



**Universidade de  
Aveiro**  
Ano 2017/2018

Departamento de Física

**RAFAEL NUNES  
CORREIA**

**Sistema de medição de temperatura por  
termometria IV em campo magnético variável**





**RAFAEL NUNES  
CORREIA**

**Sistema de medição de temperatura por  
termometria IV em campo magnético variável**

Dissertação apresentada à Universidade de Aveiro para cumprimento dos requisitos necessários à obtenção do grau de Mestre em Engenharia Física realizada sob a orientação científica do doutor Daniel Silva, bolsheiro de pós-doutoramento do Departamento de Física da Universidade de Aveiro e coorientação do doutor João Amaral, Investigador Auxiliar do Departamento de Física da Universidade de Aveiro.

Este trabalho foi desenvolvido no âmbito do projeto CICECO-Instituto de Materiais de Aveiro, POCI-01-0145-FEDER-007679 (Ref<sup>a</sup>. FCT UID/CTM/50011/2013), financiado por fundos nacionais através da FCT/MEC e quando aplicável cofinanciado pelo FEDER, no âmbito do Acordo de Parceria PT2020. O financiamento pela FCT (projeto IF/01089/2015) é reconhecido.

O presente estudo foi realizado no âmbito do Projeto Smart Green Homes [POCI-01-0247-FEDER-007678], desenvolvido em co-promoção entre a Bosch Termotecnologia S.A. e a Universidade de Aveiro. É financiado pelo Portugal 2020, no âmbito do Programa Operacional Competitividade e Internacionalização, e pelo Fundo Europeu de Desenvolvimento Regional.



Dedico este trabalho à minha namorada, aos meus pais e à minha irmã pelo incansável apoio.



**o júri / the jury**

presidente / president

**Margarida Maria Resende Vieira Facão**

Professora Auxiliar do Departamento de Física da Universidade de Aveiro

vogais / examiners committee

**Daniel José da Silva**

Bolseiro de pós-doutoramento do Departamento de Física da Universidade de Aveiro

**João Oliveira Ventura**

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





**agradecimentos**

Agradeço aos meus orientadores, os doutores Daniel Silva e João Amaral, pela atenção e pela ajuda incansável ao longo de todo o trabalho.

Agradeço também a todos os associados ao Departamento de Física que me ajudaram neste processo, nomeadamente, Tiago Santos, José Januário, Fernando Oliveira e o doutor João Horta Belo.



**palavras-chave**

Efeito magnetocalórico, medição direta, câmara de IV, atuador linear, Halbach, motor de passo.

**resumo**

O número de protótipos de refrigeradores magnéticos tem vindo a aumentar na última década. O princípio de funcionamento baseia-se no efeito magnetocalórico em que a aplicação de campo magnético induz variações adiabáticas de temperatura. O presente trabalho propõe a montagem e teste de um sistema de medição de temperatura em campo magnético variável, utilizando termometria de infravermelhos, com o objetivo de: (i) efetuar medições diretas do efeito magnetocalórico e (ii) observar o fenómeno térmico *“heating by sweeping”*.

Com o sistema montado, observou-se o efeito magnetocalórico numa amostra de gadolínio, obtendo variações adiabáticas de temperatura de 1.6 °C num campo magnético de 1 T. Verificou-se a existência de dois processos térmicos após a aplicação de campo: dissipação de calor para o exterior da amostra e a condução interna de calor.

Devido ao perfil largo do campo magnético produzido pelo Halbach e no facto da amostra apresentar um comprimento reduzido, não foi possível medir o efeito *“heating by sweeping”*. Este trabalho discute em detalhe as razões e alternativas para a implementação do efeito de *“heating by sweeping”*.



**keywords**

Magnetocaloric effect, direct measurement, IR camera, linear actuator, Halbach, stepper motor.

**abstract**

The number of magnetic refrigerator prototypes has been increasing in the last decade. The principle of operation is based on the magnetocaloric effect in which the application of magnetic field induces adiabatic variations of temperature. The present work proposes the assembly and testing of a variable magnetic field temperature measurement system, using infrared thermometry, with the follow objectives: (i) making direct measurements of the magnetocaloric effect and (ii) observing the thermal phenomenon "heating by sweeping".

With the system ready, the magnetocaloric effect was observed in a gadolinium sample, obtaining adiabatic temperature variations of 1.6 °C in a magnetic field of 1 T. Two thermal processes were observed after the magnetic field application: the heat dissipation to the exterior of the sample and the conduction of internal heat.

Due to the wide profile of the magnetic field produced by the Halbach and the fact that the sample has a reduced length, it wasn't possible to measure the "heating by sweeping" effect. This paper discusses in detail the reasons and alternatives for the implementation of the "heating by sweeping" effect.



# Índice

1.	Introdução.....	1
2.	Objetivos .....	3
3.	Conceitos Teóricos.....	3
3.1.	Efeito Magnetocalórico .....	4
3.2.	Medições do Efeito Magnetocalórico.....	6
3.2.1.	Medições Diretas.....	6
3.2.2.	Medições Indiretas .....	7
3.3.	Materiais Magnetocalóricos .....	7
3.3.1.	Classificação.....	8
3.3.2.	Gadolinio.....	9
3.4.	<i>Heating e Cooling by Sweeping</i> .....	10
4.	Design e Componentes da Montagem Experimental .....	13
4.1.	Design e Desenvolvimento do Sistema de Medição .....	13
4.2.	Atuador Linear .....	14
4.3.	Motor de Passo.....	15
4.4.	Driver de Micro Passo.....	19
4.5.	Halbach.....	20
4.6.	Câmara IV .....	21
5.	Setup e Método Experimental .....	22
5.1.	Modos de Movimento .....	22
5.1.1.	Movimento Linear, Acelerado e Desacelerado .....	22
5.1.2.	Implementação em Arduino .....	23
5.2.	Suportes e Setup .....	25
5.2.1.	Setup com Íman Nd-Fe-B.....	26
5.2.2.	Setup com Halbach.....	28
5.2.3.	Setup <i>Heating by Sweeping</i> .....	30

5.3.	Medição da Temperatura por Termometria IV .....	32
6.	Resultados e Discussão .....	33
6.1.	Efeito Magnetocalórico .....	34
6.1.1.	Íman Nd-Fe-B .....	34
6.1.2.	Halbach.....	38
6.2.	<i>Heating by Sweeping</i> .....	45
7.	Conclusões .....	47
8.	Referências.....	47



## Lista de Figuras

<b>Figura 1.</b> Representação do comportamento S vs T de um material ferromagnético, ilustrando o efeito magnetocalórico [1]. .....	5
<b>Figura 2.</b> Representação esquemática das diferenças entre materiais de primeira e segunda ordem para (a,b) magnetização e (c,d) o calor específico. Adaptado de [26]. .....	9
<b>Figura 3.</b> Variações adiabáticas da temperatura do Gd, $\Delta T_{ad}$ (K), em função de T(K) para diferentes variações de campo magnético [38]. .....	10
<b>Figura 4.</b> Representação esquemática de um refrigerador magnético de estado sólido com o efeito “cooling by sweeping”. Setas a vermelho representam o fluxo de calor. Adaptado de [20].	12
<b>Figura 5.</b> Diagrama representativo do movimento da amostra em relação ao Halbach, como forma de variação do campo magnético aplicado. ....	13
<b>Figura 6.</b> Representação ilustrativa do design do sistema de medição. ....	14
<b>Figura 7.</b> Modelo do atuador de parafuso de avanço utilizado [39]. ....	15
<b>Figura 8.</b> Representação do princípio de funcionamento básico de um motor de passo. O rotor (ímã permanente) encontra-se representado pelos pólos magnéticos S e N e o estator (bobinas) são representadas pelas letras A, B, A' e B'.....	16
<b>Figura 9.</b> Representação dos 4 modos de funcionamento de um motor de passo assim como os gráficos de ativação de cada uma das 4 bobinas em função do tempo. Adaptado de [28]......	17
<b>Figura 10.</b> Representação de um motor híbrido. O rotor encontra-se representado no centro, onde se observa a secção com a polaridade Sul a azul e atrás a secção com polaridade Norte. Encontram-se também representadas os dois conjuntos de 4 bobinas A e B.....	18
<b>Figura 11.</b> Motor de passo utilizado, NEMA 23.....	19
<b>Figura 12.</b> Driver TB6560 usada.....	20
<b>Figura 13.</b> Representação das linhas de intensidade do campo magnético num ímã (esquerda) e num Halbach (direita) [36]. ....	20
<b>Figura 14.</b> Halbach cilíndrico. ....	21
<b>Figura 15.</b> Câmera de IV usada, FLIR SC5000.....	22
<b>Figura 16.</b> Regressão linear e correspondente equação de reta do gráfico Velocidade (cm/s) vs Delay ( $\mu$ s). .....	24
<b>Figura 17.</b> Cabeçalho do código de Arduino. O utilizador pode definir o tipo de modo de movimento, bem como os parâmetros de cada um. ....	25
<b>Figura 18.</b> Amostra de Gd utilizada.....	25
<b>Figura 19.</b> Suporte de latão (esquerda) e abraçadeira de plástico (direita). ....	26
<b>Figura 20.</b> Ímã de Nd-Fe-B (esquerda) e torno utilizado para suportar o ímã (direita). ...	27

<b>Figura 21.</b> Amostra de gadolínio (cima) e íman (baixo) depois da aplicação da tinta spray preto.....	27
<b>Figura 22.</b> Setup com amostra móvel de perfil (esquerda) e frontal (direita) e íman fixo. ...	28
<b>Figura 23.</b> Setup com amostra fixa no torno e íman móvel. ....	28
<b>Figura 24.</b> Suporte do Halbach em madeira e grampos utilizados.....	29
<b>Figura 25.</b> Setup com o Halbach.....	29
<b>Figura 26.</b> Representação do Halbach simulado em COMSOL. ....	30
<b>Figura 27.</b> Perfil magnético do Halbach utilizado. A azul encontra-se representado a simulação feita em COMSOL e a preto e vermelho está representado o perfil magnético calculado com uma sonda magnética. ....	30
<b>Figura 28.</b> Representação do efeito <i>heating by sweeping</i> . ....	31
<b>Figura 29.</b> Setup para o processo de <i>heating by sweeping</i> .....	32
<b>Figura 30.</b> Exemplos de uma "atualização" da câmara de IV em duas situações diferentes. Direita: Monitorização da temperatura da amostra de Gd. Esquerda: Monitorização da temperatura da amostra e íman de Nd-Fe-B. O pico de temperatura geralmente ronda os 0.1 °C, pelo que requer bastante atenção quando se trabalha com variações temperatura nesta ordem de grandeza. ....	33
<b>Figura 31.</b> Captura de ecrã do <i>software Altair</i> exemplificando as áreas de interesse.....	33
<b>Figura 32.</b> Representação da variação de temperatura adiabática de uma amostra de Gd vs a temperatura inicial, para vários campos magnéticos. Os dados comparativos de uma amostra de $Gd_5Si_2Ge_{1.9}Ga_{0.1}$ são também mostrados [35]. ....	34
<b>Figura 33.</b> Temperatura (°C) vs Tempo (s) da amostra na configuração mostrada na Figura 31.....	35
<b>Figura 34.</b> Áreas de interesse no teste com a câmara de IV posicionada em frente à amostra e com um pano preto como cobertura. ....	36
<b>Figura 35.</b> Representação do comportamento Temperatura (°C) vs Tempo (s) correspondente à Figura 34. ....	36
<b>Figura 36.</b> Áreas de interesse no teste com a câmara de IV posicionada em frente ao íman com a amostra fixa no torno. Tanto a amostra como o íman encontravam-se pintados de preto.....	37
<b>Figura 37.</b> Representação do comportamento Temperatura (°C) vs Tempo (s) correspondente à montagem da Figura 36.....	38
<b>Figura 38.</b> Fotografia IV para a posição inicial e final da amostra do setup com o Halbach. Velocidade constante de 3,65 cm/s. ....	38
<b>Figura 39.</b> Temperatura (°C) vs Tempo (s) correspondente à montagem usada das fotografias IV da Figura 38. ....	39

<b>Figura 40.</b> Temperatura (°C) vs Tempo (s) correspondente a uma montagem semelhante à usada das fotografias IV da Figura 38, com um tempo de repouso de 30 s. ....	40
<b>Figura 41.</b> Ajuste de uma exponencial ao conjunto de dados referentes à Figura 39. ....	41
<b>Figura 42.</b> Ajuste de duas exponenciais ao conjunto de dados referentes à Figura 39. ....	41
<b>Figura 43.</b> Representação dos processos térmicos na amostra de Gd. (1) Condução de calor interno, (2) Dissipação de calor para o exterior. ....	42
<b>Figura 44.</b> Geometria e rede utilizada na simulação feita em COMSOL. O ponto preto representa o ponto de prova. ....	42
<b>Figura 45.</b> Evolução da temperatura no tempo do ponto de prova da Figura 44 extraído da simulação numérica e respetivo ajuste exponencial. ....	43
<b>Figura 46.</b> Geometria do sistema simulado (esquerda) e respetiva rede (direita). ....	43
<b>Figura 47.</b> Evolução da temperatura no tempo do centro da amostra de Gd e respetivo ajuste exponencial. ....	44
<b>Figura 48.</b> Secções percorridas pela amostra. ....	45
<b>Figura 49.</b> Temperatura de cada secção para os tempos de repouso de 30 segundos (azul), 15 segundos (vermelho) e 1 segundo (verde). ....	45

## Nomenclatura

$\Delta T_{ad}$ : Variação da temperatura adiabática.

$T_0$ : Temperatura inicial.

$H_F$ : Campo magnético externo final.

$H_0$ : Campo magnético externo inicial.

$T_F$ : Temperatura final.

$\Delta S_M$ : Variação isotérmica da entropia magnética.

$S$ : Entropia total.

$H$ : Campo magnético.

$T$ : Temperatura.

$S_S$ : Entropia estruturas sólidas.

$S_{el}$ : Entropia estruturas eletrônicas.

$S_M$ : Entropia estruturas magnéticas.

$\Delta H$ : Variação campo magnético aplicado.

$C$ : Calor específico.

$Gd$ : Gadolínio.

$Si$ : Silício.

$Ge$ : Germânio.

$\alpha$ : Difusividade térmica.

$k$ : Condutividade térmica.

$\rho$ : Densidade.

$c_p$ : Calor específico.

$PWM$ : Pulse Width Modulation.

$E^*$ : Energia térmica radiada por segundo por unidade de área de um corpo negro.

$c$ : Velocidade da luz.

$h$ : Constante de Planck.

$k$ : Constante de Boltzmann.

$\lambda$ : Comprimento de onda.

$\sigma$ : Constante de Stefan-Boltzmann.

$\varepsilon$ : Emissividade.

$V_0$ : Velocidade inicial.

$i$ : Secção.

$\Delta x$ : Distância percorrida.

$a$ : Aceleração.

$t_i$ : Tempo entre secção.

$\Delta t_i$ : Variação de tempo em cada secção.

$n$ : Número de rotações.

$m$ : Número de secções.

$\tau$ : Tempo total do movimento.

$t_r$ : Tempo de relaxação do processo de condução interno de calor.

$t_l$ : Tempo de relaxação do processo de dispersão de calor para o exterior.

(Página intencionalmente deixada em branco)

# 1. Introdução

Nas últimas décadas observou-se um despertar no interesse em magnetismo e materiais magnéticos com o aumento da influência destes na indústria e no dia a dia do Homem. Estes materiais desempenham um papel crucial em diversas aplicações, e.g. na indústria automóvel, na medicina (ressonâncias magnéticas), na eletrónica (discos rígidos e *MRAMs*), entre outros. Para além destes exemplos, os materiais magnéticos têm vindo a conquistar popularidade na refrigeração através do efeito magnetocalórico. Este consiste no aumento (ou diminuição) da temperatura de um material magnético devido à aplicação (ou remoção) adiabática de um campo magnético [1]. A descoberta deste efeito é geralmente atribuída a E. Warburg, em 1881 [2], que observou a evolução do calor no ferro com a aplicação de campo magnético. A origem foi explicada independentemente por Debye [3] e Giauque [4]. Estes também sugeriram a primeira aplicação prática deste efeito, o uso da desmagnetização adiabática para atingir temperaturas inferiores à do hélio líquido que, naquela altura, era a temperatura mínima conseguida experimentalmente. A procura de novos materiais magnetocalóricos promissores tem sido um dos principais focos nesta área [5]. Um material magnetocalórico é considerado promissor se agregar um intenso efeito magnetocalórico, estabilidade térmica e propriedades térmicas adequadas a cada sistema.

Apesar do efeito ter sido descoberto há mais de 100 anos, ainda não foi usado em nenhuma aplicação em grande escala. Muito se deve ao elevado preço das fontes de campo magnético como dos próprios materiais magnetocalóricos. Atualmente, a maior parte dos esforços na investigação desta área têm como principal finalidade aplicações tecnológicas nas áreas da refrigeração, aquecimento e conversão de energia. A refrigeração magnética revelou ser bastante promissora como uma tecnologia de refrigeração alternativa à atual tecnologia de compressão de vapor. Apesar disso, esta nova tecnologia ainda está a dar os seus primeiros passos. Olhando para o número de publicações, o aumento foi mínimo nos primeiros 50 anos depois da descoberta do efeito magnetocalórico. Nos últimos anos, este número tem vindo a crescer significativamente [6]. A refrigeração à temperatura ambiente foi inicialmente proposta por Brown, em 1976 [7] e explorada por Steyert, em 1978 [8]. Estes demonstraram o aumento da variação da temperatura entre o reservatório frio e quente para além da variação adiabática da temperatura do material magnetocalórico [9]. Para isso, o material magnetocalórico tem de ser usado como refrigerante e regenerador no mesmo sistema. Este material magnetocalórico, associado a uma dada geometria, é conhecido por *Active Magnetic Regenerator*, AMR [10]. Até hoje o ciclo que lhe está associado continua a ser o mais usado no desenvolvimento de protótipos à temperatura ambiente. Este novo tipo de refrigeração baseado no efeito magnetocalórico oferece uma perspetiva de alternativa energeticamente eficiente assim como “amiga do ambiente”, comparando com a tecnologia de

refrigeração baseada na compressão de vapor. O ciclo regenerativo consiste em 4 processos, o primeiro é a magnetização, fazendo com que a temperatura do material aumente, em processos adiabáticos. A magnetização é seguida por um fluxo de fluido, geralmente água, do reservatório de frio para o quente. De seguida, ocorre a desmagnetização que é acompanhada pela descida da temperatura em processos adiabáticos. Por fim, segue-se um fluxo de fluido do reservatório quente para o frio [11].

Existem dois tipos de medição do efeito magnetocalórico: medições diretas e indiretas. Como o próprio nome indica, medições diretas envolvem a determinação direta da temperatura da amostra no início e no final do processo, utilizando para tal um sensor de temperatura. O método indireto envolve a determinação do efeito magnetocalórico e da variação da entropia magnética a partir da capacidade calorífica e/ou da magnetização [5]. O método de medição direta da variação de temperatura da amostra durante a aplicação ou remoção do campo magnético (técnica de *switch-on*) foi inicialmente proposto por P. Weiss e R. Forrer, em 1926 [12]. Cerca de 43 anos depois, em 1969, A. Clark e E. Callen [13], usaram o método descrito para efetuar a primeira medição do efeito magnetocalórico num campo magnético forte (11 T) de uma amostra de ítrio de ferro,  $Y_3Fe_2(FeO_4)_3$ . Em ambos os aparatos experimentais utilizaram um termopar para a medição da temperatura da amostra. Em 1988, G. Green, modificou a técnica *switch-on* usada até então com a adição de um solenoide supercondutor como fonte de campo magnético, produzindo cerca de 7 T [14]. A temperatura era medida depois deste atingir o valor máximo apresentado, utilizando para tal 5 termopares. Este método foi usado para medir o efeito magnetocalórico em terras raras a uma temperatura perto dos 180 K. Apesar deste método de medição ser o mais viável, também apresenta algumas desvantagens, como uma incerteza significativa de 7-15 % [15], fraca sensibilidade a baixa temperatura, a dificuldade em medir em campos magnéticos fracos e a garantia que se obtenha um processo adiabático. Com o passar dos anos, foram desenvolvidas novas técnicas para a medição direta do efeito magnetocalórico que resolvem alguns dos problemas apresentados. Uma destas técnicas utiliza a aplicação de um campo magnético alternado à amostra magnetocalórica, também denominada por técnica termoacústica. Esta foi inicialmente proposta por Gopal em 1995 [16]. A amostra é colocada entre as duas faces de um eletroímã capaz de produzir um campo de 0.45 T. As bobinas de modulação de campo posicionadas nos polos do eletroímã produzem um campo magnético AC paralelo ao campo DC do ímã. As bobinas são então alimentadas por uma onda quadrada de 1A. Nesta configuração, o campo alternado atingiu cerca de 0.045 T com uma frequência de 4 Hz. A temperatura da amostra era monitorizada por um termistor. Uma técnica semelhante foi usada mais recentemente por Aliev em 2014 [17], onde conseguiu um campo magnético alternado de 0.4 T com uma frequência entre os 0.2 e 0.8 Hz. Uma abordagem diferente à técnica anterior consiste no uso de um circuito pneumático para criar a variação de campo.



