

# Caracterização de semicondutores e estudo do efeito Hall<sup>†</sup>

Laboratórios de Física 3 / DFA@FCUP

## Índice

|   |  |    |
|---|--|----|
| 1 | <b>Objetivo</b> .....  | 2  |
| 2 | <b>Introdução</b> .....  | 2  |
|   | 2.1 Condutores, isoladores e semicondutores .....  | 2  |
|   | 2.2 Efeito Hall .....  | 3  |
|   | 2.3 Efeito Hall em Metais, Semicondutores Intrínsecos e Extrínsecos .....                      | 4  |
| 3 | <b>Preparação</b> .....  | 6  |
| 4 | <b>Trabalho Laboratorial</b> .....   | 6  |
|   | 4.1 Montagem .....   | 6  |
|   | 4.2 Amostras .....   | 7  |
|   | 4.3 Produção de campo magnético e sua medição .....  | 7  |
|   | 4.4 Material e equipamento a utilizar: .....   | 8  |
|   | 4.5 Procedimento Experimental .....  | 8  |
|   | 4.5.1 Calibração do campo magnético .....  | 8  |
|   | 4.5.2 Amostra com campo magnético fixo; variação da corrente .....                             | 9  |
|   | 4.5.3 Amostra com corrente fixa; variação da tensão de Hall em função do campo magnético ..... | 10 |
|   | 4.5.4 Variação da tensão de Hall e da tensão na amostra em função da temperatura .....         | 10 |
| 5 | <b>Questões</b> .....  | 12 |

---

<sup>†</sup> **Edwin Herbert Hall** (1855 – 1938) foi um físico americano da Universidade de Harvard, que descobriu o efeito com o seu nome em 1879. Hall fez investigação em termoeletricidade e também escreveu vários livros de física.

## 1 Objetivo

Neste trabalho é estudada experimentalmente a dependência da tensão de Hall em semicondutores para:

- diferentes intensidades do campo magnético externo,
- quando percorrido por diferentes valores de corrente elétrica,
- face a variações da temperatura.

No âmbito do trabalho são importantes:

- medidas de valores de tensão baixos,
- a compensação de desequilíbrios posicionais dos contactos na amostra;
- a correta execução experimental de controlo e medidas com variação de temperatura.

## 2 Introdução

### 2.1 Condutores, isoladores e semicondutores

Os materiais podem ser classificados de acordo com as suas propriedades elétricas e ser divididos em 3 grandes classes: isoladores, semicondutores e condutores. Fisicamente, o que os distingue é o tipo de estrutura de bandas de energia (figura 1).

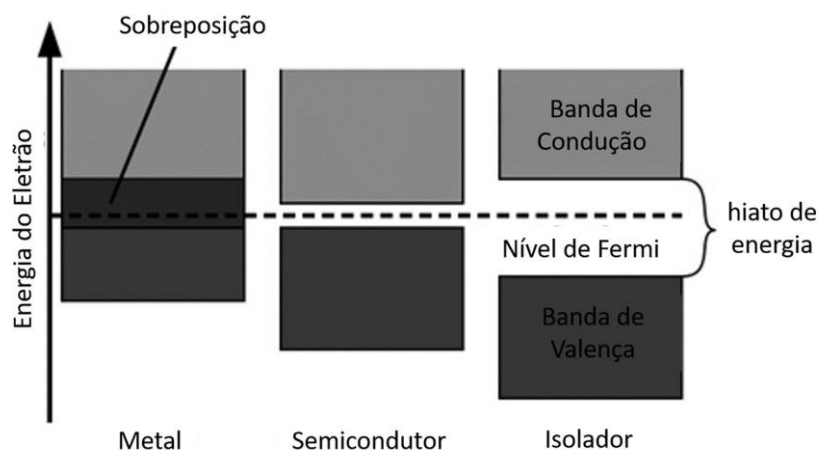


Figura 1: Bandas de energia de diferentes materiais.

É esta diferença entre as bandas de energia que promove comportamentos diferenciados nos materiais nomeadamente nas suas propriedades elétricas intrínsecas. Para estudar detalhadamente os materiais são necessárias diversas medidas experimentais nomeadamente modificando parâmetros externos como temperatura, corrente elétrica e campo magnético aplicado.

Note que os métodos de medida deste trabalho são similares a métodos utilizados em diversos tópicos modernos da Física da Matéria Condensada, nomeadamente nas áreas de supercondutores, isoladores topológicos, eletrônica de spin.

