1}{\sqrt{(\frac{R}{L2\pi f})^2 + 1}} e^{i\varphi} V_{in} : \varphi = \arctan(\frac{R}{L2\pi f})$$

Sabe-se então que a diferença de potencial nos terminais da bobine depende da tensão de entrada a menos de uma constante de multiplicação que aumenta com frequência e uma diferença de fase que diminui com a mesma.

b. Técnica de VSM – Vibrating Sample Magnetometer e Histerese Magnética

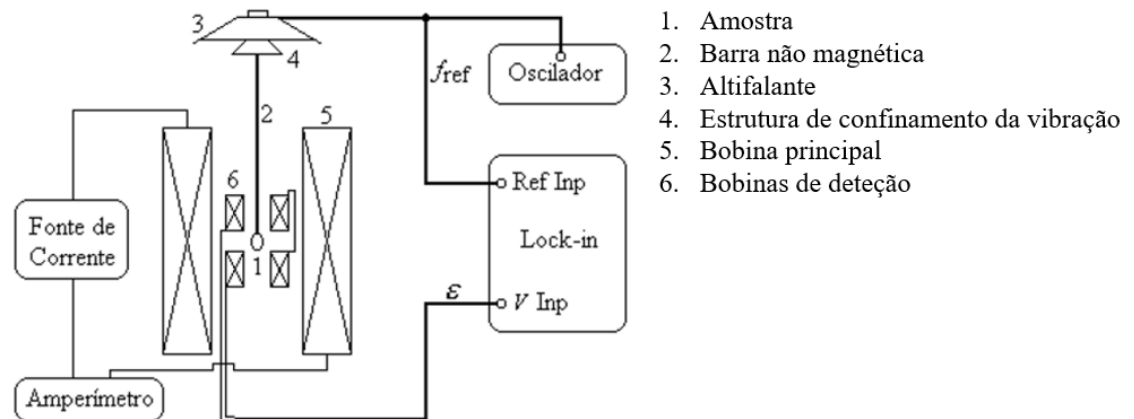


Figura 2: Esquema de montagem do VSM

O magnetómetro de amostra Vibrante, figura 2, utilizado na realização deste trabalho, consiste numa amostra colocada na extremidade inferior de uma barra não magnética, por exemplo PVC, de modo a não influenciar a magnetização de interesse. Esta barra sofre oscilação de uma dada frequência devido a um sistema constituído por um altifalante e uma estrutura que permite confinar a vibração a uma direção vertical. Este movimento é paralelo ao eixo duma bobine principal que produz um campo magnético, H , e de outras duas interiores idênticas em oposição-série, de modo a serem insensíveis à variação do campo magnético externo, mas detetando variações de fluxo magnético causadas pela vibração da amostra. Opta-se ainda por esta configuração, para que possíveis campos gerados por estas duas se anulem.

Assim o material em estudo irá sofrer uma magnetização, M provocada por H , que se manifesta pelo aparecimento de um campo magnético.

Uma vez que a nossa amostra está a vibrar, o fluxo magnético, nas bobinas de deteção também irá variar (esta variação deve ser tal que $\frac{dH}{dt} \approx 0$). Segundo a lei de Faraday-henry, isto irá reduzir nas bobinas a deteção de uma força eletromotriz:

$$\varepsilon(t) = -\frac{d\varphi_M}{dt} \rightarrow \varepsilon(\omega) = KA\omega m$$

em que K e A dependem da geometria do sistema, ω é a frequência de oscilação do sistema e $m = VM$ (V = volume de amostra).

A variação de ε com o campo aplicado ($\sim I$) reproduz uma boa aproximação aos aspetos quantitativos e qualitativos de M vs H sendo possível estudar o ciclo histerético de material para o campo em causa.

O ciclo histerético tem um aspeto similar ao da figura 3, mostrando como é que a magnetização do material se comporta com o campo aplicado, sendo interessante pelo facto de a magnetização ser não nula mesmo sem haver H .