Trevizoli em 2009 [18] e Ki Hoon Kang em 2017 [19] são dois exemplos de utilização desta técnica. Em ambos os casos, utilizaram um circuito pneumático para movimentar a amostra para dentro e fora de um campo magnético com um arranjo de Halbach (daqui em diante apenas referido de Halbach) de 1.6 T em [18] e um íman permanente de 0.8 T em [19]. Coincidente às duas experiências, as medições foram feitas numa câmara termicamente isolada cuja temperatura interior era controlada.

## 2. Objetivos

Este trabalho pretende explorar as trocas de calor internas ocorridas em materiais magnetocalóricos em meios onde o campo magnético varia, apresentando dois objetivos:

- i. A variação adiabática da temperatura na aplicação e remoção de campo magnético é uma característica fundamental na escolha do material magnetocalórico para aplicações à temperatura ambiente. O primeiro objetivo deste trabalho é a criação de um sistema de medição direta do efeito magnetocalórico, i.e., um sistema de medição de temperatura em campo magnético variável utilizando termometria de infravermelhos. Para isso, pretende-se idealizar um sistema mecânico capaz de mover uma amostra de material magnetocalórico junto de um íman (íman ou Halbach) com vários tipos de movimento (movimentos linear, acelerado e desacelerado), em que as medições de temperaturas sejam realizadas com uma câmara de infravermelhos. Pretende-se testar a montagem com uma amostra de gadolínio.
- ii. Uma das principais dificuldades na utilização do efeito magnetocalórico em ciclos termodinâmicos prende-se com o facto da variação adiabática de temperatura de qualquer tipo de material limitar a variação final de temperatura entre os reservatórios frio e quente. Uma das soluções encontradas é a utilização do material magnetocalórico como refrigerante e regenerador ao mesmo tempo num ciclo geralmente designado por ciclo AMR. Este ciclo utiliza fluidos. Recentemente foi demonstrado, com simulações numéricas, que é possível aplicar este ciclo sem a mediação de fluidos, utilizando a variação de campo magnético, num processo conhecido como "*heating by sweeping*" [20] [21]. O segundo objetivo deste trabalho é a observação deste efeito, determinando quais as condições ideais para o efeito ocorrer.

## 3. Conceitos Teóricos

Nesta secção serão expostos os fundamentos teóricos de todos os efeitos e processos abordados neste trabalho. Para além disso, serão apresentados os vários tipos de material

magnetocalórico bem como a importância da escolha do material magnetocalórico correto. Por fim, será apresentado o material magnetocalórico mais adequado para este trabalho, tendo em conta os vários fatores de seleção.

### 3.1. Efeito Magnetocalórico

De forma a explicar a origem deste efeito, é necessário usar a termodinâmica que relaciona variáveis magnéticas, como magnetização e campo magnético, com a entropia e a temperatura. Todos os materiais magnéticos mostram, intrinsecamente, o efeito magnetocalórico, sendo que a intensidade deste depende das propriedades do material em questão. Este efeito é induzido através do acoplamento da sub-rede magnética com o campo magnético aplicado e é medido através da variação adiabática da temperatura ( $\Delta T_{ad}$ ) ou pela variação isotérmica da entropia ( $\Delta S_M$ ). A magnetização isotérmica (temperatura constante) de um paramagnete ou de um ferromagnete reduz a sua entropia magnética e o processo inverso, desmagnetização, aumenta a sua entropia magnética. Visto que num processo adiabático, onde não existe trocas de calor ou matéria com o meio externo, a entropia total não pode diminuir, a desmagnetização adiabática de um material ferromagnético conduz a uma diminuição na temperatura [1].

A entropia total ( $S$ ) do material magnético, que depende do campo magnético ( $H$ ) e da temperatura ( $T$ ), pode ser considerada como a soma de 3 contribuições [1]:

$$S(T, H) = S_M(T, H) + S_R(T) + S_{el}(T), \quad (1)$$

onde  $S_M$  é a entropia magnética,  $S_R$  é a entropia da rede e  $S_{el}$  é a entropia eletrónica. A Figura 1 representa o comportamento da entropia ( $S$ ) vs temperatura ( $T$ ) de um ferromagnete sob a ação de diferentes campos magnéticos externos:  $H_0$  e  $H_1$ , sendo que  $H_1 > H_0$ . Neste gráfico, encontram-se representados dois processos característicos do efeito magnetocalórico:

- i. Quando o campo magnético é aplicado adiabaticamente num processo reversível, a entropia magnética diminui, mas tendo em conta que a entropia total permanece constante,

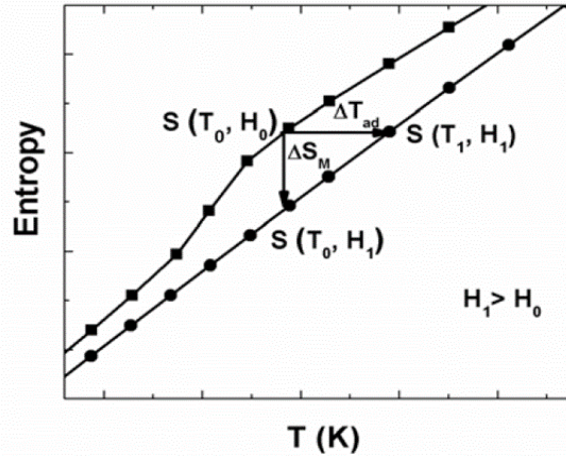
$$S(T_0, H_0) = S(T_1, H_1) \quad (2)$$

resulta num aumento das entropias da rede e eletrónica, i.e., a temperatura do material aumenta.

- ii. Quando o campo magnético é aplicado isotermicamente, a entropia total do sistema ( $S$ ) diminui devido à diminuição da componente magnética, mas a entropia da vizinhança aumenta, havendo transferência de calor para fora do material.

$$\Delta S_M = S(T_0, H_1) - S(T_0, H_0) \quad (3)$$

Desta forma, pode-se afirmar que tanto  $\Delta T_{ad}$  como  $\Delta S_M$ , representam as duas quantidades características do efeito em questão. Ambas as quantidades são funções da temperatura inicial  $T_0$  e da variação do campo magnético aplicado,  $\Delta H$ . Continuando a analisar o gráfico da Figura 1, observa-se que, ao aumentar o campo magnético, a diferença de temperatura adiabática  $\Delta T_{ad}$  é positiva e o material aquece, visto que  $\Delta S_M$  é negativo. Se o campo magnético estiver a ser reduzido, ocorre o inverso.



**Figura 1.** Representação do comportamento  $S$  vs  $T$  de um material ferromagnético, ilustrando o efeito magnetocalórico [1].

Os parâmetros do efeito magnetocalórico,  $\Delta T_{ad}$  e  $\Delta S_M$ , encontram-se correlacionados com a magnetização ( $M$ ), intensidade do campo magnético ( $H$ ), calor específico ( $C$ ) e temperatura absoluta ( $T$ ) por uma das relações de Maxwell:

$$\left(\frac{\partial S(T, H)}{\partial H}\right)_T = \left(\frac{\partial M(T, H)}{\partial T}\right)_H. \quad (4)$$

Assim, para o processo isotérmico, obtém-se:

$$\Delta S_M(T, \Delta H) = \int_{H_0}^{H_1} \left(\frac{\partial M(T, H)}{\partial T}\right)_H dH. \quad (5)$$

A equação (5) indica que a variação de entropia magnética aumenta com a derivada da magnetização em relação à temperatura, em campo magnético constante, e com a variação de campo.

Tendo em conta as seguintes relações da termodinâmica,

$$\left(\frac{\partial T}{\partial H}\right)_S = -\left(\frac{\partial S}{\partial H}\right)_T \left(\frac{\partial T}{\partial S}\right)_H, \quad (6)$$

$$C_H = T \left(\frac{\partial S}{\partial T}\right)_H, \quad (7)$$

onde  $C_H$  representa o calor específico num campo constante, e usando a equação (5), obtém-se a variação adiabática de temperatura infinitesimal,

$$dT_{ad} = - \left( \frac{T}{C(T, H)} \right)_H \left( \frac{\partial M(T, H)}{\partial T} \right)_H dH. \quad (8)$$

Integrando a equação anterior, obtém-se a expressão que caracteriza o efeito magnetocalórico:

$$\Delta T_{ad}(T, \Delta H) = - \int_{H_1}^{H_2} \left( \frac{T}{C(T, H)} \right)_H \left( \frac{\partial M(T, H)}{\partial T} \right)_H dH. \quad (9)$$

Com as equações (6) e (9), é possível recolher alguma informação sobre o comportamento deste efeito em sólidos:

- i. A magnetização, num campo constante, tanto num paramagnete como num ferromagnete, diminui com a temperatura, ou seja,  $\left( \frac{\partial M}{\partial T} \right)_H < 0$ .
- ii. No caso dos ferromagnetes, o valor absoluto da derivada da magnetização em relação à temperatura,  $\left| \left( \frac{\partial M}{\partial T} \right)_H \right|$ , toma o valor máximo à temperatura de Curie e, por consequência,  $|\Delta S_M(T, \Delta H)|$  também apresenta um máximo quando  $T=T_C$ .
- iii. Ainda nos ferromagnetes, e a partir da equação (9),  $\Delta T_{ad}(T, \Delta H)$  apresenta um máximo à temperatura de Curie quando  $\Delta H$  tende para zero.
- iv. Nos paramagnetes,  $\Delta T_{ad}$  apenas toma valores significativos a temperaturas muito próximas do zero absoluto.

## 3.2. Medições do Efeito Magnetocalórico

A intensidade do efeito magnetocalórico pode ser estimada por medições diretas, utilizando sensores de temperatura, ou calculado indiretamente usando as relações de Maxwell e medições da magnetização ou calor específico.

### 3.2.1. Medições Diretas

As técnicas de medição diretas do efeito magnetocalórico envolvem apenas a determinação experimental da temperatura inicial  $T_0$  e final  $T_F$  da amostra aquando da variação do campo magnético externo de  $H_0$  para  $H_F$ . A variação adiabática da temperatura é dada por

$$\Delta T_{ad}(T_0, H_F - H_0) = T_F - T_0. \quad (10)$$

As medições diretas podem ser efetuadas usando técnicas de contacto ou de não-contacto, dependendo se o sensor de temperatura se encontra diretamente conectado à amostra [22]. Os sensores de contacto medem a sua própria temperatura. Estes deduzem a temperatura do objeto assumindo que ambos se encontram em equilíbrio térmico, ou seja, assumindo que não existe fluxo de calor entre os dois. Exemplos de sensores de contacto incluem termopares e termístores. Os de

não-contacto medem a temperatura de um objeto à distância, a partir da radiação térmica emitida pela superfície do mesmo. As câmeras de infravermelho são o exemplo mais conhecido. É importante considerar diversos fatores no momento da escolha do sensor mais indicado, e.g. intervalo de temperaturas, o material e a temperatura ambiente. Sensores IV facilitam a medição de objetos em movimento, quando existe o risco de contaminação de um ambiente controlado ou em processos interrompíveis.

### 3.2.2. Medições Indiretas

Ao contrário das medições diretas, as medições indiretas permitem tanto o cálculo de  $\Delta T_{ad}$  como o cálculo de  $\Delta S_M$ , no caso de medições do calor específico, ou apenas  $\Delta S_M$  no caso de medições de magnetização.

Por outro lado, a medição do calor específico em função da temperatura, na presença de campo magnético e pressão constantes,  $C(T)_{P,H}$ , providencia uma caracterização completa do efeito magnetocalórico em materiais magnéticos, pois a entropia pode ser calculada a partir da capacidade calorífica da seguinte forma:

$$S(T)_{H=0} = \int_0^T \frac{C(T)_{P,H=0}}{T} dT + S_0, \quad (11)$$

$$S(T)_{H \neq 0} = \int_0^T \frac{C(T)_{P,H}}{T} dT + S_{0,H}, \quad (12)$$

onde  $S_0$  e  $S_{0,H}$  representam as entropias à temperatura zero. Desta forma, obtém-se

$$\Delta T_{ad}(T)_{\Delta H} \approx [T(S)_{H \neq 0} - T(S)_{H=0}]_S, \quad (13)$$

$$\Delta S_M(T)_{\Delta H} = S(T)_{H \neq 0} - S(T)_{H=0}. \quad (14)$$

Pecharsky e Gschneidner mostraram que a determinação do efeito magnetocalórico usando o método de medições indiretas é fiável e bastante semelhante aos valores de medições diretas [23]. No entanto, em materiais com elevado efeito magnetocalórico, a transição de fase magnética é geralmente acompanhada por transições estruturais pelo que o erro dos valores obtidos aumenta devido ao uso de relações de Maxwell em dados que poderão ter sido obtidos em situações fora de equilíbrio [15].

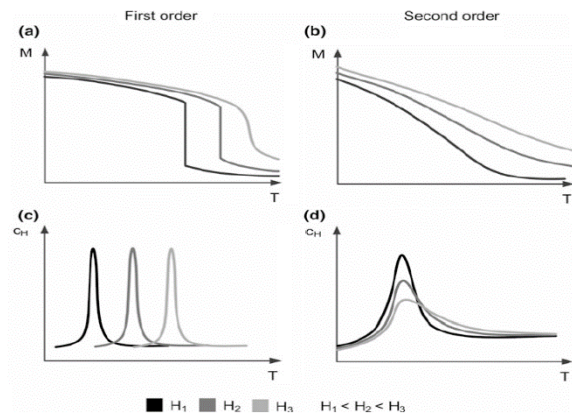
## 3.3. Materiais Magnetocalóricos

Os materiais magnetocalóricos representam o componente mais importante no sistema de refrigeração e bombas de calor magnéticos. Torna-se então imperativo selecionar o material que melhor se adapta à aplicação desejada. Existem vários critérios de seleção, sendo que o mais importante é a intensidade do efeito magnetocalórico. O efeito manifesta-se pela variação da

temperatura adiabática e pela variação da entropia magnética. Outro dos critérios é a temperatura de Curie. Esta é importante pois assegura que o efeito ocorre à temperatura desejada ou num intervalo de temperaturas desejado. Esta temperatura representa a temperatura de transição de fase ferromagnético e paramagnético, onde o efeito é mais pronunciado. Assim como a temperatura de Curie, o intervalo de temperaturas do efeito magnetocalórico,  $\Delta T_{ad}$ , é também um aspeto a ter em atenção. Quanto maior for este intervalo, maior será o efeito regenerativo do sistema. Pelo contrário, tanto a histerese magnética, que ocorre durante a variação do campo, assim como a histerese térmica, que ocorre durante o aquecimento ou arrefecimento devem ser mínimas. Estes dois fenómenos provocam uma perda de energia e, conseqüentemente, um aumento no trabalho no ciclo termodinâmico, resultando na criação de entropia. É também desejável que o material tenha a maior condutividade térmica possível para que desta forma se garanta uma boa resposta térmica. Finalmente a resistividade elétrica, deverá ser a maior possível para garantir o mínimo de correntes *eddy* (resultando na dissipação de energia e no aquecimento do material) [24].

### 3.3.1. Classificação

Uma forma de classificar materiais magnetocalóricos é dividindo-os em dois tipos tendo em conta a natureza da sua transição de fase do estado ferromagnético para o estado paramagnético: materiais de primeira e segunda ordem. A divisão dos materiais em duas classes torna-se conveniente, pois existem certas características que são próprias de cada uma destas classes. Materiais de primeira ordem demonstraram ser os mais apropriados na utilização em áreas como a refrigeração, visto serem os que revelam os valores mais elevados do efeito magnetocalórico. Estes tipos de materiais atingem valores elevados por terem uma mudança bastante abrupta na sua magnetização em função da temperatura. A derivada da magnetização é proporcional à variação da entropia magnética e, por isso, transições de fase bastante abruptas, como acontece com este tipo de materiais, resulta num efeito magnetocalórico significativo, porém num pequeno intervalo de temperaturas. Os materiais de segunda ordem têm geralmente transições muito menos abruptas e, conseqüentemente, a intensidade do respetivo efeito magnetocalórico é menor.

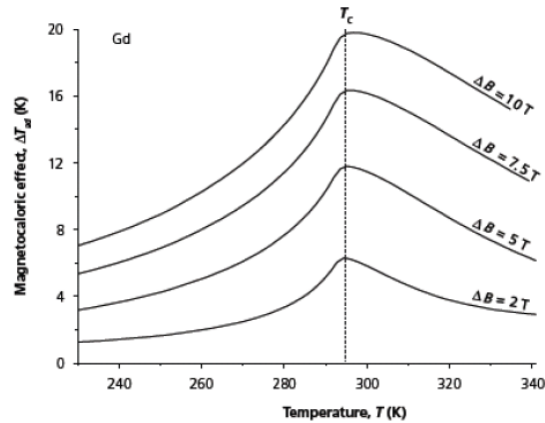


**Figura 2.** Representação esquemática das diferenças entre materiais de primeira e segunda ordem para (a,b) magnetização e (c,d) o calor específico. Adaptado de [26].

A Figura 2 representa as diferenças entre materiais de primeira ordem e de segunda ordem, tanto para a magnetização como para o calor específico. Começando por avaliar a transição de fase de primeira ordem, gráfico (a), a magnetização varia abruptamente a uma determinada temperatura, estando também associado a uma deformação na estrutura do material. No caso da transição de fase de segunda ordem, gráfico (b), a magnetização varia de forma contínua perto da temperatura de Curie do material. Isto faz com que a entropia magnética dos materiais de primeira ordem seja mais abrupta do que os materiais de segunda ordem (ver equação (5)). Por último, como mostra o gráfico (c), em materiais de primeira ordem o pico do calor específico diminui à medida que se aumenta o campo magnético, enquanto que no caso de materiais de segunda ordem o pico perde intensidade e alarga à medida que o campo aumenta [24].

### 3.3.2. Gadolínio

Existem certos materiais que exibem um efeito magnetocalórico bastante intenso para aplicações perto da temperatura ambiente. Apesar de caro, o gadolínio (Gd) é o material mais comum para este tipo de aplicações. É uma terra rara e, no seu estado elementar, é o único material que exhibe efeito magnetocalórico perto da temperatura ambiente, 293 K. As suas propriedades magnetocalóricas também são adequadas a muitas aplicações, sendo que  $\Delta T_{ad} = 2-3$  K,  $c_H = 300$  Jkg<sup>-1</sup>K<sup>-1</sup>,  $\Delta S_M = 3.1$  Jkg<sup>-1</sup>K<sup>-1</sup> quando o campo magnético varia 1 T [24]. A Figura 3 mostra a variação adiabática da temperatura do Gd em função da temperatura para vários campos magnéticos. Note-se a larga banda de temperatura onde existe efeito magnetocalórico apreciável (280-320 K), o que torna o Gd um excelente material para o ciclo AMR.



**Figura 3.** Variações adiabáticas da temperatura do Gd,  $\Delta T_{ad}$  (K), em função de T(K) para diferentes variações de campo magnético [38].

Um dos aspetos mais importantes do Gd é a sua pureza. Diferentes impurezas podem alterar certas propriedades magnetocalóricas e, por sua vez, alterar o efeito magnetocalórico resultante. Contudo, existem exceções à regra. Introduzindo diferentes elementos na composição do Gd, obtendo assim ligas de Gd, é possível melhorar certos aspetos do efeito magnetocalórico. Um destes exemplos é a substituição do Gd com o manganésio (Mn), criando assim ligas de Gd-Mn. Neste caso, diferentes proporções de Gd e Mn podem resultar na diminuição da temperatura de Curie sem influenciar significativamente o efeito magnetocalórico observado [24].

Existe outro grupo de ligas de Gd que é caracterizada por exibir um efeito magnetocalórico superior ao do Gd puro. Trata-se de ligas de primeira ordem compostas por Gd-Si-Ge (Gadolínio, Silício e Germânio). Estas ligas exibem, o que se denomina por efeito magnetocalórico gigante. Este tipo de efeito foi descoberto em 1997, por Pecharsky e Gschneidner em  $Gd_5Si_2Ge_2$  [25]. Alguns anos depois, os mesmos investigadores mostraram que variando as quantidades de Si e Ge e adicionando outro material, o Ga (Gálio), conseguiam obter um efeito magnetocalórico gigante num intervalo de temperatura entre os 20 e 305 K [26]. Esta liga exibe um efeito magnetocalórico (variação da entropia magnética) à temperatura ambiente que corresponde a cerca do dobro do observado em Gd puro. A maior desvantagem desta liga é o facto de ser de primeira ordem o que faz com que exiba uma histerese magnética muito grande, contribuindo para perdas parasitárias [24].

### 3.4. Heating e Cooling by Sweeping

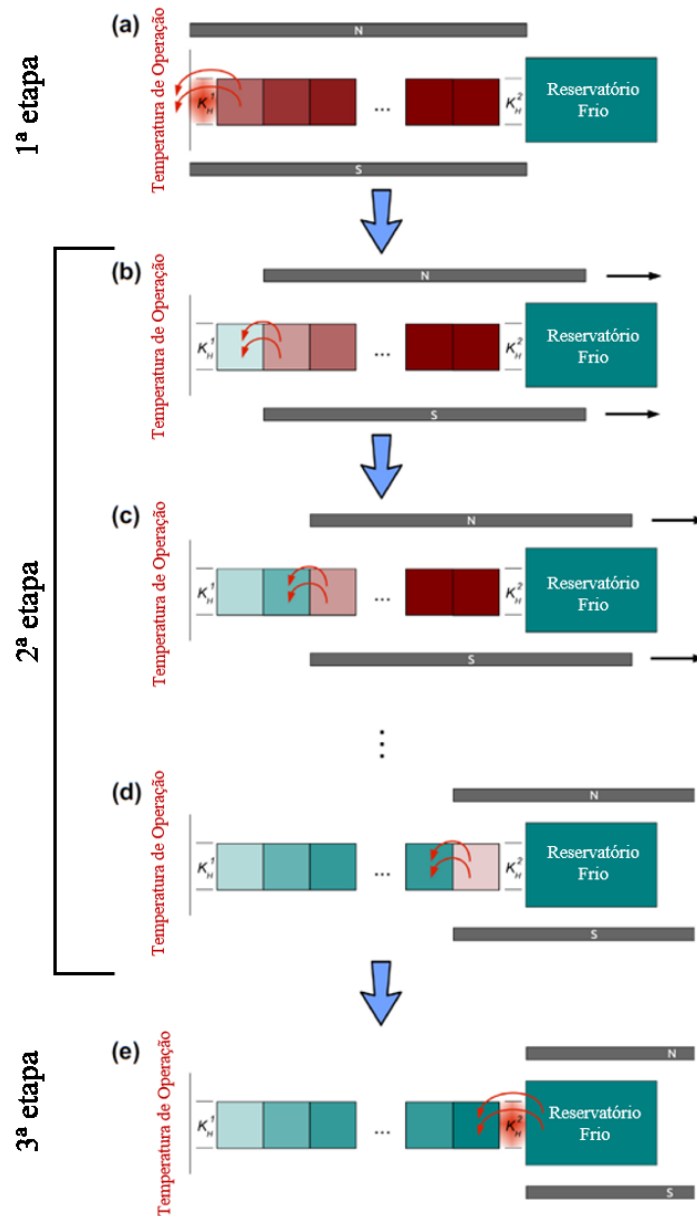
Os refrigeradores magnéticos são conhecidos por atingir uma eficiência superior aos refrigeradores tradicionais com a particularidade de não requerer o uso de gases, reduzindo assim drasticamente o tamanho do sistema. Apesar da elevada eficiência deste tipo de refrigerador, o facto de usar partes móveis e fluidos reduz o seu tempo de vida. Para tal, foi proposto a substituição



do fluido por interruptores térmicos [21]. Este novo tipo de refrigerador, refrigerador magnético de estado sólido, é em grande parte semelhante ao AMR convencional, com a diferença de que o fluxo de calor é feito pelo material magnetocalórico, fazendo com que este seja mais compacto. Removendo o fluido, este tipo de sistema funciona se os elementos do material magnetocalórico estiverem em contacto uns com os outros. Quando se aplica campo magnético, o fluxo deve ser direcionado do material magnetocalórico para o reservatório quente e quando o campo é removido, o fluxo de calor deve ser redirecionado do reservatório frio para o material. Tal é possível com o uso de 2 interruptores térmicos entre as extremidades do material e os reservatórios quente e frio [21]. Aplicando campo magnético, a condutividade térmica  $k$  do interruptor térmico em contacto com o reservatório quente aumenta enquanto que o interruptor térmico em contacto com o reservatório frio diminui. Na remoção do campo ocorre o inverso. Desta forma, cria-se o fluxo cíclico de calor requerido entre os dois reservatórios [21].

A utilização de apenas um elemento de um material magnético condiciona a variação de temperatura atingida, limitando-a à variação de temperatura adiabática  $\Delta T_{ad}$  máxima para o material [20]. Uma forma de resolver esta limitação é dividindo o material magnetocalórico em diversos elementos. Este processo, conhecido por “*cooling by sweeping*”, pode ser exemplificado através da Figura 4 que representa 3 etapas em cada ciclo de refrigeração: aplicação de campo magnético em todo o material, remoção do campo partindo do reservatório quente e varrendo todos os elementos até ao elemento mais próximo do reservatório frio e remoção de campo do último elemento. Na primeira etapa da Figura 4, (a), o  $k$  do interruptor térmico quente é igual ao do material, fazendo com que o calor flua do primeiro elemento do material para o reservatório quente. Na outra extremidade, interruptor térmico frio tem um  $k$  mais baixo. Como ocorreu a transferência de calor do primeiro elemento para o reservatório quente, a temperatura deste elemento diminuiu, fazendo com que haja também a transferência de calor do segundo elemento para o primeiro e assim sucessivamente para os restantes elementos. A segunda etapa inicia com a remoção do campo magnético do primeiro elemento do material, Figura 4 (b). Desta forma, o  $k$  do interruptor térmico quente diminui consideravelmente, impedindo que haja fluxo de calor para o reservatório quente. Nesta fase regista-se uma diminuição na temperatura do primeiro elemento igual à variação da temperatura adiabática do Gd. O material encontra-se assim em isolamento térmico de ambos os reservatórios, com ambos os difusores a apresentarem condutividade térmica nula. O passo seguinte é a remoção do campo do segundo elemento, fazendo com que ocorra uma diminuição da temperatura deste elemento e dos seguintes, Figura 4 (c). A continuação gradual da remoção do campo para os outros elementos, resulta numa diminuição da temperatura no último elemento no final da 2ª etapa, Figura 4 (d). Antes que o campo seja totalmente removido de todo o material, o último elemento sofre uma diminuição de temperatura, aumentando assim a diferença

entre a temperatura deste e a temperatura de operação. Por fim, a temperatura do reservatório frio tende para a temperatura do último elemento do material e obtém-se assim um gradiente de temperatura superior à variação de temperatura adiabática do material magnetocalórico, Figura 4 (e).



**Figura 4.** Representação esquemática de um refrigerador magnético de estado sólido com o efeito “cooling by sweeping”. Setas a vermelho representam o fluxo de calor. Adaptado de [20].

É importante referir que o sistema descrito acima representa o processo de *cooling by sweeping* visto que a temperatura final foi menor que a temperatura de operação. O processo de *heating by sweeping* é semelhante ao anterior, com a diferença de que o varrimento do campo é feito no sentido contrário, fazendo assim com que a temperatura final seja superior à inicial.

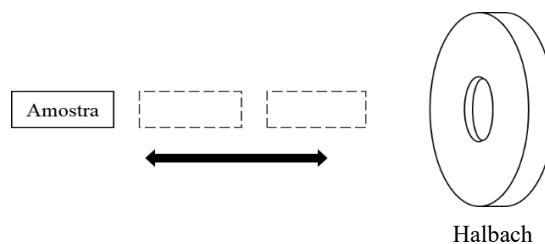
## 4. Design e Componentes da Montagem Experimental

Esta secção apresenta todas as etapas da componente prática deste trabalho, descrevendo o design do sistema de medição e o seu desenvolvimento, bem como os detalhes de todos os componentes usados.

### 4.1. Design e Desenvolvimento do Sistema de Medição

Um dos objetivos deste trabalho reside na montagem e teste de um sistema de medição capaz de detetar variações de temperatura numa amostra magnetocalórica num campo magnético variável. Para tal, o primeiro passo a tomar consiste em determinar que tipo de sistema usar e os materiais necessários para o mesmo. Para efetuar as medições deste efeito, o processo de aplicação e remoção do campo deverá ser o mais adiabático possível, implicando uma variação rápida do campo magnético. Sendo assim, as medições terão de ser feitas sobre uma amostra imóvel e variando o campo ou movendo a amostra num campo magnético fixo.

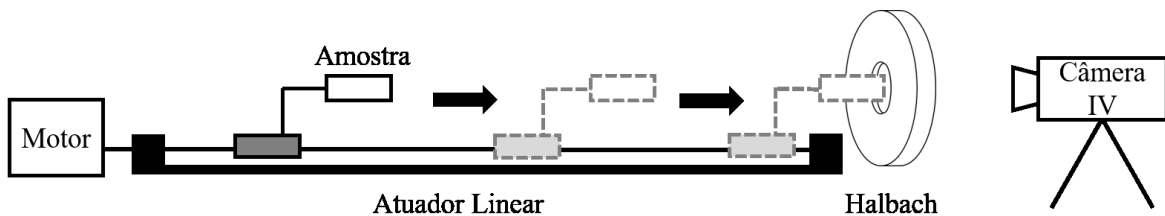
A variação do campo pode ser obtida aumentando ou diminuindo a distância entre a amostra e a fonte de campo. Como fonte de campo magnético optou-se por um Halbach, visto ser uma opção bastante viável tendo em conta o objetivo da experiência, apresentando valores de intensidade de campo de cerca de 1 T. A própria geometria do Halbach em questão também constitui um aspeto favorável que será discutido mais à frente. De referir que também foi usado um íman Nd-Fe-B para testar o setup. Como a fonte escolhida, o Halbach, é um objeto bastante pesado, decidiu-se que a melhor opção seria variar a posição da amostra em relação à fonte, como representado na Figura 5.



**Figura 5.** Diagrama representativo do movimento da amostra em relação ao Halbach, como forma de variação do campo magnético aplicado.

Estabelecido o método de variação de campo magnético, é necessário definir o movimento da amostra. Este movimento tem de ser linear e recíproco, ou seja, a amostra tem de percorrer uma certa distância penetrando o Halbach e a mesma distância no sentido inverso. Como o movimento tem de ser controlado, optou-se por um atuador linear com um motor de passo. O atuador permite obter o movimento linear e o motor de passo possibilita o controlo do movimento. Este controlo foi obtido usando Arduino e drivers apropriadas. Por fim, para medir variações de temperatura usou-se

uma câmera IV. O design do sistema de medição encontra-se representado na Figura 6. O motor de passo alimenta o atuador linear, fazendo rodar um parafuso de avanço que permite que a base que sustenta a amostra se possa movimentar. Este é um movimento linear de entrada e saída do Halbach, criando assim uma variação adiabática do campo magnético. A temperatura da amostra é constantemente monitorizada ao longo de todo o processo, possibilitando a observação da diferença de temperatura na superfície da amostra, no momento que este entra e sai do Halbach.



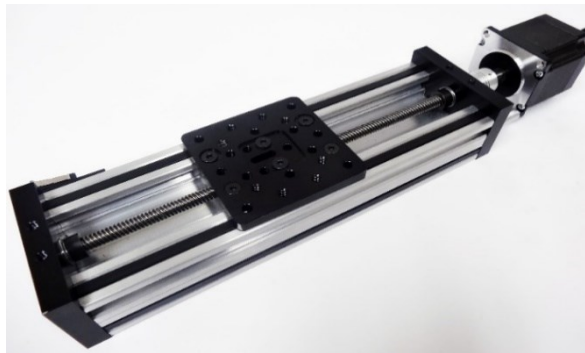
**Figura 6.** Representação ilustrativa do design do sistema de medição.

## 4.2. Atuador Linear

Um atuador linear consiste num dispositivo que converte alguma forma de energia em movimento linear a 1 dimensão. Existem vários tipos de atuadores no mercado: hidráulicos, mecânicos, piezoelétricos e eletromecânicos. Estes variam na forma como originam o movimento. Neste trabalho, utilizou-se um atuador eletromecânico. Este é bastante semelhante ao atuador mecânico que utiliza sistemas de engrenagens ou roldanas para criar movimento, sendo que a única diferença reside na utilização de um motor elétrico para gerar movimento.

Este dispositivo pode ser implementado em qualquer situação onde seja preciso a assistência de uma máquina para transportar ou empurrar (puxar) uma certa carga num movimento linear. O atuador em questão converte rotações em movimento linear tirando partido de um conjunto de correias dentadas ou de um parafuso de avanço. Estes tipos de atuadores são os mais indicados para aplicações desta dimensão. Os componentes destes atuadores encontram-se diretamente conectados a um motor elétrico que faz girar uma roda dentada, no caso do atuador de correia, ou um parafuso de avanço, no caso do atuador de parafuso. A diferença entres estes dois reside no binário (força rotacional), na velocidade e na precisão. O primeiro é indicado para aplicações que exigem um grande binário, velocidades elevadas, mas uma baixa precisão. O segundo é o mais apropriado para aplicações que exigem uma elevada precisão e um movimento mais suave. Tendo em conta o sistema deste trabalho, escolheu-se utilizar o atuador de parafuso de avanço.

O princípio do funcionamento do atuador de parafuso de avanço baseia-se num parafuso com saliências helicoidais contínuas ao longo do seu comprimento. Enroscado ao parafuso encontra-se uma rosca com saliências coincidentes. A rosca é impedida de rodar com o parafuso (geralmente conectada a uma parte não móvel do atuador). Sobre a rosca encontra-se uma plataforma que também se desloca. A plataforma serve como base para a carga que se pretende mover. À medida que o motor elétrico faz girar o parafuso, a rosca desloca-se ao longo deste, sendo que o sentido do movimento é definido pelo sentido de rotação do motor. Desta forma, converte-se o movimento do motor em deslocamento linear [27]. Na Figura 7, encontra-se representado o modelo do atuador usado. Este modelo foi adquirido a partir da empresa *OpenBuilds* e tem 500 mm de comprimento.



**Figura 7.** Modelo do atuador de parafuso de avanço utilizado [39].

### 4.3. Motor de Passo

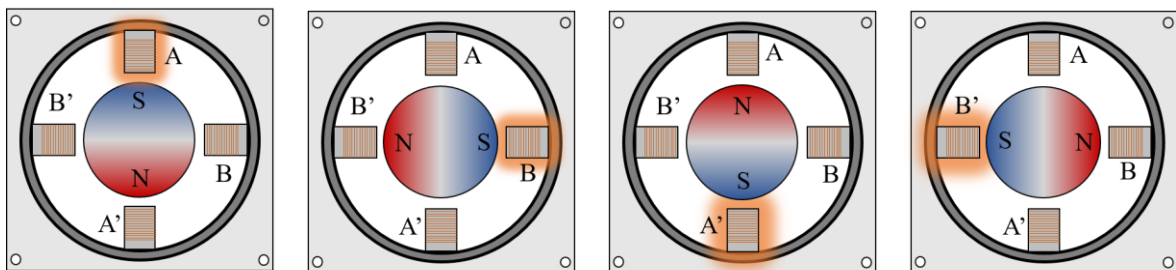
O atuador de parafuso de avanço necessita de um motor elétrico para realizar o deslocamento linear. Este motor controla a rotação do parafuso, que por sua vez controla o deslocamento da carga. Existem vários tipos de motores elétricos capazes de alimentar o atuador. No entanto, o modelo do atuador escolhido foi concebido para usar, exclusivamente, um motor de passo NEMA 23, com uma resolução de  $1.8^\circ$  e uma corrente elétrica de funcionamento máxima de 3A.

Um motor de passo consiste num motor DC, sem escovas, que executa o movimento rotativo em passos. Existem várias diferenças entre um motor de passo e um motor DC convencional. A maior diferença é o facto de o motor de passo não ter escovas ou comutador. Estas são as partes de um motor DC que mantêm o rotor (componente rotativa de um motor) a girar constantemente na mesma direção. Outro fator que diferencia estes dois motores é o componente que de facto está a girar. Num motor DC convencional, existe um (ou mais) íman permanente externo que permanece estático, denominado por estator, e uma (ou mais) bobina interna que gira no interior do estator, o rotor. No motor de passo, os ímanes permanentes encontram-se no interior e são estes que giram,

fazendo de rotor, enquanto que as bobinas se encontram no exterior e permanecem estáticas, compondo o estator.

O design de ambos o estator como do rotor apresentam diferenças entre os dois tipos de motor. Ao contrário de um grande ímã externo e uma grande bobina interna giratória, o motor de passo é composto por um ímã interno que se encontra dividido em várias secções correspondentes às secções das bobinas externas. Estas secções podem ser interpretadas como os dentes de uma engrenagem. Aqui, o ímã seria a engrenagem e as bobinas teriam pequenas secções, dentes, que se intercalam com essa mesma engrenagem. Estas bobinas geram impulsos magnéticos que fazem com que as secções do rotor e do estator se atraem e repelem, originando movimento.

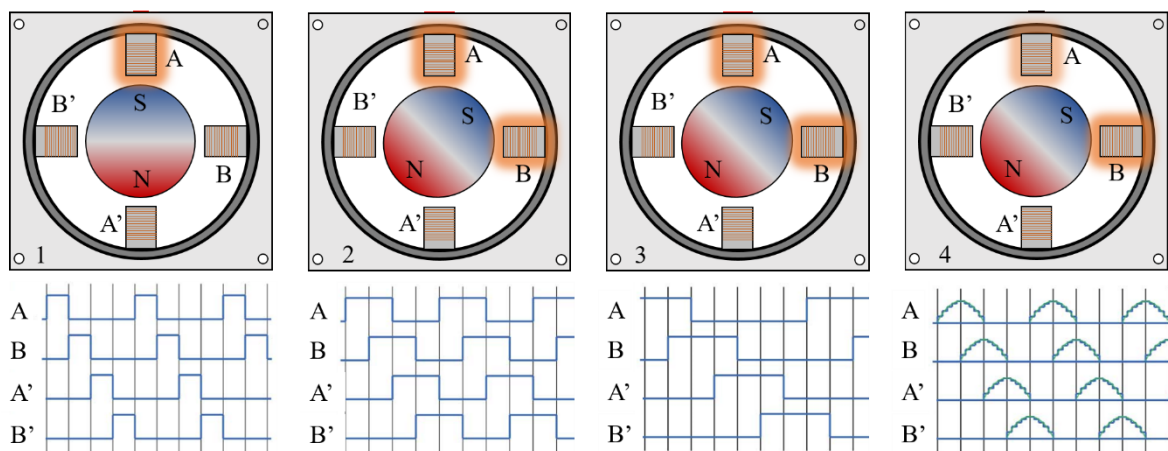
O motor é composto por um ímã permanente e um conjunto de bobinas, onde o ímã atua como rotor e as bobinas como estator. Fazendo passar corrente pelas bobinas, uma de cada vez, estas magnetizam o estator e assim criam-se polos magnéticos que, por sua vez, propulsionam o rotor e originam movimento. A Figura 8 representa um movimento de rotação básico de um motor de passo. Ativando cada bobina (brilho a laranja), magnetiza-se o estator. Como as bobinas estão emparelhadas (A A' e B B'), e.g. faz-se passar correntes inversas nas bobinas A e A', e usando ativações em passos, como representado na Figura 8 da esquerda para a direita, é possível gerar movimento. Na figura, a bobina com o brilho representa a bobina cuja corrente magnetiza o estator com o polo Norte e a bobina emparelhada magnetiza com o polo Sul [28].