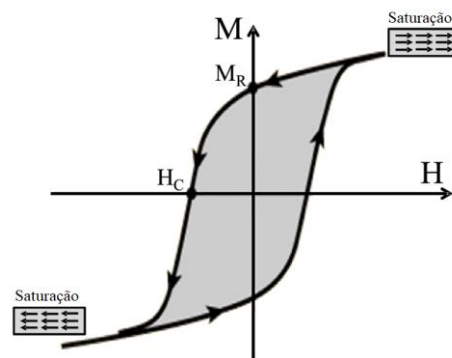


Figura 3: Ciclo Histerético

c. Técnica Lock-in

A técnica lock-in é extremamente, utilizada na medição de sinais periódicos com muita baixa razão sinal/ruído. O funcionamento deste dispositivo baseia-se no diagrama seguinte:

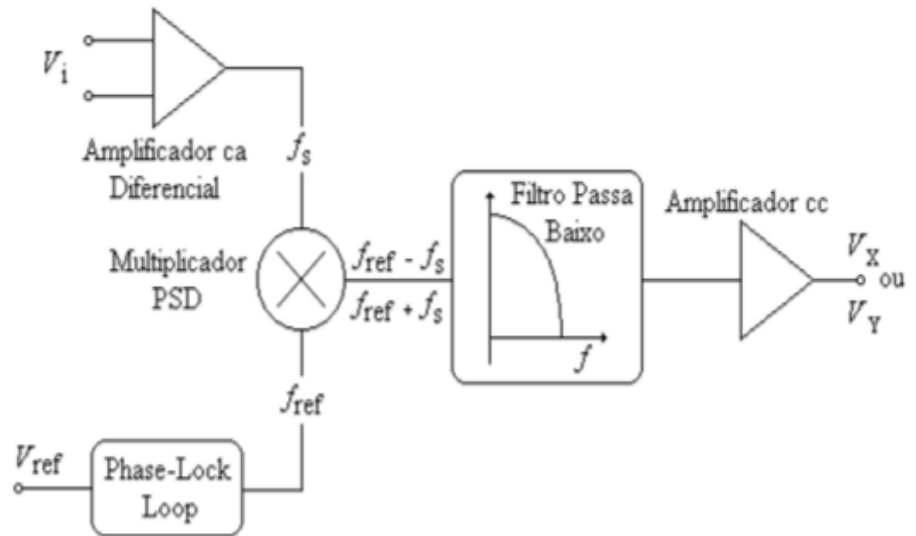


Figura 4: Diagrama de blocos simplificado do Lock-in

Em que os componentes fulcrais são o “Phase-lock loop” (PLL), responsável por detetar a frequência do sinal de referência (que é um sinal retangular cuja frequência é igual à da componente de interesse) gerando uma onda sinusoidal com essa frequência, e o multiplicador PSD (representado com uma bola e um X) que compara o $V_{entrada}$ com o sinal gerado pelo PLL resultando no batimento entre sinais que é sensível à fase.

Assim, este dispositivo retorna um sinal DC proporcional a $V_{entrada}$, tal que $(f_{ref} - f_{entrada})$ está contido na largura do filtro passa-baixo.

É possível medir o sinal de saída como um fasor de forma cartesiana (V_x, V_y), ou polar (V, φ) tal que:

$$V = \sqrt{V_x^2 + V_y^2} ; \varphi = \arctan\left(\frac{V_x}{V_y}\right)$$

d. Objetivos

- Solidificar os conceitos e utilização do Lock-in
- Medição do ciclo histerético de uma amostra ferromagnética à temperatura ambiente pela técnica VSM

2. Materiais e Métodos

a. Demonstração da técnica lock-in de circuitos indutivos acoplados

Procedeu-se à montagem dos circuitos representados na figura 5, com as duas bobinas, onde $L_1=24\text{mH}$ e $L_2 = 35\text{mH}$, e com $R_1 = 6\ \Omega$ e $R_2 = 12\ \Omega$, duas fontes geradoras de sinal. Foi então possível estudar a influência da frequência na fase e na amplitude.

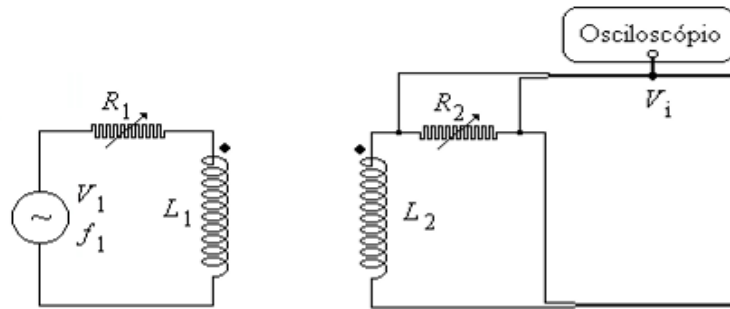


Figura 5: circuitos RL (a) e (b) respetivamente

Nestes circuitos apenas foi estudado a variação nos terminais das bobinas 1 e 2 e ver o que acontecia quando se juntavam estas sem o uso do lock-in.