**Figura 8.** Representação do princípio de funcionamento básico de um motor de passo. O rotor (ímã permanente) encontra-se representado pelos pólos magnéticos S e N e o estator (bobinas) são representadas pelas letras A, B, A' e B'.

O princípio de funcionamento previamente apresentado é um dos 4 modos de funcionamento de um motor de passo descritos na Figura 9. O primeiro modo de funcionamento, representado por 1 na Figura 9, é também denominado por excitação de bobina singular, onde apenas uma bobina se encontra ativa de cada vez. No exemplo dado de um motor com 4 bobinas, o rotor realiza um ciclo completo em 4 passos. O número de passos que o motor precisa para completar um ciclo completo define a resolução do mesmo. Quanto maior o número de passos, maior será a resolução do motor. Contudo, o aumento da resolução acompanha a diminuição do binário do motor. No modo 2, modo de passo total, obtém-se um maior binário em relação ao primeiro modo, devido ao facto de existir sempre duas bobinas ativas ao mesmo tempo. Porém, a resolução mantém-se constante, sendo que

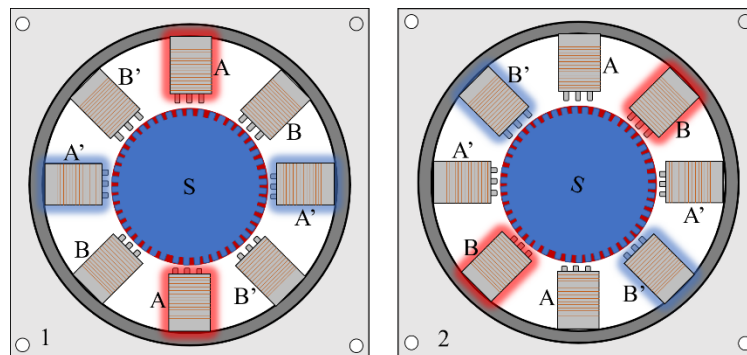
o motor continua a precisar de 4 passos para efetuar um ciclo. Para aumentar a resolução do motor, utiliza-se o modo 3 de meio passo, que se trata de uma junção dos dois modos anteriores. Neste caso, é ativada uma bobina (A) e de seguida duas bobinas (A e B) seguindo-se de novo com a ativação de uma bobina (B) e assim sucessivamente até completar um ciclo. Neste modo, obtém-se o dobro da resolução obtida nos dois modos anteriores, sendo que o motor precisa de 8 passos para efetuar um ciclo. No entanto, o modo de funcionamento 4 é o mais comum. Trata-se do modo de micro passo onde a corrente fornecida às bobinas tem, aproximadamente, a forma de uma função seno e um passo é dividido em passos mais pequenos (micro passos). Com isto obtém-se um movimento mais suave do rotor e aumenta-se a precisão do motor [29]. O controlo por micro passo é abordado com mais detalhe na secção seguinte.



**Figura 9.** Representação dos 4 modos de funcionamento de um motor de passo assim como os gráfico de ativação de cada uma das 4 bobinas em função do tempo. Adaptado de [28].

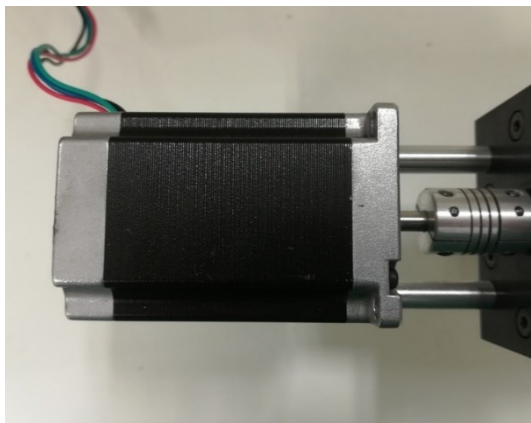
Para além dos modos de funcionamento, os motores de passo também são distinguidos pelo seu tipo de construção. O tipo de construção abordado até agora, o motor de passo com íman permanente, trata-se do mais básico. O mais utilizado no mercado, é motor de passo híbrido que é combina o tipo de motor já referido com um que utiliza um rotor dentado, em que os dentes se alinham com a bobina ativa. O motor híbrido tira partido do melhor em cada um dos motores em questão. Este é composto não só por um rotor dentado como por um estator dentado. O rotor (íman permanente) encontra-se dividido em duas secções, com polaridades opostas, e com os dentes de cada uma delas desfasados. O estator é composto por 2 conjuntos de 4 bobinas emparelhadas. Desta forma, ao ativar a bobina A, origina-se 4 polos magnéticos, 2 com uma polaridade Norte e outros 2 com polaridade Sul, como demonstrado na Figura 10 [28]. Geralmente, um motor híbrido é composto por um rotor com 50 dentes e um estator com 48 dentes. É importante denotar que o número de dentes representado na Figura 10 não coincide com o número de dentes geralmente presentes num motor, apenas por uma questão de simplicidade e clareza do processo. Esta diferença possibilita um espaçamento entre alguns dos dentes, permitindo assim a existência de

dentes completamente alinhados com o rotor, outros não alinhados e ainda um conjunto de dentes meio alinhados. Considerando que o estator é composto por 2 conjuntos de 4 bobinas, é possível organizar os dentes em 4 grupos, tendo em conta o seu alinhamento com o rotor. Assim, obtém-se um conjunto de dentes completamente alinhados, um conjunto completamente desalinhado e dois conjuntos meio alinhados. Cada um destes conjuntos de dentes correspondem a certas bobinas. Ao ativar um dos conjuntos de bobinas (A ou B), estas originam 4 polos magnéticos, 2 polos Sul e 2 polos Norte. Ativa-se o conjunto de bobinas A, Figura 10 (1) e, desta forma, passam a existir 2 bobinas que atuam como polo Norte (AA) e 2 como polo Sul (A'A'). Considerando apenas a secção de polo Sul do rotor, o conjunto de dentes das bobinas com o polo oposto ao do rotor (AA) encontram-se completamente alinhadas enquanto que o conjunto de bobinas com o mesmo polo (A'A') encontram-se desalinhadas. Os restantes conjuntos de dentes das bobinas (BB) e (B'B') encontram-se meio alinhados. De seguida, é ativado o conjunto de bobinas B, Figura 10 (2). De forma a alinhar-se com os dentes do estator, o rotor move-se um pequeno ângulo. Este ângulo é definido pelo ângulo de passo ou pela resolução do motor e corresponde a  $\frac{1}{4}$  do ângulo de inclinação. Este define o ângulo entre um dente do rotor e o seu eixo, ou seja,  $360/50 = 7.2^\circ$ . Daqui, retira-se que o ângulo de passo é de  $7.2/4 = 1.8^\circ$ . Ou seja, ativando o segundo conjunto de bobinas, o rotor move-se  $1.8^\circ$ . Repetindo este processo, ciclicamente obtém-se um movimento constante [30]. A Figura 11 mostra o motor de passo usado.



**Figura 10.** Representação de um motor híbrido. O rotor encontra-se representado no centro, onde se observa a secção com a polaridade Sul a azul e atrás a secção com polaridade Norte. Encontram-se também representadas os dois conjuntos de 4 bobinas A e B.





**Figura 11.** Motor de passo utilizado, NEMA 23.

#### 4.4. Driver de Micro Passo

A resolução, ou o ângulo de passo, do motor utilizado neste trabalho é de  $1.8^\circ$ . Isto significa que o motor precisa de 200 passos para efetuar um ciclo completo, visto que  $360^\circ/1.8^\circ = 200$ . Tal significa que o movimento do motor não é perfeitamente suave, quando se usa baixas velocidades. Uma forma de atenuar este efeito é diminuir o tamanho dos passos, através do uso de micro passos. O controlo por micro passos divide um passo em passos mais pequenos que permite escolher várias resoluções, tirando partido de uma driver. As resoluções mais comuns para o tipo de motor usado (NEMA 23), são de  $1/8$  e  $1/16$ , i.e., dividem um passo em 8 ou 16 micro passos, respetivamente. A diferença entre estas duas resoluções baseia-se no binário e a suavidade de movimento: uma resolução de  $1/16$  proporciona uma maior suavidade no movimento, mas um binário menor. Obtém-se o controlo por micro passos usando uma tensão PWM (*Pulse Width Modulation*) para controlar a corrente que ativa as bobinas. A driver tem como principal função enviar dois sinais de tensão como ondas seno, desfasadas de  $90^\circ$ . À medida que a corrente vai aumentando numa bobina, vai diminuindo na outra. Esta transferência gradual de corrente resulta num movimento mais suave e preciso, comparando com os restantes modos de funcionamento [31].

Para este trabalho utilizou-se a driver *TB6560* que, juntamente com uma placa de Arduino, torna possível o controlo preciso do movimento do motor de passo. Esta encontra-se representada na Figura 12. A driver usada pode funcionar em diferentes modos, dependendo, por exemplo, da corrente de funcionamento ou da resolução pretendida. A corrente de funcionamento determina a corrente fornecida ao motor. O motor tem uma corrente limite de 2.8 A, pelo que se escolheu 2.2 A como corrente de funcionamento. Desta forma, não se corre o risco de se fornecer demasiada corrente para o motor, podendo assim danificá-lo. Poder-se-ia optar por uma corrente de 2.6 A, ainda abaixo do limite imposto pelo motor, mas esta revelou não ser a melhor opção, por ter resultado num mau comportamento por parte do motor. Neste trabalho, optou-se por uma resolução de  $1/8$ . Tanto o controlo da corrente de funcionamento como da resolução é feito por uma

combinação de interruptores, representado na Figura 12. A corrente é controlada pelos interruptores SW1, SW2, SW3 e S1 enquanto que a resolução é controlada pelos interruptores S3 e S4.

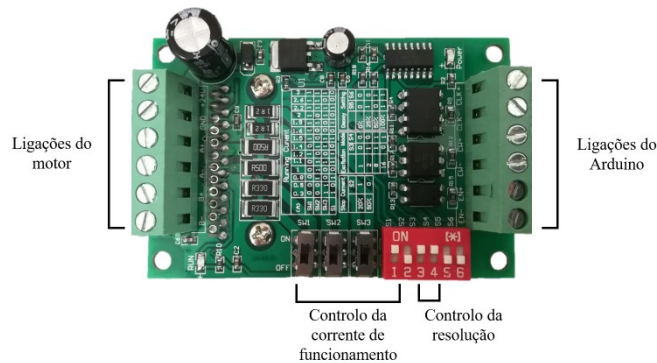


Figura 12. Driver TB6560 usada.

## 4.5. Halbach

Um Halbach é um arranjo de ímanes permanentes que concentra o campo magnético de um dos lados enquanto cancela parcialmente do lado oposto. Este arranjo foi primeiramente idealizado por K. Halbach, em 1980, como parte do estudo da produção de feixes de partículas de elevada energia [32]. Este arranjo consiste em dois conjuntos de ímanes, os principais e de transição. A sobreposição do fluxo magnético proveniente dos dois conjuntos faz que haja uma elevada concentração do campo magnético de um dos lados do Halbach, lado ativo. O outro lado do Halbach, lado inativo, tem um campo magnético de muito baixa intensidade, geralmente desprezado.

A Figura 13 representa as linhas de intensidade de campo magnético de um íman e de um Halbach. Na imagem à direita, é possível observar o lado ativo (1) e o lado inativo (2). A Figura 14 mostra o tipo de Halbach mais usado. Trata-se de um *Halbach* cilíndrico, que tem como lado ativo o centro do cilindro, e como lado inativo a parte de fora do cilindro. Tendo em conta o design da montagem e a necessidade de um campo magnético intenso, opta-se por utilizar o Halbach cilíndrico.

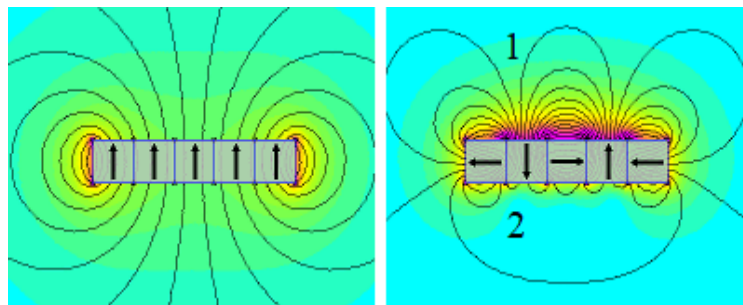
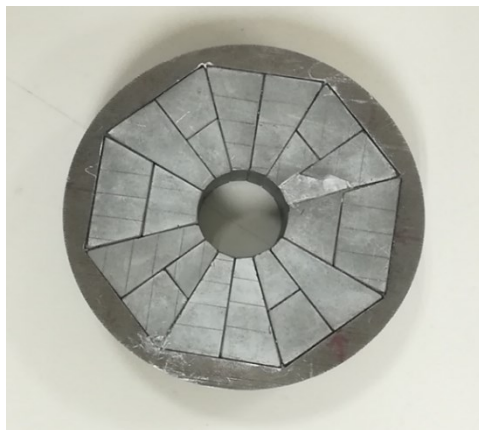


Figura 13. Representação das linhas de intensidade do campo magnético num íman (esquerda) e num Halbach (direita) [36].



**Figura 14.** Halbach cilíndrico.

#### 4.6. Câmera IV

Todos os objetos absorvem e emitem energia na forma de radiação eletromagnética. Um corpo negro é um objeto idealizado que é caracterizado por absorver toda a radiação incidente [33]. A lei de Stefan-Boltzmann relaciona a energia térmica radiada por unidade de tempo e unidade de área com a temperatura do corpo negro,

$$E^* = \int_0^{\infty} \frac{2\pi c^2 h}{\lambda^5 \left( e^{hc/\lambda k_B T} - 1 \right)} d\lambda = \sigma T^4, \quad (15)$$

onde  $c$  é a velocidade da luz,  $h$  constante de Planck,  $k_B$  a constante de Boltzmann,  $\lambda$  o comprimento de onda,  $T$  a temperatura e  $\sigma$  a constante de Stefan-Boltzmann ( $5.67 \times 10^{-8} \text{ W m}^{-2} \text{ K}^{-4}$ ). Assim, a intensidade de radiação emitida depende não só da superfície do objeto como da sua temperatura. A emissividade,  $\varepsilon$ , representa a razão entre a radiação emitida pela superfície de um objeto e a radiação emitida por um corpo negro:

$$\varepsilon_{\lambda, T} = \frac{E(\lambda, T)}{E^*(\lambda, T)}. \quad (16)$$

Desta forma, é possível reescrever a expressão (15),

$$E = \varepsilon \sigma T^4. \quad (17)$$

Uma câmera de IV deteta e mede a energia radiada por um objeto e converte essa informação numa imagem. A partir dessa imagem é possível extrair a temperatura da superfície do objeto medido. Estas câmeras contém um sistema ótico composto por uma lente que foca toda a radiação IV emitida pelo objeto. Esta radiação é varrida por uma matriz de sensores IV que criam um padrão detalhado da temperatura, chamado termograma. O termograma é convertido em impulsos elétricos que são posteriormente processados. Depois de processados, a informação recolhida é transformada num mapa de cor, cada cor representando uma temperatura [34]. Muitas destas câmeras incluem uma câmera convencional que capta a mesma imagem da câmera IV e

junta-as, para que seja mais fácil interpretar o mapa de temperaturas. A Figura 15 apresenta a câmara de IV utilizada.



**Figura 15.** Câmera de IV usada, FLIR SC5000.

## 5. Setup e Método Experimental

Neste capítulo, são apresentados em detalhe todos os setups utilizados neste trabalho, explicando cada opção tomada no que toca a cada um dos suportes desenvolvidos. Também é exposto o mecanismo desenvolvido para o movimento acelerado e desacelerado usado no motor de passo.

### 5.1. Modos de Movimento

Tendo em mente que um dos objetivos deste trabalho consiste em medir o efeito heating by sweeping, foi necessário desenvolver 3 diferentes modos de movimento: movimento linear, acelerado e desacelerado. Tanto os cálculos teóricos como a implementação destes movimentos em Arduino são descritos nesta secção.

#### 5.1.1. Movimento Linear, Acelerado e Desacelerado

Como se trata de um motor de passo, a obtenção de um movimento linear é simples. No entanto para o caso do movimento acelerado e desacelerado o processo complica-se. Por isso, optou-se por dividir o percurso em diversas secções onde a velocidade pudesse variar. Visto que a velocidade inicial é sempre nula,  $V_0 = 0$ , é possível escrever a seguinte relação:

$$i\Delta x = \frac{a}{2} t_i^2, \quad (18)$$

onde  $i$  representa a secção,  $\Delta x$  a distância percorrida em cada secção,  $a$  a aceleração e  $t_i$  o tempo entre cada secção. A partir da expressão (18), determina-se a seguinte expressão:

$$t_i = \sqrt{\frac{2i\Delta x}{a}}. \quad (19)$$

Partindo de (19), é possível determinar a variação do tempo em cada secção,  $\Delta t_i$ :

$$\Delta t_i = \left( \sqrt{\frac{2i\Delta x}{a}} - \sqrt{\frac{2(i-1)\Delta x}{a}} \right). \quad (20)$$

A distância percorrida pode ser reescrita da seguinte forma:

$$i\Delta x = i \frac{n}{m}, \quad (21)$$

onde  $n$  representa o número de rotações e  $m$  o número total de secções.

Desta forma, a expressão (20) toma a forma:

$$\Delta t_i = \left( \sqrt{\frac{2i n}{m a}} - \sqrt{\frac{2(i-1)n}{m a}} \right). \quad (22)$$

Para além da posição final, é também necessário definir o tempo total do movimento, ou seja, o tempo que demora a aceleração,  $\tau$ . Este é definido pelo somatório de todos os  $\Delta t_i$ :

$$\Delta t_1 + \Delta t_2 + \Delta t_3 + \dots + \Delta t_m = \tau. \quad (23)$$

Neste somatório, existem termos que se anulam, pelo que se obtém a seguinte expressão para  $\tau$ :

$$\tau = \sqrt{\frac{2 n}{a}}. \quad (24)$$

A partir de (24), obtém-se a expressão para a aceleração,  $a$ :

$$a = \frac{2 n}{\tau^2}. \quad (25)$$

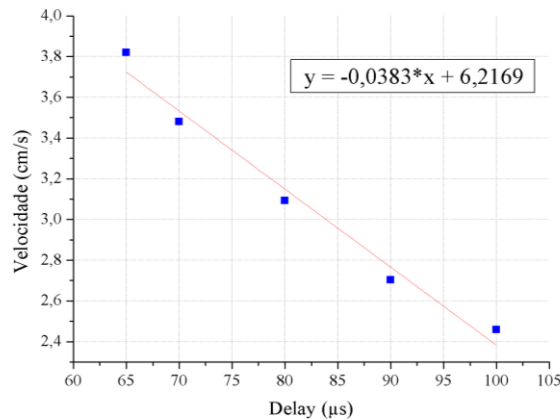
Substituindo o resultado anterior em (22), obtém-se a expressão final simplificada para a variação do tempo em cada secção, num movimento acelerado:

$$\Delta t_i = \frac{\tau}{\sqrt{m}} (\sqrt{i} - \sqrt{i-1}). \quad (26)$$

### 5.1.2. Implementação em Arduino

O motor movimenta-se através do envio de impulsos pela driver de micro passo. Quanto mais rápido for o envio desses impulsos, mais rápido será o movimento. Por isso, é possível controlar a velocidade do motor variando o intervalo de tempo entre cada impulso enviado, o *delay*. Usualmente, o *delay* é apresentado em microssegundos. Quanto maior o número de ciclos do código de Arduino, maior é a distância percorrida pelo motor. Em cada ciclo são enviados 2 impulsos para o motor, fazendo ativar os 2 conjuntos de bobinas, originando o movimento do motor. Um dos impulsos é enviado com uma polarização inversa, para assim dar continuidade ao

movimento, como referido na secção 4.3. Para facilitar o utilizador, na introdução dos parâmetros iniciais do movimento, como a velocidade ou distância percorrida, foi necessário efetuar algumas conversões, número de ciclos em distância [cm] e *delay* [ $\mu$ s] em velocidade [cm/s]. Estas conversões apenas foram possíveis de se realizar depois da montagem do atuador linear. Para a conversão da distância, introduziu-se um número fixo de ciclos e mediu-se a distância percorrida pela base móvel do atuador linear. Depois de efetuadas as medições necessárias, conclui-se que 1 cm correspondia a 2000 ciclos. Sendo assim, ao introduzir uma certa distância, o código de Arduino realiza automaticamente a conversão necessária para número de ciclos e envia a correspondente informação para a driver de micro passo. Para o problema da conversão da velocidade, definiu-se uma distância e mediu-se o tempo que o motor levava a percorrê-la para diferentes *delays*. Foram definidos 5 *delays*, entre 65 e 100  $\mu$ s. É importante denotar que o motor atinge a sua velocidade máxima a 65  $\mu$ s, abaixo deste valor este deixa de funcionar. Calculou-se a velocidade [cm/s] e, de seguida, realizou-se um ajuste linear ao gráfico velocidade [cm/s] vs *delay* [ $\mu$ s], como se pode ver na Figura 16.



**Figura 16.** Regressão linear e correspondente equação de reta do gráfico Velocidade (cm/s) vs Delay ( $\mu$ s).

Enquanto que o *delay* é fixo para o modo de movimento linear, o *delay* usado para o modo de movimento acelerado e desacelerado tem por base a equação (26). No movimento acelerado, o *delay* diminui ao longo das secções *i*, de forma a que a velocidade aumente ao longo do percurso. No modo desacelerado, o *delay* aumenta resultando numa diminuição da velocidade. Neste último modo, a única diferença reside no uso do sentido oposto do *loop* que contém o *delay*.

```

////////////////////////////////// Parâmetros Iniciais ////////////////////////////////////

// Posição Inicial
int inicio = 1; // Define se se pretende um posicionamento inicial do motor.
const float Vinicial = 3.63; // [cm/s] Define a velocidade do movimento de posicionamento inicial.
const float Pinicial = 5; // [cm] Define a posição inicial do motor.

// Velocidade Constante
int Mov_Cte = 0; // 1 -> Velocidade Constante, 0 -> Velocidade Não Constante (Acelerado ou Desacelerado)
const float Vcte = 3.65; // [cm/s] Define a velocidade do motor. Vcte máx = 3.75 cm/s!
const float Dcte = 5; // [cm] Define a distância percorrida pelo motor.
const int Stop_Mov_Cte = 30; // [s] Define o tempo de paragem.

// Aceleração
int Mov_Acl = 0; // 1 -> Acelerado, 0 -> Não acelerado (Desacelerado ou Velocidade Constante)
const float T_Acl = 4.5; // [s] Define o tempo total do movimento acelerado.
const float D_Acl = 8.85; // [cm] Define a distância percorrida pelo motor.
const int Stop_Acl = 5; // [s] Define o tempo de paragem.

// Desaceleração
int Mov_DaCl = 0; // 1 -> Desacelerado, 0 -> Não desacelerado (Acelerado ou Velocidade Constante)
const float T_DaCl = 4.5; // [s] Define o tempo total do movimento desacelerado.
const float D_DaCl = 8.85; // [cm] Define a distância percorrida pelo motor.
const int Stop_DaCl = 5; // [s] Define o tempo de paragem.

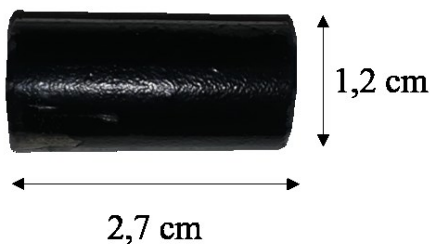
```

**Figura 17.** Cabeçalho do código de Arduino. O utilizador pode definir o tipo de modo de movimento, bem como os parâmetros de cada um.

Na Figura 17 é apresentado um excerto do código de *Arduino* criado. Este proporciona ao utilizador um cabeçalho onde pode escolher os parâmetros de cada um desses movimentos como a velocidade máxima, a distância percorrida ou o tempo de paragem da amostra depois desta atingir a posição final. Para além disso, também dá a opção de posicionar inicialmente a amostra antes desta iniciar o movimento escolhido.

## 5.2. Suportes e Setup

Devido à geometria e propriedades magnéticas da amostra cilíndrica utilizada, mostrada na Figura 18, teve de se montar um suporte específico para o presente trabalho.

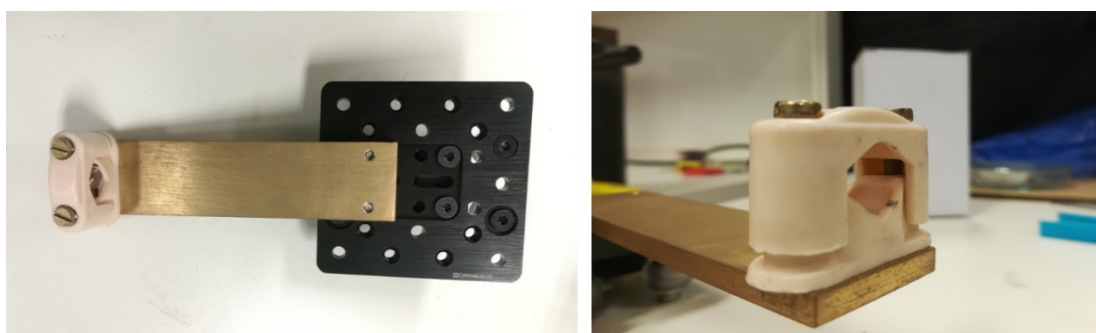


**Figura 18.** Amostra de Gd utilizada.

Este suporte não pode ser feito a partir de um material magnetizável, tem de ser leve para que a base móvel consiga transportar a amostra e, por fim, tem de ser robusto para garantir que segura com firmeza a amostra aquando da aproximação ao campo magnético.

Apesar das limitações, foi possível construir um suporte que cumprisse com os requisitos iniciais. Este foi construído em latão, com 12 cm de comprimento e 2 cm de altura. Estas dimensões foram escolhidas intencionalmente tendo em conta o objetivo de construir um suporte com baixo centro de massa. O comprimento foi escolhido para garantir o movimento da amostra

sem necessitar de usar todo o comprimento do atuador, afastando-se assim dos limites deste, evitando choques desnecessários. Para fixar a amostra ao suporte, pensou-se inicialmente em fazer pequenas incisões na amostra e utilizar parafusos para a segurar. Apesar deste método garantir que a amostra fique fixa, o facto de ter de a deformar, por muito pouco que seja, constitui um grande problema pois a amostra é única, cara e apesar disso, não havia certezas que ao executar as incisões a amostra ficasse ileso sem quebrar ou rachar. Para além disso, este método não seria prático pois ao testar diferentes amostras seria preciso deformar cada uma delas. O método de fixação teria de ser prático e capaz de segurar a amostra sem a deformar de qualquer forma. Para além disso, teria de garantir ser possível observar o máximo da amostra de modo a captar as variações de temperatura da mesma com a câmara IV. Sendo assim, utilizou-se uma abraçadeira de plástico. Esta fixa a amostra aplicando uma pressão uniforme em redor de uma das extremidades da mesma, utilizando para tal 2 parafusos laterais. Desta forma, poder-se-ia testar utilizando outras amostras sem precisar de as deformar. Esta abraçadeira foi colocada na extremidade do suporte de latão com dois pequenos parafusos. A Figura 19 apresenta o suporte de latão bem como a abraçadeira de plástico utilizada.



**Figura 19.** Suporte de latão (esquerda) e abraçadeira de plástico (direita).

### 5.2.1. Setup com Íman Nd-Fe-B

Antes de avançar para o Halbach, decidiu-se começar por utilizar um íman de Nd-Fe-B como fonte de campo magnético com o intuito de testar o setup como um todo e garantir que tudo funciona como devido. Para além de testar o setup, a obtenção de resultados plausíveis utilizando um íman de Nd-Fe-B praticamente garantia que se observaria o efeito magnetocalórico com o Halbach visto este ter um campo magnético bastante superior ao íman. O íman estava fixo por um torno de bancada e disposto de tal forma que a amostra pudesse estar sob a ação do campo magnético mais intenso possível, como demonstrado na Figura 20. A câmara de IV foi posicionada de forma a observar a amostra no instante inicial, repouso, e instante final, sob o campo magnético do íman. Tendo em conta a sensibilidade da câmara de IV, houve a necessidade de atenuar a interferência de fontes de radiação externas que pudessem ser captadas diretamente pela câmara ou



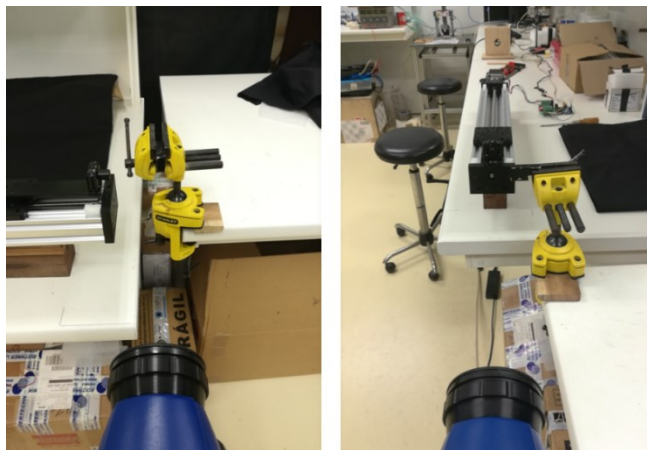
por reflexão de outros objetos. Como se observavam temperaturas mais elevadas do que o esperado, e suficientes para “ofuscar” possíveis diferenças de temperatura observadas na amostra, cobriu-se o setup com um pano preto deixando apenas de fora o corpo da câmera de IV, para que esta não sobreaqueça. Com uma tinta acrílica de spray preto ofuscou-se todo o suporte da amostra, do ímã e outros componentes que pudessem interferir com as medições da câmera, como apresentado na Figura 21. Como se pode ver pela Figura 22, foram feitos vários testes utilizando diferentes ângulos de visão da câmera de IV. Um dos ângulos utilizados encontra-se à esquerda, onde a câmera capta o perfil da amostra à medida que esta se desloca. Um outro ângulo utilizado consistiu na captura da amostra de frente, sendo apenas visível o perfil circular do topo da amostra, representado à direita.



**Figura 20.** Ímã de Nd-Fe-B (esquerda) e torno utilizado para suportar o ímã (direita).

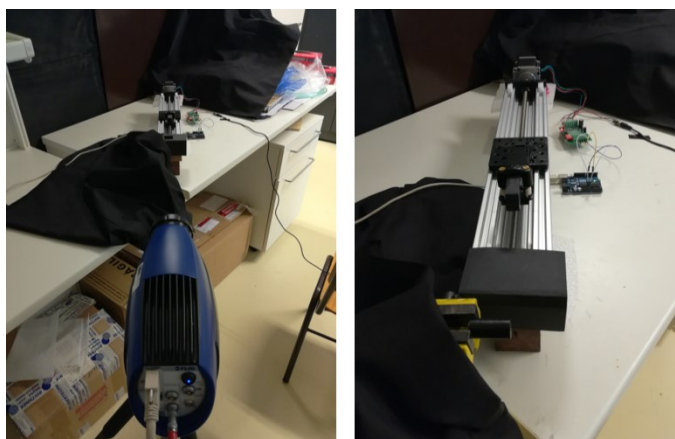


**Figura 21.** Amostra de gadolínio (cima) e ímã (baixo) depois da aplicação da tinta spray preto.



**Figura 22.** Setup com amostra móvel de perfil (esquerda) e frontal (direita) e íman fixo.

Também foi testado um setup onde a amostra se encontrava fixa no torno e o íman na abraçadeira, como apresentado na Figura 23. A câmera foi posicionada de tal forma a captar tanto os momentos em repouso, como quando a amostra se movia. Ora isto provoca uma necessidade em usar várias focagens da câmera. Mesmo alternando o ângulo para poder observar de frente a amostra, o problema permaneceu pois não se conseguia obter leituras precisas do momento de repouso se apenas focando o momento em que a amostra chegava ao íman e vice-versa. Também se trocou a posição da amostra com o íman para que fosse apenas necessário focar a amostra uma única vez, sendo que o íman é que executava os movimentos.



**Figura 23.** Setup com amostra fixa no torno e íman móvel.

### 5.2.2. Setup com Halbach

Com o setup da amostra e íman testado, avançou-se para o setup com o Halbach. Para além do cuidado ao manusear ter de ser redobrado devido ao elevado campo magnético, foi também necessário estruturar um novo suporte. Este teve de cumprir todos os requisitos do suporte da amostra ou do íman, ou seja, teve de ser bastante resistente e robusto para manter o Halbach fixo e

o material de que é feito não pode ser magnetizável. Sendo assim, optou-se por um suporte em madeira. Para garantir que o Halbach se mantivesse fixo o suporte foi desenhado como uma caixa. Esta caixa tem as dimensões do Halbach, ou seja, a altura e o comprimento escolhidos fossem iguais ao diâmetro do Halbach e a largura da caixa igual à largura do Halbach. Assim, o Halbach estaria completamente confinado sem qualquer espaço para se movimentar dentro da caixa. De seguida, foram feitos dois furos em cada um dos lados da caixa com um diâmetro igual ao do círculo interior do Halbach para este ficasse visível. Por fim, reforçou-se um dos lados da caixa, assim como a base da mesma. O reforço na base garantiu uma área onde fosse possível grampear a caixa à bancada e assim mantê-la fixa. A Figura 24 mostra o suporte do Halbach mencionado. A montagem de todo o setup pode ser visto na Figura 25. A câmera encontra-se alinhada com a amostra e os orifícios do Halbach, para que seja possível analisar a temperatura da amostra ao longo de todo o percurso. Nesta configuração, a câmera encontra-se próxima do suporte, ou seja, apenas observa a face do suporte, pelo que não são necessários métodos para atenuar a refletância como os utilizados nos setups anteriores.



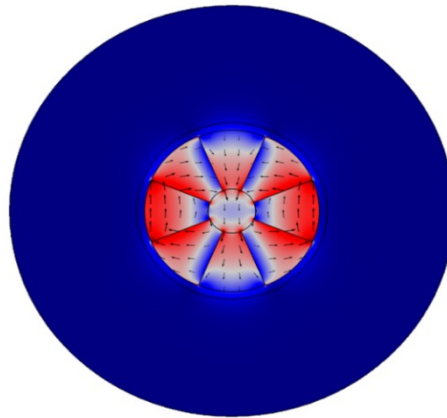
**Figura 24.** Suporte do Halbach em madeira e grampos utilizados.



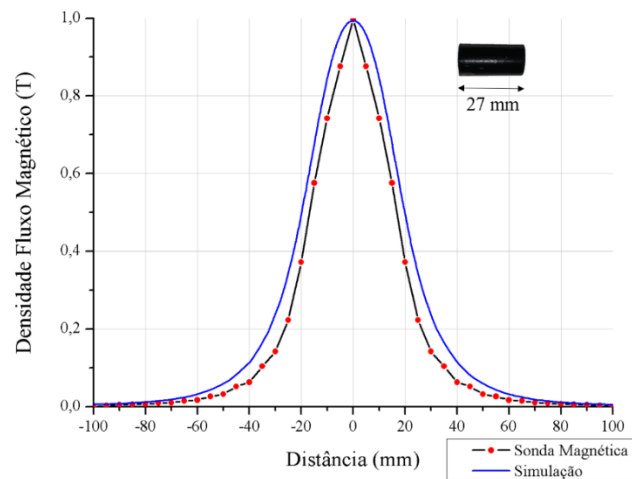
**Figura 25.** Setup com o Halbach.

Por fim, determinou-se o perfil magnético do Halbach e comparou-se os valores obtidos com valores calculados. Para tal, foi realizado uma simulação numérica do Halbach utilizado no software COMSOL Multiphysics (v5.2) e determinado o fluxo de campo magnético com uma sonda magnética. A Figura 26 representa os valores do campo magnético de uma simulação do

Halbach com as dimensões descritas. A Figura 27 mostra o perfil que foi recolhido utilizando uma sonda magnética Wuntronic OW 2, a partir de uma distância de 10 cm até ao centro do Halbach, assim como a simulação feita em COMSOL. Pela Figura 27 percebe-se que o perfil medido com a sonda é bastante semelhante ao perfil simulado. Tanto o comportamento da intensidade do campo ao longo da distância como o pico de intensidade batem certo com as previsões feitas em COMSOL. O perfil do Halbach representado na Figura 27 não é o mais adequado para estas experiências.



**Figura 26.** Representação do Halbach simulado em COMSOL.

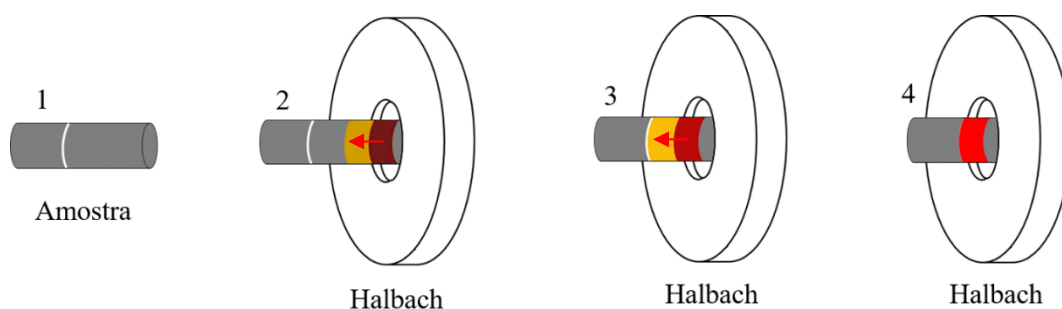


**Figura 27.** Perfil magnético do Halbach utilizado. A azul encontra-se representado a simulação feita em COMSOL e a preto e vermelho está representado o perfil magnético calculado com uma sonda magnética.

### 5.2.3. Setup *Heating by Sweeping*

Considerando o que foi referido na secção 3.4 e para observar o efeito de *heating by sweeping*, foi necessário dividir a amostra em vários elementos. Como mostrado na Figura 28, começou-se por definir uma zona de interesse, 1. Essa é a zona a monitorizar durante todo este

processo e encontra-se representada por uma linha branca na amostra. Quando a amostra se aproxima do campo magnético do Halbach, a variação adiabática do campo magnético resulta numa variação de temperatura na amostra, representado a vermelho escuro. O fluxo de calor proveniente desta zona para a zona vizinha, a amarelo escuro, é representada por uma seta a vermelho. Este fluxo ocorre porque há um intervalo de tempo que permitiu que a amostra possa dispersar o calor pela vizinhança. A zona a amarelo escuro aumenta de temperatura em relação à temperatura inicial registada em 1. Aproximando ainda mais a amostra do Halbach, representado por 3, o efeito magnetocalórico ocorre até à zona representada anteriormente a amarelo escuro em 2, desta vez representada a vermelho mais claro. Como esta zona já sofrera um aumento de temperatura devido à dispersão do calor pela amostra, esta atinge um novo máximo de temperatura. Tal acontece porque o efeito magnetocalórico vai se sobrepor à dispersão de calor já sentida nessa zona. Por fim, ao aproximar a amostra o mais perto possível do centro do Halbach, é agora a zona a amarelo que sofre o efeito magnetocalórico em 4, atingindo desta forma a temperatura máxima para a zona marcada a branco inicialmente. A partir daqui, é possível calcular a variação de temperatura da zona em estudo que é, em princípio, superior à variação de temperatura adiabática da amostra. É importante referir que o efeito magnetocalórico, representado pelos elementos a vermelho, ocorre sempre no centro do Halbach, onde a intensidade de campo é máxima.