De seguida ligou-se o circuito esquematizado na figura 6 e foi estudada o comportamento da bobine 2 nas diferentes condições agora com o lock in.

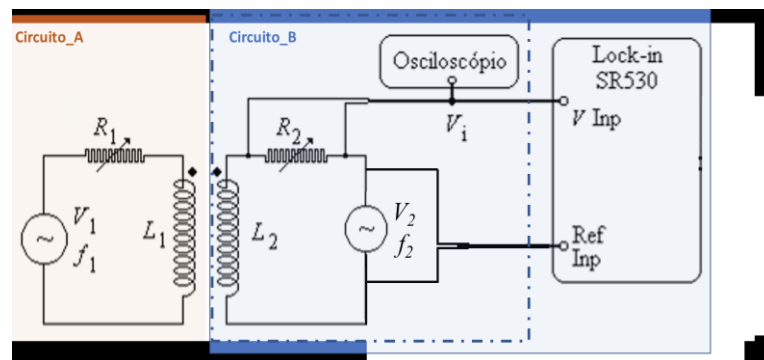


Figura 6: Circuito final Ligado ao lock-in

b. Medida do ciclo Histerético duma amostra ferromagnética com magnetómetro VSM

Usou-se o circuito da figura 2, com gerador a 120 Hz. Tendo em conta a eletrónica da fonte usada, iniciou-se as medições num V_{\max} , que corresponde a um $I_{\max} = 0.961\text{ A}$, e diminui-se esta diferença de potencial até 0 V, de seguida, inverteu-se a polarização da fonte e aumentou-se a diferença de potencial até V_{\max} . Repetiu-se este procedimento, mas de forma inversa. Ao longo desta parte

da atividade fez-se o registo da corrente indicada na fonte de corrente, multímetro, V_x e V_y do lock-in.

3. Resultados e Análise de dados experimentais

a. Demonstração do lock-in em circuitos indutivos acoplados

Consegue-se perceber pelas imagens abaixo que quando as bobines estão afastadas, o sinal dos terminais da bobine em estudo é sinusoidal sem qualquer tipo de anomalias. Ao aproximar as duas bobines com os eixos destes paralelos, vai haver uma maior interferência notada nas “montanhas” e “vales” do sinal. Tirando novamente as bobines deste acoplamento, vemos que não se observa qualquer interferência. A interferência ocorre devido ao facto de as bobines estar a induzir um campo magnético numa sobre a outra, o que faz com que haja oscilações quando estas estão acopladas com os seus eixos em paralelo.

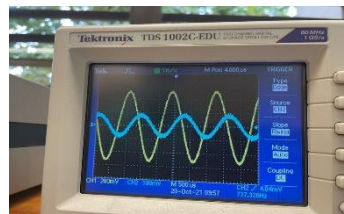


Figura 7: Bobines separadas (não há indução mútua, escalas CH1– 100mV e CH2 –

100mV)

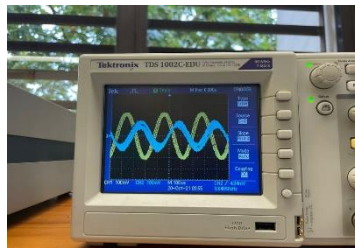


Figura 8: Bobines quasi-acopladas (Nota-se uma pequena indução nas bobines, escalas CH1 – 100mV e CH2 – 100mV)



Figura 9: Bobines acopladas com eixos em paralelo (Indução mútua, escalas CH1 – 100mV e CH2 – 100mV)

b. Medida do ciclo histerético numa amostra ferromagnética com o magnetómetro VSM

Fez um registo dos dados e obteve-se o seguinte gráfico representado na figura 10:

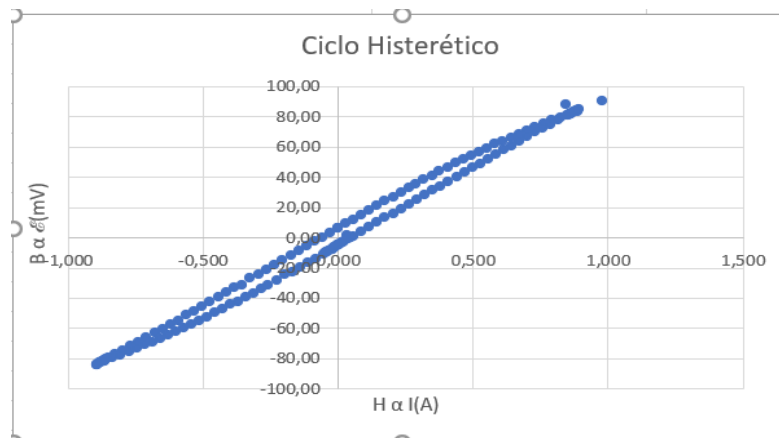


Figura 10: Ciclo histerético de uma amostra ferromagnética

Após fazer-se uma projeção linear dos dados deste gráfico obteve-se os gráficos da figura 11; o facto de usar o V_x (Força eletromotriz) e o I (Corrente que sai da fonte) para se fazer o gráfico da figura 10, deve-se ao facto de usando as equações da força eletromotriz $\varepsilon \propto m$, sendo por isso fácil de determinar a magnetização $M \propto m$ a partir da força eletromotriz experimental retirada do lock-in. Temos então que $B \approx \frac{\mu N I}{l}$, logo sabendo a que $n = \frac{N}{l}$ (densidade) podemos fazer que $H = \frac{B}{\mu}$, onde se consegue retirar que ($H \propto I$) e ($B \propto \varepsilon$).

Por isso uma estimativa do campo magnético máximo pode ser dada por:

$$n_{\text{cobre}} = 8,96 \text{ g/cm}^3$$

$$B_{\text{max}} \approx n I_{\text{max}} \rightarrow B_{\text{max}} = (2.31 \pm 0.03) \text{ mT}$$

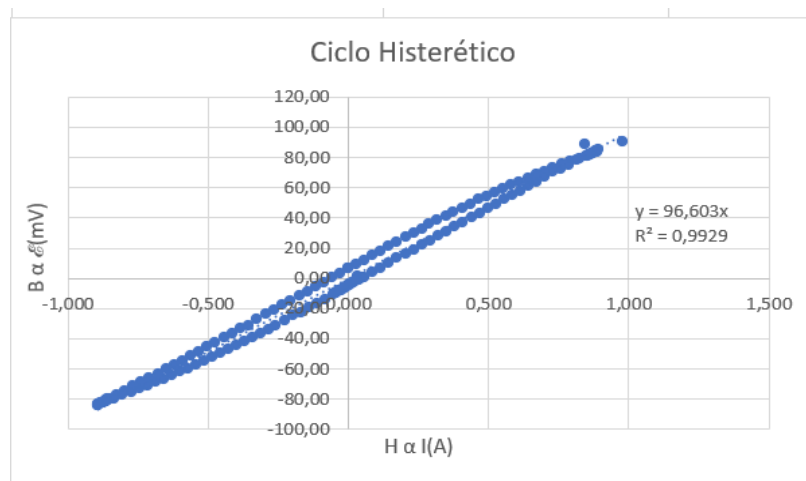


Figura 11: Gráfico com projeção linear e valor de R^2

Como vemos o r^2 tem uma boa precisão o que é sustentado pelo uso da função Proj.lin do Excell. Ainda há uma questão importante a ser abordada como se observa nas curvas dos gráficos, é que na subida e descida dos valores de corrente durante a troca de polarização os valores não vão ser totalmente simétricos, o que é contrário ao esperado, isto deve estar relacionado com o facto de que quando subimos a corrente, parte da corrente já passou pela a bobine, que por este efeito começa a aquecer por efeito de joule, isto faz com que a energia da bobine usada para gerar o campo magnético seja menor, e assim provocar uma diminuição da área por baixo do ciclo histerético. Assim confirma-se a assimetria dos resultados.

Por último fez uma análise de dados para tentar ajustar uma função Brillouin, aproximada pela função Langevin, seguem os gráficos teóricos em anexo:

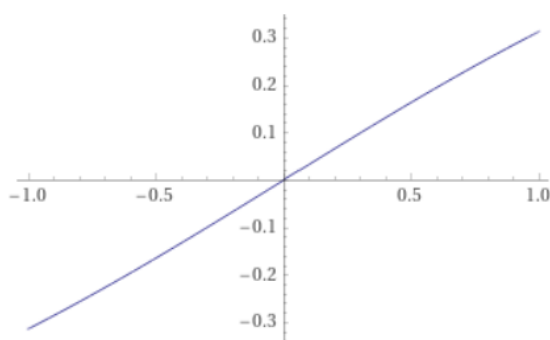


Figura 12: Gráfico da função Langevin com $I \in [-1,1]$

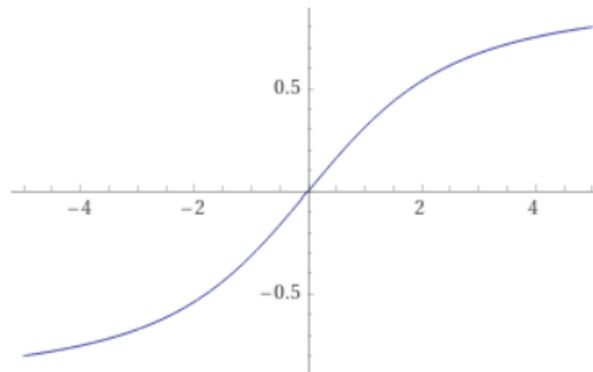


Figura 13: Gráfico da função Langevin com $I \in [-5,5]$

Ao fazer um estudo teórico da fórmula de Brillouin verificamos que a função não vai ser possível de representar praticamente com os dados obtidos, pois temos um conjunto de parâmetros livres, como $M_{\text{saturação}}$, que não conseguimos calcular. No entanto usando a fórmula de Langevin a partir do uso do Mathematica conseguimos traçar um gráfico teórico com um determinado limite de x , verificamos que de facto nas condições experimentais do laboratório não seria possível atingir o regime de saturação, pois trabalhos com correntes de 1A máximo. Uma das formas para ultrapassar esta dificuldade, assim como a assimetria observada no trabalho experimental, era usar um núcleo ferromagnético, que fazia com que o campo magnético para a mesma corrente aplicada aumenta-se, no entanto este método apresentava dificuldades na conversão da corrente/campo; outra forma de conseguirmos contornar o problema era mudar as características geométricas da bobine.

4. Conclusão

Na primeira parte do trabalho estudaram-se circuito RL e a importância do lock-in neste tipo de circuitos quando infetados com ruído. É possível observar deformações nas “montanhas” e “vales” na diferença de potencial das bobines quando os campos magnéticos estão a interagir com os outros gerados por outras indutâncias (indutância mútua). Quando as bobines estão na posição de maior interferência, nota-se que o ruído se mantém para qualquer frequência. Aqui neste contexto vimos então a eficiência do lock-in em isolar o sinal pretendido, retornando valores com flutuações quase nulas.

Na parte do estudo do ciclo histerético foi possível observar o comportamento Histerético de B vs H ($B \sim Vx$ e $H \sim I$).

Neste trabalho foi verificado que ao se usar um sistema de arrefecimento, ou sistemas de **compensação da energia reativa** recorrendo a **baterias de condensadores**, por exemplo, quando fazemos este tipo de trabalhos, conseguíamos garantir uma maior gama experimental e uma simetria mais adequada, visto que não temos acesso a este tipo de sistemas, certos erros ocorreram como já foi mencionado na explicação da análise de dados.

Nota: As fórmulas de erro usadas na realização deste trabalho estão mencionadas na bibliografia a partir de um link associado.

Bibliografia/Referências

1. *Protocolo: Medida da Magnetização com um magnetómetro de amostra vibrante 2021, laboratórios de física III*
2. *David J. Griffiths, Introduction to electrodynamics, Cambridge University Press, 2017*
3. *Circuito RL.* https://pt.wikipedia.org/wiki/Circuito_RL
4. *Brillouin and Langevin functions. Online; acedido a 15 Dezembro 2020. url: https://en.wikipedia.org/wiki/Brillouin_and_Langevin_functions*
5. https://en.wikipedia.org/wiki/Propagation_of_uncertainty
6. <https://www.wolframalpha.com/input/?i=plot%28coth%28x%29-1%2Fx%2C%7Bx%2C-5%2C5%7D%29>