**Figura 28.** Representação do efeito *heating by sweeping*.

O setup utilizado para observar o efeito *heating by sweeping* foi bastante semelhante ao utilizado na secção anterior, tendo apenas sido trocada a posição da câmara para que esta conseguisse observar a amostra transversalmente e assim monitorizar a temperatura de uma zona específica da amostra. O setup encontra-se representado na Figura 29, onde a linha branca referida anteriormente está representada por um fio branco.

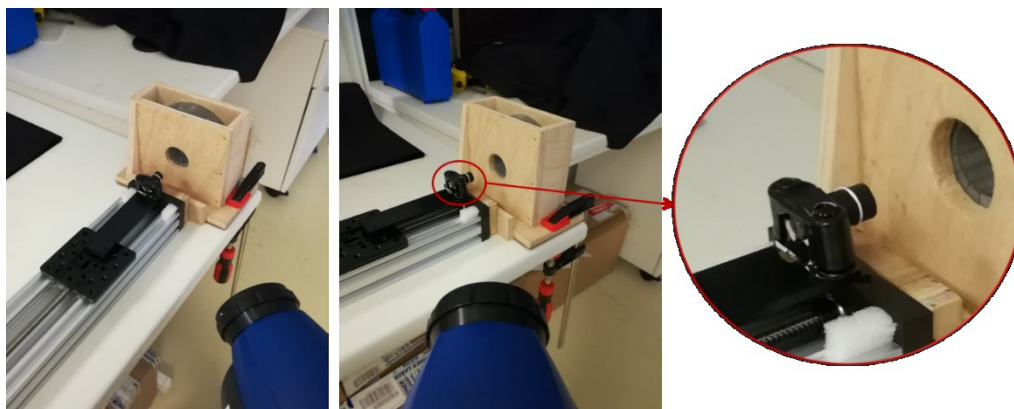
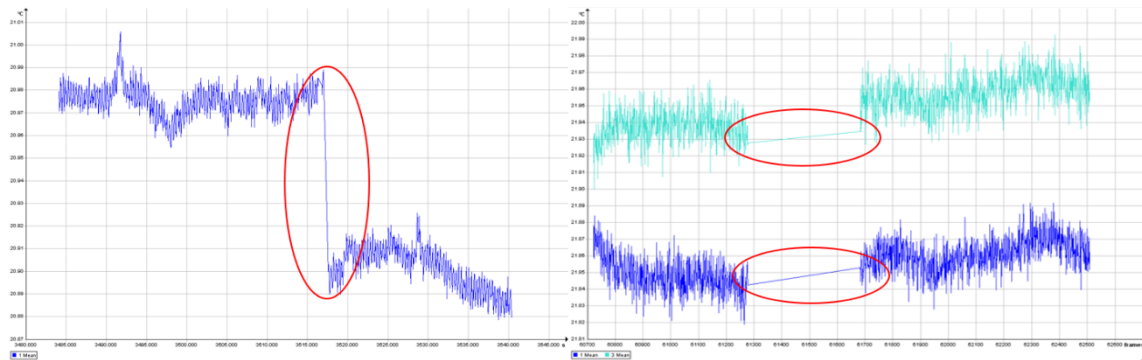


Figura 29. Setup para o processo de *heating by sweeping*.

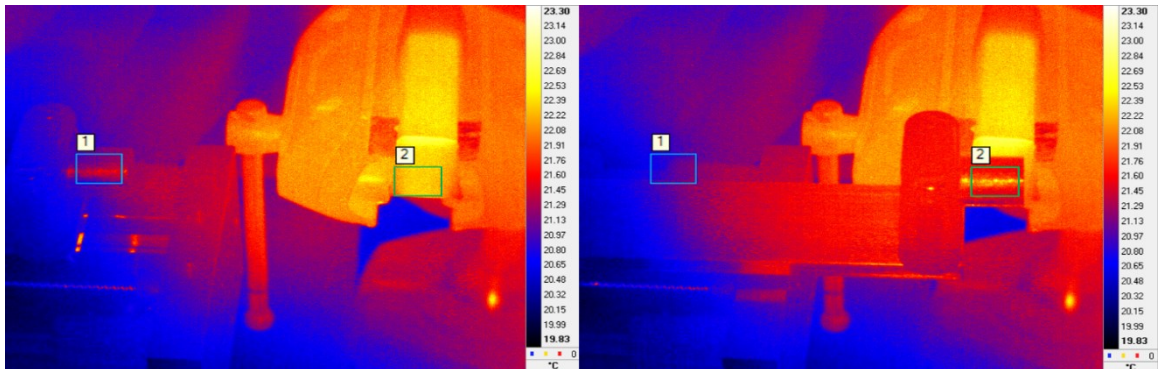
### 5.3. Medição da Temperatura por Termometria IV

A utilização da câmera de IV exige vários cuidados, sendo o mais importante a sua calibração. De facto, antes de qualquer medição, é necessário calibrar a câmera efetuando um teste de calibração NUC (*non-uniformity compensation*) com um objeto negro (geralmente a tampa da câmera). A câmera só se encontra preparada para efetuar medições cerca de 1h30m a 2h depois da calibração. Este é um período de tempo suficiente para que a câmera possa aquecer e estabilizar, evitando assim leituras erradas. Outro cuidado a ter é o facto da câmera ir realizando calibrações finas aleatoriamente no tempo. Nestes instantes observam-se saltos na temperatura que podem coincidir com o aumento ou diminuição da temperatura da amostra com a aproximação de um campo magnético. No entanto, na maior parte das ocorrências, estes saltos são facilmente identificáveis. Se for identificável, o mais correto é parar a medição e começar de novo. Estas “atualizações” tornam-se cada vez mais espaçadas com o passar do tempo. Na eventualidade de não serem identificáveis com tanta facilidade, é aconselhado repetir cada medição entre 3 a 5 vezes, para que desta forma se consiga garantir que qualquer irregularidade, tanto na câmera como no setup, não sejam prejudiciais para a medição. Dois exemplos da ocorrência destas atualizações estão representados na Figura 30.



**Figura 30.** Exemplos de uma "atualização" da câmera de IV em duas situações diferentes. Direita: Monitorização da temperatura da amostra de Gd. Esquerda: Monitorização da temperatura da amostra e íman de Nd-Fe-B. O pico de temperatura geralmente ronda os 0.1 °C, pelo que requer bastante atenção quando se trabalha com variações temperatura nesta ordem de grandeza.

A focagem da câmera é controlada no *software Altair* ao definir uma área de interesse onde é possível observar a variação de temperatura dessa mesma área ao longo de todo o processo, como representado na Figura 31. Neste caso, definiu-se duas áreas de interesse: dois retângulos (1 e 2) que representam a posição inicial da amostra (1) e a posição final (2). Dependendo do perfil da amostra que se está a observar, é possível definir uma área diferente, por exemplo um círculo para facilitar a monitorização da temperatura quando se observa a amostra de frente.



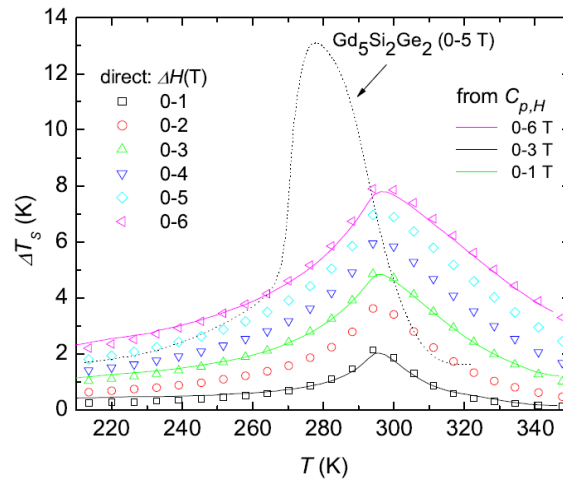
**Figura 31.** Captura de ecrã do *software Altair* exemplificando as áreas de interesse.

## 6. Resultados e Discussão

Este capítulo apresenta todos os resultados referentes aos testes do setup de medição direta do efeito magnetocalórico assim como os resultados do setup para a observação do processo de *heating by sweeping*.

## 6.1. Efeito Magnetocalórico

Tendo em conta o tipo de experiência idealizada, procurou-se determinar a variação de temperatura esperada tanto para o setup com o íman Nd-Fe-B como para o setup com o Halbach. Para isso, mediu-se o campo magnético da superfície lateral do íman de Nd-Fe-B com a sonda usada na secção 5.2, obtendo-se 0.1 T. O campo magnético do Halbach no seu centro é de 1 T, de acordo com as medições do perfil magnético da secção 5.2.



**Figura 32.** Representação da variação de temperatura adiabática de uma amostra de Gd vs a temperatura inicial, para vários campos magnéticos. Os dados comparativos de uma amostra de  $Gd_5Si_2Ge_{1.9}Ga_{0.1}$  são também mostrados [35].

De modo a ter uma referência para as variações de temperatura obtidas neste trabalho, analisou-se os resultados da referência [35], Figura 32. Assim, considerando a temperatura inicial da amostra  $\sim 295$  K para um campo magnético de 1 T, espera-se uma variação de 2 K. É de notar que não foi possível encontrar valores esperados para a variação de temperatura para campos magnéticos perto de 0.1 T, tendo por isso sido utilizado como referência os valores encontrados para 0.25 T,  $\sim 1$  K [36].

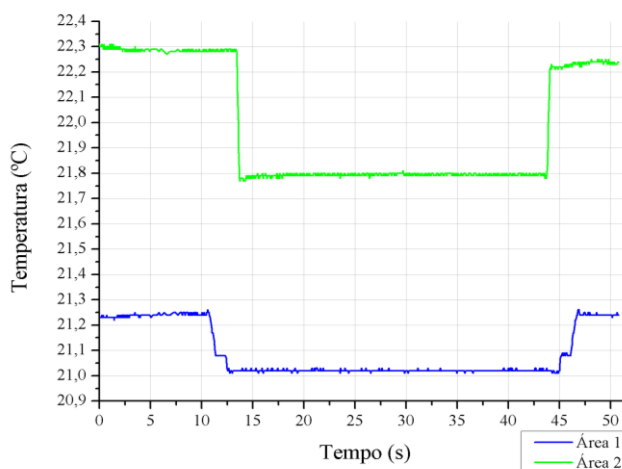
### 6.1.1. Íman Nd-Fe-B

Como o campo magnético gerado pelo íman de Nd-Fe-B é muito baixo, utilizaram-se as medições para aperfeiçoar os vários parâmetros do setup experimental como a posição da câmara, da amostra e do íman, entre outros. As medições foram efetuadas fixando o íman num torno e usando o mesmo tipo de movimento, com uma velocidade sempre constante, para ser possível comparar os resultados obtidos em cada um dos testes.

Numa primeira tentativa, a câmara de IV foi posicionada de forma a conseguir observar o perfil da amostra enquanto esta executava um movimento com velocidade constante de 3,75 cm/s. O íman encontrava-se coberto por uma cartolina preta para diminuir as reflexões discutidas no



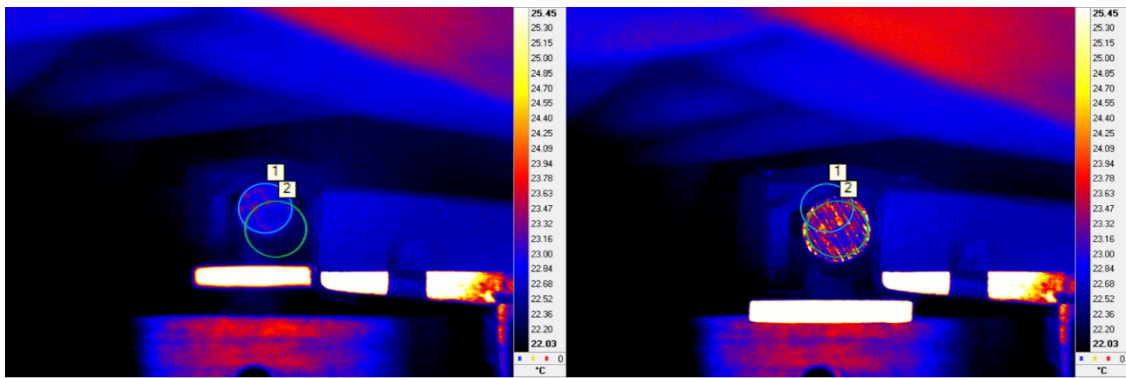
capítulo anterior. A Figura 33 apresenta os resultados do teste referente ao setup apresentado na Figura 31. É possível afirmar que, por volta dos 12.5 s, ocorre um pico na temperatura da área 2. Tal representa a chegada da amostra a essa mesma área, ou seja, à influência do campo magnético do íman. Nos primeiros 12.5 s do movimento o que se observa pelo gráfico da área 1 é a temperatura de repouso da amostra, cerca de 21.25 °C. No gráfico da área 2, observa-se a temperatura dessa região ainda sem a amostra. A partir dos 12.5 s, momento em que a amostra se encontra posicionada ao lado do íman, a temperatura registada da área 2 já ronda os 21.8 °C, o que representa um acréscimo de 0.65 °C. O tempo de repouso neste teste foi de 30 s, como se pode confirmar pelo gráfico. No final do teste, a amostra volta à sua posição inicial, e a temperatura volta a atingir os valores registados inicialmente.



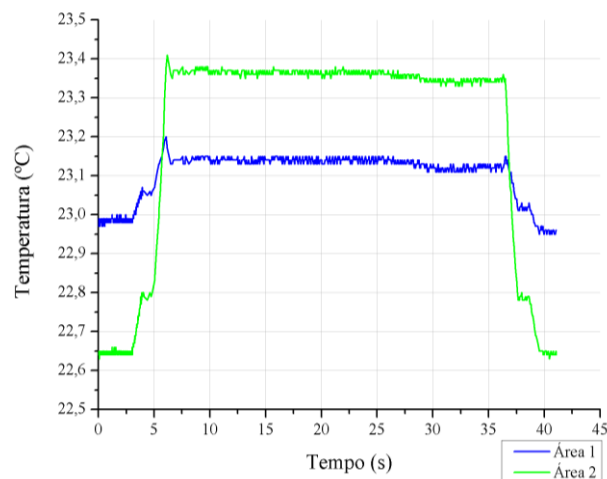
**Figura 33.** Temperatura (°C) vs Tempo (s) da amostra na configuração mostrada na Figura 31.

Estes dados não se encontram com o comportamento que seria espectável, apesar de se obter uma variação de temperatura considerável. Seria esperado um salto de temperatura bastante proeminente e de seguida uma diminuição da temperatura gradual. O que se obtém é uma estabilização da temperatura sem que esta diminua enquanto se encontra sob a influência do campo magnético do íman. De facto, à medida que a amostra se aproxima do íman, existe uma variação na emissão não só da amostra, como de todo o suporte da mesma. Isto pode indicar a aproximação da amostra a uma fonte de radiação, como a própria câmara IV, e assim comprometer os resultados obtidos. Outro motivo para a variação da temperatura pode estar relacionado com a própria iluminação do laboratório, bem como a posição da câmara de IV que proporcionam uma ilusão de aumento de temperatura da amostra à medida que esta se aproxima do íman. Assim, a variação observada pode não ser causada pelo efeito magnetocalórico, mas sim devido à interferência de fontes externas, explicando o facto das temperaturas iniciais das áreas 1 e 2 serem diferentes.

Para ter a certeza que estamos perante o efeito magnetocalórico, optou-se por fazer algumas modificações ao setup, mantendo os mesmos parâmetros para os testes. Estas podem ser observadas na Figura 34. Em primeiro lugar, alterou-se o ângulo da câmara de IV para esta observar a amostra de frente e cobriu-se o fundo com um pano preto para reduzir o impacto da iluminação. Desta forma, garantia-se a medição da temperatura da amostra ao longo de todo o percurso, com a desvantagem de não ser possível focar a amostra em ambos os pontos de repouso e final. É possível perceber a desvantagem da focagem: na imagem da esquerda, a amostra não se encontra focada no seu estado de repouso ao contrário do seu estado final na imagem da direita onde se consegue observar que se encontra focada. É importante denotar que as duas áreas encontram-se desalinhadas devido à posição da câmara de IV e ao facto de a amostra se desviar ao se aproximar do íman.



**Figura 34.** Áreas de interesse no teste com a câmara de IV posicionada em frente à amostra e com um pano preto como cobertura.

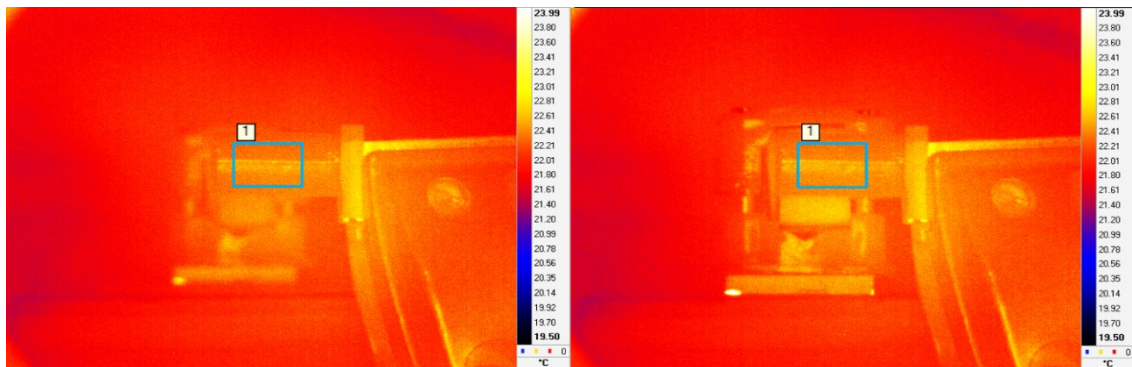


**Figura 35.** Representação do comportamento Temperatura (°C) vs Tempo (s) correspondente à Figura 34.

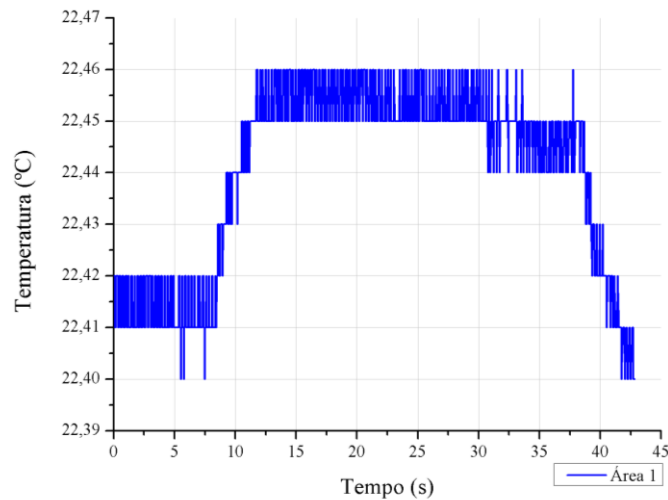
A Figura 35 representa a temperatura ao longo do tempo do setup da Figura 34 para as áreas 1 e 2. Enquanto que a temperatura de repouso da amostra ronda os 23 °C, no momento em que a amostra chega ao íman esta aumenta cerca de 0.35 °C para os 23.35 °C. Obtém-se um

comportamento mais semelhante ao previsto, onde se consegue observar um salto de temperatura e uma diminuição durante o período em que a amostra se encontra sob o efeito do campo magnético. No entanto, existem algumas incongruências com este teste, nomeadamente o facto do salto de temperatura ser bastante lento, demorando cerca de 3 segundos. O esperado seria que este salto fosse bastante rápido. Para além disso, o tempo de diminuição de temperatura é demasiado rápido. Era espectável que esta diminuísse gradualmente ao longo do tempo de paragem, os 30 segundos. A focagem pode ter influenciado os resultados pois não foi possível obter um valor constante para a temperatura de repouso. O posicionamento dos componentes do setup, como se consegue observar pela figura, também não deverá ter sido o melhor.

Para reduzir o problema da focagem e do desalinhamento da amostra com a câmara e atuador, troca-se a posição da amostra com a posição do íman, como representado na Figura 36. Desta vez, optou-se por cobrir tanto a amostra como o íman com uma tinta de spray preta. Com esta configuração, resolve-se o problema da focagem, pois desta vez o foco é feito na amostra que se encontra fixa. A Figura 37 representa a variação de temperatura observada na amostra referente à montagem apresentada na Figura 36. Tendo em conta a grande flutuação da temperatura ao longo de todo o processo, é difícil concluir que a variação de cerca de 0.04 °C se deve ao efeito magnetocalórico e não da influência mecânica do setup.



**Figura 36.** Áreas de interesse no teste com a câmara de IV posicionada em frente ao íman com a amostra fixa no torno. Tanto a amostra como o íman encontravam-se pintados de preto.

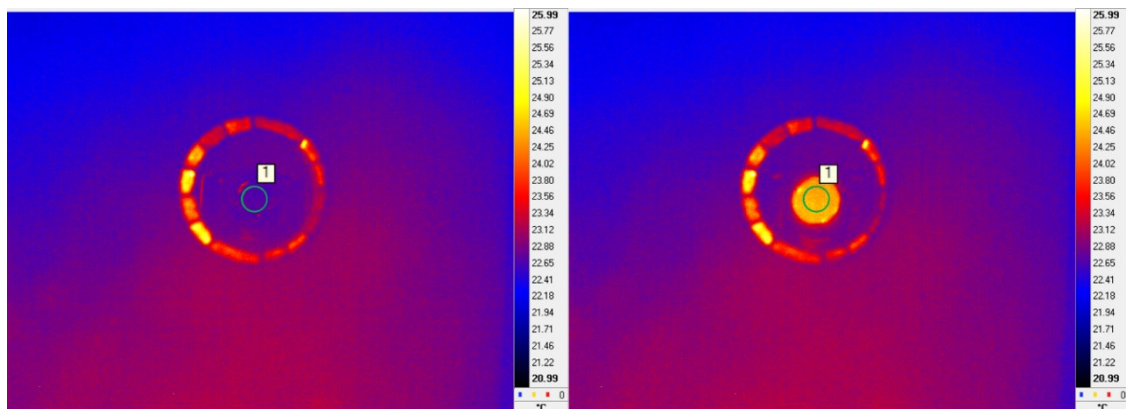


**Figura 37.** Representação do comportamento Temperatura (°C) vs Tempo (s) correspondente à montagem da Figura 36.

Em suma, não é possível concluir se as medições feitas no setup com o íman se deve ao efeito magnetocalórico. Tal pode dever-se ao facto do campo magnético ser demasiado baixo, da velocidade máxima não ser suficiente para criar uma variação de campo abrupta ou se se está a medir outros fenómenos radiativos.

### 6.1.2. Halbach

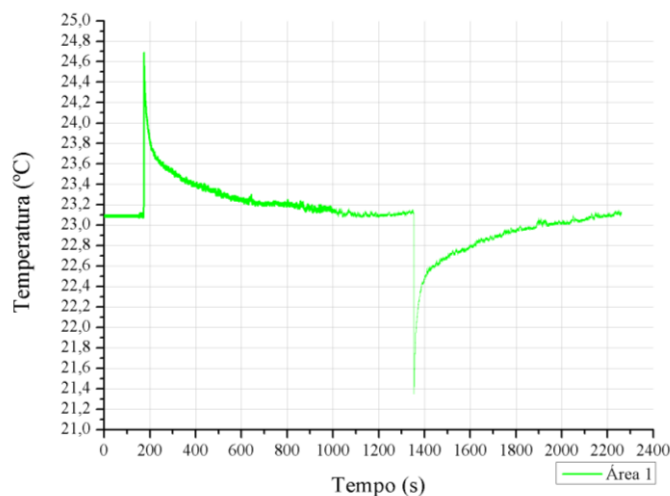
O setup utilizado com o Halbach está descrito na secção 5.2. O procedimento utilizado foi semelhante ao caso do íman. Em primeiro lugar utilizou-se o modo de movimento linear com velocidade constante de 3.65 cm/s, velocidade máxima do motor.



**Figura 38.** Fotografia IV para a posição inicial e final da amostra do setup com o Halbach. Velocidade constante de 3,65 cm/s.

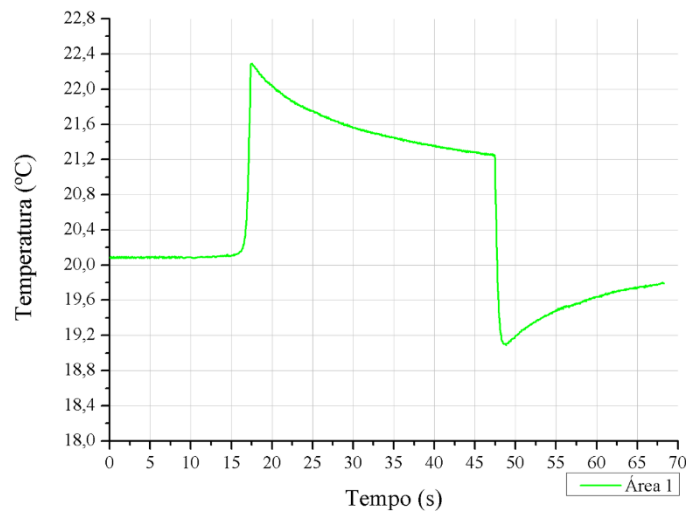
A Figura 38 mostra 2 fotografias IV para o setup do Halbach: amostra na posição inicial (esquerda) e final (direita). No caso deste setup não é preciso utilizar duas áreas de interesse distintas pois a câmara encontra-se completamente alinhada com a amostra. Tal não era possível

com o setup do íman devido à instabilidade do torno. Como o suporte do Halbach se encontra num canto da bancada, torna-se mais simples o alinhamento da amostra com a câmara.



**Figura 39.** Temperatura (°C) vs Tempo (s) correspondente à montagem usada das fotografias IV da Figura 38.

A Figura 39 mostra a evolução no tempo da temperatura da amostra durante os processos de aplicação e remoção do campo magnético. Como se pode observar registou-se uma variação de temperatura de  $\Delta T_{ad} = 1.6$  °C na aplicação do campo magnético. A variação observada vai de encontro com os valores descritos na Figura 32 para este campo magnético e para esta temperatura inicial, 23.1 °C. Durante o tempo em que a amostra se encontra dentro do Halbach, a temperatura desta foi diminuindo gradualmente, como seria de esperar, até atingir novamente a temperatura inicial. Também se regista uma variação adiabática de temperatura de  $\Delta T_{ad} = 1.7$  °C durante a desmagnetização da amostra. Assim que a amostra deixou de estar sob a influência do campo magnético do Halbach, a temperatura começou a estabilizar novamente para a temperatura inicial. Pelos resultados obtidos pode-se concluir que a variação de temperatura observada deve-se ao efeito magnetocalórico.



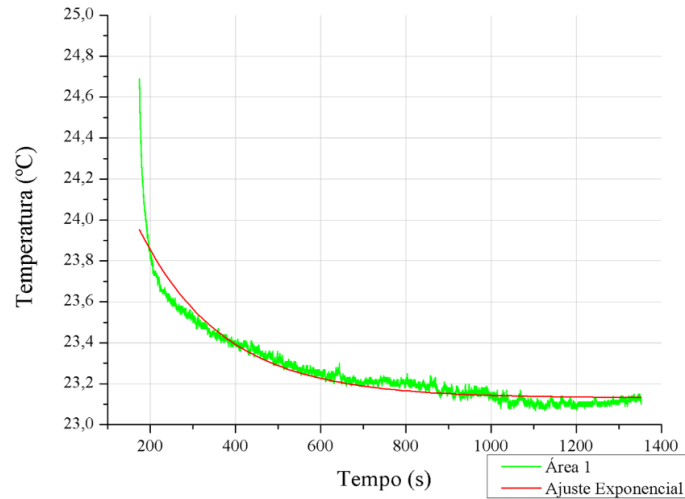
**Figura 40.** Temperatura (°C) vs Tempo (s) correspondente a uma montagem semelhante à usada das fotografias IV da Figura 38, com um tempo de repouso de 30 s.

A Figura 40 mostra a evolução da temperatura no tempo para uma montagem semelhante à utilizada na Figura 38, mas com um tempo de repouso de apenas 30 s e uma temperatura inicial inferior,  $\sim 20$  °C. Este teste serve para provar que o que se observa trata-se do efeito magnetocalórico e não de indução magnética. A indução magnética caracteriza-se pelo aumento de temperatura com a variação do campo magnético. Tal poderia justificar as variações de temperatura, porém o que se observa são 2 saltos de temperatura muito semelhantes entre si, sendo que um deles corresponde a um decréscimo de temperatura, característico do efeito magnetocalórico. Para além de confirmar a observação do efeito magnetocalórico, a Figura 40 também representa o teste onde se obteve a variação de temperatura adiabática máxima ao longo de todo este trabalho,  $\Delta T_{ad} = 2.2$  °C. Tal deve-se ao facto de a temperatura ambiente se encontrar muito perto da temperatura de Curie do Gd e desta forma, obtém-se um efeito mais intenso. Os resultados referentes a este teste serão utilizados na secção seguinte 6.2. *Heating by Sweeping*.

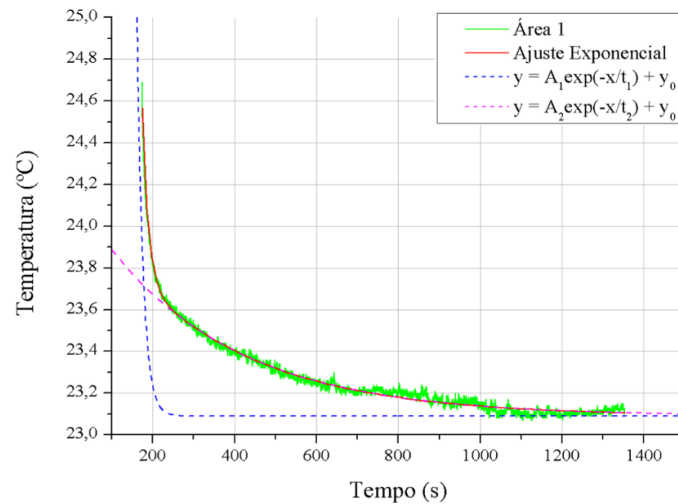
Para entender melhor sobre os processos térmicos envolvidos ajusta-se a curva  $T(t)$ , Figura 39, depois da aplicação do campo magnético com exponenciais. Utilizando apenas uma exponencial, como mostra a Figura 41, obteve-se um  $R^2 = 0.928$ . Como o processo no seu conjunto parece envolver 2 registos (um para baixos  $t$  e outro durante todo o teste) decidiu-se testar um ajuste com duas exponenciais, resultando desta vez num  $R^2 = 0.992$ , representado na Figura 42 e tem a seguinte forma:

$$y = A_1 e^{(-x/t_1)} + A_2 e^{(-x/t_2)} + y_0, \quad (27)$$

onde  $y_0 = 23.09 \pm 3.30 \times 10^{-4}$ ,  $A_1 = 9.42 \times 10^4 \pm 4.52 \times 10^3$ ,  $t_1 = 14.99 \pm 0.06$ ,  $A_2 = 1.09 \pm 0.002$  e  $t_2 = 321.06 \pm 0.74$ .



**Figura 41.** Ajuste de uma exponencial ao conjunto de dados referentes à Figura 39.



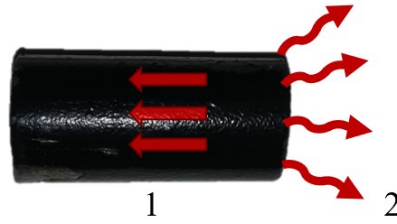
**Figura 42.** Ajuste de duas exponenciais ao conjunto de dados referentes à Figura 39.

Estes dois processos de relaxação térmica podem estar relacionados com a condução de calor interno pela amostra e dissipação de calor para o exterior, como representado na Figura 43. De modo a identificar os 2 processos térmicos realizou-se 2 simulações numéricas de forma a extrair tempos característicos de relaxação para estes 2 processos térmicos. Para a simulação do processo da condução de calor interno, definiu-se uma amostra de Gd a 2 dimensões com as mesmas dimensões da amostra utilizada e isolada termicamente. Desta forma, garantiu-se que o único processo observado se tratava da condução de calor pela amostra. Para tal, dividiu-se a amostra em duas metades de tal forma a que apenas uma secção da mesma estivesse a uma temperatura superior. A Figura 44 representa a geometria e rede utilizada na simulação. Uma destas metades encontra-se à temperatura ambiente, 23.1 °C, enquanto que a outra metade se encontra à temperatura máxima atingida no teste experimental, 24.7 °C. Definiu-se um passo e um tempo de

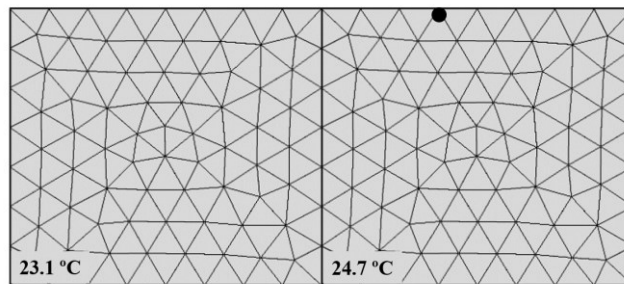
simulação de 1 e 100 segundos, respetivamente, e obteve-se a condução da temperatura no ponto de prova, representado na Figura 45. Para extrair um tempo característico realizou-se um ajuste à curva  $T(t)$ , obtendo-se a seguinte curva com  $R^2 = 0.999$ :

$$y = A_r e^{(-x/t_r)} + y_0, \quad (28)$$

onde  $y_0 = 23.85 \pm 8.54 \times 10^{-4}$ ,  $A_r = 0.74 \pm 0.003$  e  $t_r = 12.00 \pm 0.09$ . Em suma, o tempo de relaxação do processo de condução interno de calor ronda os 12 s.

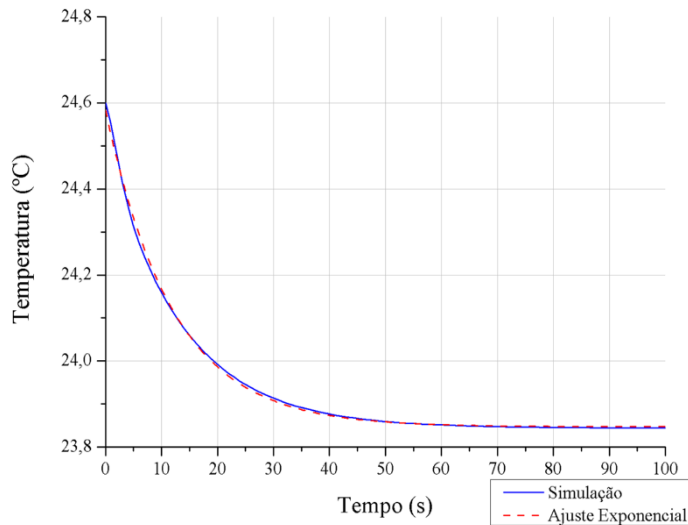


**Figura 43.** Representação dos processos térmicos na amostra de Gd. (1) Condução de calor interno, (2) Dissipação de calor para o exterior.



**Figura 44.** Geometria e rede utilizada na simulação feita em COMSOL. O ponto preto representa o ponto de prova.



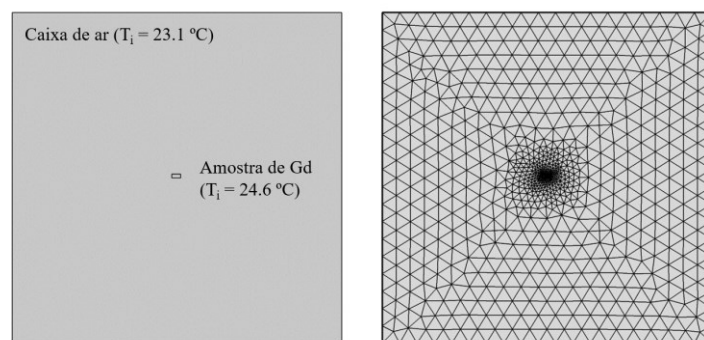


**Figura 45.** Evolução da temperatura no tempo do ponto de prova da Figura 44 extraído da simulação numérica e respetivo ajuste exponencial.

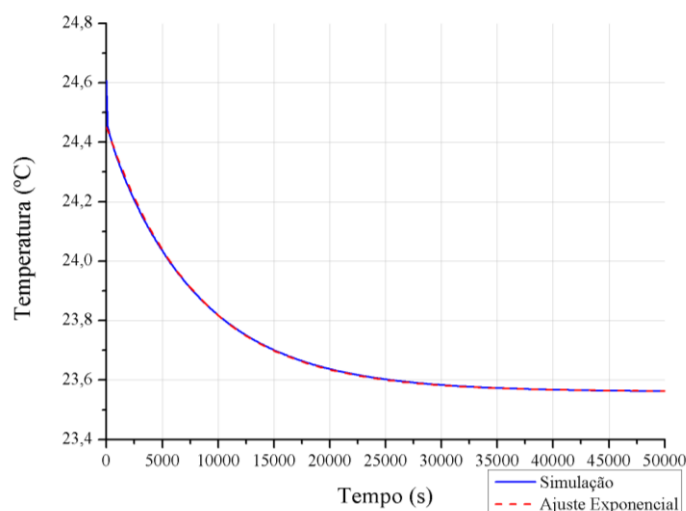
Para a simulação numérica do processo de dissipação de calor para o exterior definiu-se uma temperatura ambiente de 23.1 °C, igual à registada no momento da aquisição dos dados, e uma temperatura da amostra de 24.6 °C, temperatura depois de aplicar o campo magnético. A Figura 46 mostra a geometria e rede usada na simulação feita em COMSOL. Neste caso, a amostra de Gd encontra-se numa caixa de ar. Depois de definidos tanto o *step* como o tempo total da simulação, respetivamente, 100 e 50000 segundos, obteve-se a curva T(t) representada na Figura 47. O ajuste exponencial resultou o num  $R^2 = 0.999$ . O ajuste realizado tem a seguinte forma:

$$y = A_l e^{(-x/t_l)} + y_0, \quad (29)$$

onde  $y_0 = 23.56 \pm 2.02 \times 10^{-4}$ ,  $A_l = 0.89 \pm 1.16 \times 10^{-3}$ ,  $t_l = 8.05 \times 10^3 \pm 16.63$ . É importante referir que a simulação realizada não teve em consideração as correntes de convecção de calor pelo que o valor do tempo de relaxação deverá ser inferior ao obtido.



**Figura 46.** Geometria do sistema simulado (esquerda) e respetiva rede (direita).



**Figura 47.** Evolução da temperatura no tempo do centro da amostra de Gd e respetivo ajuste exponencial.

Em suma, o tempo de relaxação do processo de dissipação de calor para o exterior obtido pela simulação numérica ronda os 8000 s, valor bastante superior ao valor obtido para o processo de condução interno de calor.

Comparando os tempos de relaxação obtidos pelo ajuste exponencial,  $t_1$  e  $t_2$ , com os tempos obtidos por simulações,  $t_r$  e  $t_l$ , é possível identificar cada um dos processos, Tabela 1. A condução de calor interno pela amostra segue o comportamento descrito pela exponencial  $y = A_1 e^{(-x/t_1)} + y_0$ , apresentando um tempo de relaxação de 14.99 s, que conjuga bem com o tempo obtido pela simulação de  $\sim 12$  s. A dissipação de calor para o exterior segue o comportamento descrito pela exponencial  $y = A_2 e^{(-x/t_2)} + y_0$ , apresentando um tempo de relaxação de 321.06 s, que compara com o tempo obtido pela simulação de  $\sim 8000$  s. A identificação dos processos é feita não só analisando a diferença entre os tempos obtidos, pois, à partida, o processo mais rápido corresponde ao processo de condução de calor, mas também pela semelhança dos valores obtidos com os esperados. No que diz respeito ao tempo de relaxação da condução de calor, este encontra-se bastante perto do que seria expectável pela simulação. No entanto, o mesmo não se pode afirmar para o processo de dissipação de calor, onde se observa uma diferença bastante considerável entre o tempo obtido e o esperado. Tal pode dever-se ao facto de não se ter considerado as correntes de convecção de calor nas simulações, que afetaria os resultados obtidos, bem como o facto de as simulações terem sido feitas em 2D e não em 3D.

**Tabela 1.** Tempos de relaxação.

<i>Processos térmicos</i>	<i>Condução interna de calor</i>	<i>Dissipação de calor para o exterior</i>
<i>Experimental</i>	$\sim 14.99$ s	$\sim 321.06$ s
<i>Simulação</i>	$\sim 12$ s	$\sim 8050$ s

## 6.2. Heating by Sweeping

Para tentar observar o efeito de *heating by sweeping* utilizou-se o setup do Halbach. Foram realizados 3 testes, todos com a mesma velocidade, mas diferentes tempos de repouso entre secções: 30, 15 e 1 segundos. Em cada teste, a amostra começa numa posição inicial de repouso e percorre 5 secções até atingir a posição final.

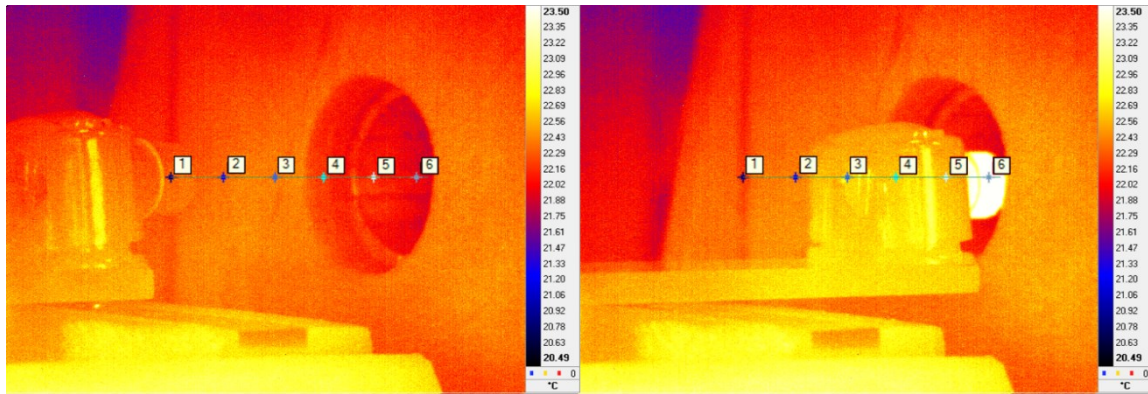


Figura 48. Secções percorridas pela amostra.

A Figura 48 mostra as secções utilizadas para os testes. A secção 1 representa a posição inicial, de repouso, e a secção 6 a posição final. São medidas as temperaturas de cada secção e no final é calculada a diferença de temperatura entre a primeira e última secção. As temperaturas são medidas nos pontos marcado na Figura 48. Todos os pontos encontram-se separados à mesma distância (1 cm) e todos são medidos na mesma zona da amostra, daí a utilização do fio branco que é facilmente identificável na câmara.

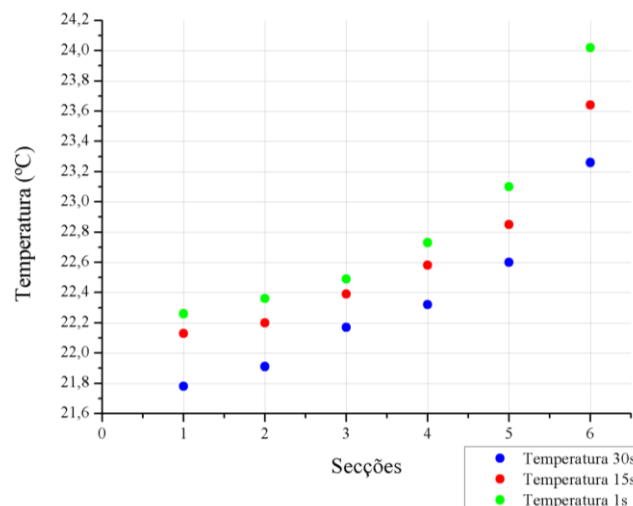


Figura 49. Temperatura de cada secção para os tempos de repouso de 30 segundos (azul), 15 segundos (vermelho) e 1 segundo (verde).

A Figura 49 mostra as temperaturas de cada secção para os 3 tempos de repouso 1 s, 15 s e 30 s, onde a temperatura inicial (temperatura ambiente) rondava os  $T_i \approx 22$  °C para todos os testes.

Com um tempo de repouso de 30 segundos, obteve-se uma variação de temperatura de 1,48 °C. Comparando com a variação máxima obtida em testes anteriores,  $\Delta T = 2.2$  °C, esta encontra-se bastante abaixo do que seria esperado para o efeito em estudo ( $> \Delta T_{ad}$ ). Analisando o gráfico, observa-se que o comportamento parece estar correlacionado com o perfil magnético do Halbach. De facto, a ocorrência do efeito magnetocalórico muito antes de a amostra se aproximar do centro do mesmo é suficiente para que os respetivos processos térmicos destruam o efeito de *heating by sweeping*. O mesmo acontece para os 2 restantes tempos de repouso. No entanto, a variação de temperatura entre as secções 1 e 6, aumenta com a diminuição do tempo de repouso, i.e. 1.48 °C para 30 s, 1.51 °C para 15 s e 1.76 °C para 1 s. Tal acontece uma vez que os processos térmicos devido ao perfil magnético do Halbach têm cada vez menos tempo para ocorrerem. Ainda assim, esta variação continua abaixo do que seria esperado.

Em suma, não foi possível verificar uma variação de temperatura superior à variação adiabática do Gd para este campo. Para ser possível observar tal variação, o Halbach deveria apresentar um perfil magnético menos largo, ou seja, a variação da intensidade do campo magnético teria de ser mais abrupta. A uma certa distância do centro do Halbach, a variação do campo magnético é suficiente para induzir o efeito magnetocalórico e destruir o efeito de *heating by sweeping*, pois o efeito magnetocalórico ocorre no elemento que se está a monitorizar sem que este se encontre no centro do Halbach. Sendo assim, o elemento vai registando aumentos de temperatura correspondentes a pequenas variações do campo ao longo do processo. O desejado seria que a amostra sofresse pequenas variações de temperatura correspondentes a transferências de calor do elemento adjacente e apenas quando se encontrasse no centro do Halbach, é que o efeito magnetocalórico ocorreria. Para além disso, a amostra deveria ser mais longa para reduzir o impacto de um perfil magnético tão largo como o do Halbach utilizado. Devido ao seu comprimento, não se consegue garantir que uma extremidade esteja sobre a ação do campo magnético máximo e a outra extremidade sobre um campo magnético perto de zero. Neste caso, uma das extremidades está sob a influência de um campo de 1 T e a outra extremidade sob a influência de um campo de 0.4 T.

Apesar de não ter sido possível observar uma variação de temperatura superior à adiabática, foi possível confirmar que ao diminuir o tempo de repouso entre secções se aumentaria a diferença de temperatura final. Isto porque ao diminuir este tempo, diminui-se as trocas de calor pela amostra fazendo com que esta retenha o seu calor à medida que percorre as várias secções.

## 7. Conclusões

Foi montado um setup experimental para medir variações de temperatura de uma amostra em campo magnético variável. Para isso, utilizou-se um atuador linear, um motor elétrico de passo, uma amostra de Gd, uma câmera IV e uma fonte de campo magnético (ímã de Nd-Fe-B e um Halbach). Este setup foi utilizado para medir diretamente o efeito magnetocalórico e o efeito de *heating by sweeping*.

Demonstraram-se que as variações de temperatura do setup do Halbach se deveram ao efeito magnetocalórico, obtendo-se variações de temperatura de 1.6 °C. A partir dos dados obtidos, foi feito um estudo sobre a relaxação térmica da amostra de Gd depois da subida de temperatura, confirmando-se a ocorrência de dois processos de relaxação: o fluxo de calor interno pela amostra e difusão de calor para o exterior. Para isso, realizaram-se simulações numéricas com o software COMSOL, e comparou-se os tempos característicos dos respectivos ajustes exponenciais de  $T(t)$  entre a experiência e a simulação para os dois processos. Os 2 tempos de relaxação obtidos experimentalmente estão bastante próximos dos valores retirados pelas simulações numéricas. Não foi possível concluir que as variações de temperatura medidas no setup do ímã de Nd-Fe-B se deveram ao efeito magnetocalórico devido a diversos fatores, entre eles outros efeitos radiativos ou ao facto de o ímã não proporcionar uma variação de campo magnético suficiente.

Por fim, no processo de *heating by sweeping* não foi possível obter uma variação de temperatura superior à variação de temperatura adiabática, para uma variação de campo de 1 T. Como tal, não foi possível estudar o comportamento do gradiente de temperatura para diferentes tipos de movimento. Isto deve-se ao perfil magnético largo do Halbach e ao comprimento da amostra. Apesar disso, foi possível correlacionar a dependência da variação de temperatura com o tempo de repouso, tendo-se observado que esta aumenta com a diminuição do intervalo de tempo. Para poder medir o efeito este trabalho propõe adquirir uma amostra de Gd mais longa, de modo a garantir que, pelo menos, metade dela esteja sob influência de um campo magnético máximo e a outra metade sob influência de um campo magnético muito perto de zero. Outra alternativa é a utilização de um Halbach com um perfil magnético mais estreito.

## 8. Referências

---

- [1] N. K. Singh, K. G. Suresh, A. K. Nigam, S. K. Malik, A. A. Coelho e S. Gama, “Correlation between magnetism and magnetocaloric effect in RCo<sub>2</sub>-based Laves phase compounds,” *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, vol. 317, nº 1-2, pp. 68-79, 2006.
- [2] E. Warburg, *Ann. Phys.* 13, p. 141, 1881.
- [3] P. Debye, *Ann. Phys.*, vol. 81, p. 1154, 1926.

- [4] W. F. Giaouque, *J. Amer. Chem. Soc.*, vol. 49, p. 1864, 1917.
- [5] A. M. Tishin e Y. I. Spichkin, *The Magnetocaloric Effect and its Applications*, Moscow, Russia: IOP Publishing Ltd, 2003.
- [6] K. A. J. Gschneidner e V. Pecharsky, "Thirty years of near room temperature magnetic cooling:," *International Journal of Refrigeration*, vol. 31, pp. 945-961, 2008.
- [7] G. V. Brown, "Magnetic heat pumping near room temperature," *Journal of Applied Physics*, vol. 47, pp. 3673-3680, 1976.
- [8] W. A. Steyert, "Stirling-cycle rotating magnetic refrigerators," *Journal of Applied Physics*, vol. 49, pp. 1216-1226, 1978.
- [9] A. Kitanovski, J. Tušek, U. Tomc, U. Plaznik, M. Ožbolt e A. Poredoš, *Magnetocaloric Energy Conversion: From Theory to Applications*, Springer, 2014.
- [10] V. G. K. Pecharsky, "Advanced magnetocaloric," *Int. J. Refrigeration*, vol. 29, pp. 1239-1249, 2006.
- [11] K. K. Nielsen, J. Tusek, K. Engelbrecht, S. Schopfer, A. Kitanovski, C. R. H. Bahl, A. Smith, N. Pryds e A. Poredos, "Review on numerical modeling of active magnetic regenerators for room temperature applications," *Internation Journal of Refrigeration*, vol. 34, pp. 603-616, 2011.
- [12] P. Weiss e R. Forrer, "Aimantation et phénomène magnéto-calorique du nickel," *Ann. Phys.*, vol. 10, n° 5, pp. 153-213, 1926.
- [13] A. E. Clark e E. Callen, "Cooling by adiabatic magnetization," *Phys. Rev. Lett.*, vol. 23, n° 6, p. 307, 1969.
- [14] G. Green, W. Patton e J. Stevens, "The Magnetocaloric Effect of Some Rare Earth Metals," *Adv. Cryog. Eng.*, vol. 33, pp. 777-784, 1988.
- [15] A. Aliev, *Direct magnetocaloric effect measurement technique in alternating magnetic fields*, Amirkhanov Institute of Physics of Daghestan Scientific Center, RAS, Makhachkala 367003, Russia.
- [16] B. R. Gopal, R. Chahine e T. K. Bose, "Noncontact thermoacoustic method to measure the magnetocaloric effect," *Review of Scientific Instruments*, vol. 66, p. 232, 1995.
- [17] A. Aliev, "Direct magnetocaloric effect measurement technique in alternating magnetic fields," Amirkhanov Institute of Physics of Daghestan Scientific Center, RAS, Makhachkala 367003, Russia, 2014.
- [18] P. V. Trevizoli, J. R. Barbosa Jr., P. A. Oliveira, A. T. Prata e R. T. S. Ferreira, "Direct Measurements Of The Magnetocaloric Effect Of Gadolinium Samples At Near Room Temperature," em *20th International Congress of Mechanical Engineering*, Gramado, RS, Brazil, 2009.
- [19] K. H. Kang, J. H. Kim, J. W. Kim, K. C. Chung e C. S. Yoon, "Direct measurement of the magnetocaloric effect ( $\Delta T_{ad}$ ) of  $Mn_{5-x}(Fe,Co)_xGe_3$ ," *Journal of Alloys and Compounds*, vol. 729, pp. 603-606, 2017.
- [20] D. Silva, B. Bordalo, A. Pereira, J. Ventura e J. Araújo, "Solid state magnetic refrigerator," *Applied*

- Energy*, vol. 93, pp. 570-574, 2012.
- [21] D. Silva, J. Ventura, J. Araújo e A. Pereira, “Maximizing the temperature span of a solid state active magnetic regenerative refrigerator,” *Applied Energy*, vol. 113, pp. 1149-1154, 2014.
- [22] F. Casanova i Fernández, “Magnetocaloric Effect In  $Gd_5(Si_xGe_{1-x})_4$  Alloys,” University of Barcelona, 2004.
- [23] V. K. Pecharsky e K. A. J. Gschneidner, *Adv. Cryog. Engg.*, vol. 42, n° 423, 1996.
- [24] A. Kitanovski, J. Tušek, U. Tomc, U. Plaznik, M. Ožbolt e A. Poredoš, “Magnetocaloric Materials for Freezing, Cooling, and Heat-Pump Applications,” *Magnetocaloric Energy Conversion*, Springer International Publishing, 2015.
- [25] V. Pecharsky e K. A. J. Gschneidner, “Giant magnetocaloric effect in  $Gd_5(Si_2 Ge_2)$ ,” *Phys Rev. Lett.*, vol. 78, pp. 4494-4497, 1997.
- [26] V. Pecharsky e K. A. J. Gschneidner, “Magnetocaloric effect and magnetic refrigeration,” *J. Magn. Mater.*, vol. 200, pp. 44-56, 1999.
- [27] “Linear Actuator Guide,” Anaheim Automation, Inc, 2018. [Online]. Available: <http://www.anaheimautomation.com/manuals/forms/linear-actuator-guide.php#sthash.eGUl2sLj.ZHL9d4jH.dpbs>. [Acedido em 15 05 2018].
- [28] D. Nedelkovski, “How a Stepper Motor Works,” How To Mechatronics, 2018. [Online]. Available: <https://howtomechatronics.com/how-it-works/electrical-engineering/stepper-motor/>. [Acedido em 21 05 2018].
- [29] C. Woodfors, “Stepper motors,” Explainthatstuff, 10 01 2018. [Online]. Available: <http://www.explainthatstuff.com/how-stepper-motors-work.html>. [Acedido em 21 05 2018].
- [30] B. Khairullah, “How does a Stepper Motor work ?,” Learn Engineering, 19 10 2016. [Online]. Available: <https://youtu.be/eyqwLiowZiU>. [Acedido em 21 05 2018].
- [31] D. Collins, “What is microstepping?,” Linear Motions Tips, 11 2017. [Online]. Available: <https://www.linearmotiontips.com/microstepping-basics/>. [Acedido em 21 05 2018].
- [32] K. Halbach, “Permanent Magnets for Production,” *8th International Workshop on Rare Earth Magnets and their Applications*, vol. 11, n° 2, 1985.
- [33] M. R. Patrik Jonsson, “Infrared Thermometry in Winter Road Maintenance,” *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, vol. 29, n° 846, 2012.
- [34] “How infrared cameras work,” Fluke, 2018. [Online]. Available: <http://en-us.fluke.com/training/training-library/measurements/how-infrared-cameras-work.html>. [Acedido em 28 05 2018].
- [35] E. Palacios, G. Wang, R. Burriel, V. Provenzano e R. Shull, “Direct Measurement of the Magnetocaloric Effect in  $Gd_5Si_2Ge_{1-9}Ga_{0.1}$ ,” em *Journal of Physics: Conference Series 200*, 2009.
- [36] M. Ghahremani, H. M. Seyoum, H. ElBidweihy, E. D. Torre e L. H. Bennet, “Adiabatic magnetocaloric

- temperature change in polycrystalline gadolinium – A new approach highlighting reversibility,” *American Institute of Physics*, vol. 2, n° 3, 2012.
- [37] V. K. Pecharsky e K. A. J. Gschneidner, *J. Appl. Phys*, vol. 85, n° 565, 1999.
- [38] V. K. Pecharsky e K. A. J. Gschneidner, “Advanced Materials for Magnetic Cooling,” *Material Matters*, vol. 2.4, n° 4, 2007.
- [39] “C-Beam Linear Actuator Bundle 1000mm Length,” SMW3D, 2018. [Online]. Available: <https://www.smw3d.com/c-beam-linear-actuator-bundle-1000mm-length/>. [Acedido em 15 05 2018].
- [40] D. Nedelkovski, “How a Stepper Motor Works,” How To Mechatronics, 2018. [Online]. Available: <https://howtomechatronics.com/how-it-works/electrical-engineering/stepper-motor/>. [Acedido em 21 05 2018].
- [41] K. Magnetics, “Halbach Arrays,” K&J Magnetics, [Online]. Available: <https://www.kjmagnetics.com/blog.asp?p=halbach-arrays>. [Acedido em 27 05 2018].
- [42] W. R. Barron, “Principles of Infrared Thermometry,” Omega.
- [43] A. Salazar, “On thermal diffusivity,” *European Journal of Physics*, vol. 24, pp. 351-358, 2003.
- [44] “Advantages of Contact Thermometers over Non-Contact/Infrared Thermometers,” TEGAM, 14 11 2015. [Online]. Available: <https://www.tegam.com/advantages-of-contact-thermometers-over-non-contactinfrared-thermometers/>. [Acedido em 28 09 2018].
- [45] A. P. Kamantsev, V. V. Koledov, A. V. Mashirov, E. T. Dilmieva, V. G. Shavrov e J. Cwik, “Magnetocaloric Effect of Gadolinium at Adiabatic and Quasi-Isothermal Conditions in High Magnetic Fields,” *Solid State Phenomena*, Vols. 1 de 2233-234, pp. 216-219, 2015.
- [46] R. B. Guenther e J. W. Lee, “5. Parabolic Partial Differential Equations in One Space Dimension,” em *Partial Differential Equations of Mathematical Physics and Integral Equations*, Dover Publications, 1996, pp. 144-192.
- [47] T. Myint-U e L. Debnath, “7. Method of Separation of Variables,” em *Linear Partial Differential Equations Differential Equations*, Boston, Birkhäuser; 4th edition, 2006, pp. 231-273.
- [48] M. J. Hancock, “18.303 Linear Partial Differential Equations: The 1-D Heat Equation,” MIT, Massachusetts, Fall 2006.
- [49] S. Y. Dan'kov, A. Tishin, V. K. Pecharsky e K. A. Gschneidner, “Magnetic phase transitions and the magnetothermal properties of gadolinium,” *Physical Review B*, vol. 57, n° 6, pp. 3478-3490, 1998.