## 2.2 Efeito Hall

O efeito Hall foi descoberto em 1879 por Edwin H. Hall enquanto estudava o mecanismo de condução elétrica em metais. Hall verificou que quando um material é sujeito a um campo magnético  $\vec{B}$  percorrido por uma corrente  $\vec{I}$  cria, se o campo  $\vec{B}$  não for paralelo a  $\vec{I}$ , uma força  $\vec{F}$  sobre as cargas em movimento, que altera as suas trajetórias. Na figura 2 representa-se a configuração particular em que  $\vec{B} \perp \vec{I}$ .

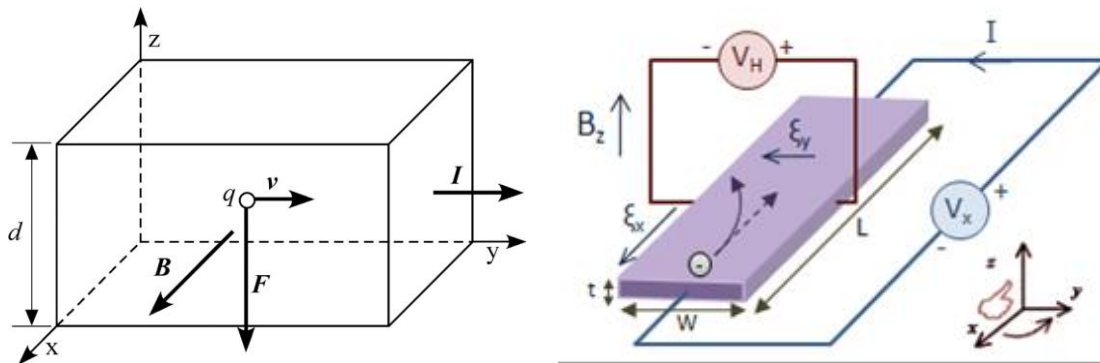


Figura 2: Carga elétrica  $q$  com velocidade  $v$  sujeita a uma força  $F$  devida à existência de um campo magnético  $B$  perpendicular a  $v$ .

Sendo  $q$  o valor da carga elétrica dos transportadores de carga e  $\langle \vec{v} \rangle$  a sua velocidade média, a força  $\vec{F}$  é dada por:

$$\vec{F}_B = q \langle \vec{v} \rangle \times \vec{B} \quad (1)$$

As cargas deslocam-se transversalmente sob o efeito desta força, propiciando uma assimetria na distribuição de carga ao longo dessa direção. Esta assimetria gerará um campo elétrico transversal  $\vec{E}_t$ , responsável por uma força elétrica adicional que cresce em intensidade até que compense a força  $\vec{F}_B$ , anulando a força resultante sobre as cargas, e deixando o sistema em equilíbrio.

Designando por  $\theta$  o ângulo entre os vetores  $\langle \vec{v} \rangle$  e  $\vec{B}$  tem-se:

$$qE_t = q \langle v \rangle B \sin\theta \quad (2)$$

A este campo elétrico transversal está associada uma diferença de potencial  $V_H$  entre as duas faces distanciadas de  $d$ , a qual é designada por tensão de Hall ( $U_H$ ):

$$U_H = dE_t = d \langle v \rangle B \sin\theta. \quad (3)$$

A densidade de corrente que atravessa o cristal é dada por

$$j = nq \langle v \rangle, \quad (4)$$

em que  $n$  é o número de transportadores de carga por unidade de volume. Atendendo a que  $I = j \cdot S$ , sendo  $S$  a área da secção reta do cristal, obtém-se a seguinte relação entre a velocidade média e a corrente:

$$\langle v \rangle = \frac{I}{nqS} \quad (5)$$

Substituindo este resultado na equação (3), obtém-se a seguinte expressão para a tensão de Hall:

$$U_H = \frac{d}{S} \frac{1}{nq} IB \sin \theta. \quad (6)$$

O factor  $(nq)^{-1}$  é designado por coeficiente de Hall ( $R_H$ ) do material, e de notar que depende da densidade e do tipo de portadores de carga, sendo assim uma constante que caracteriza o semiconductor. Um parâmetro importante na caracterização dos semicondutores é a noção de mobilidade elétrica ( $\mu$ ). Este parâmetro caracteriza a rapidez com um eletrão pode mover-se através de uma de metal ou de semiconductor quando sob ação de um campo elétrico. Assim a  $\mu$  é expressa por:

$$\mu = \frac{\langle v \rangle}{E} \quad (7)$$

## 2.3 Efeito Hall em Metais, Semicondutores Intrínsecos e Extrínsecos

O efeito Hall ocorre maioritariamente em materiais metálicos ou em semicondutores. No caso dos metais este efeito é dominado pelos eletrões presentes na banda de condução. Dado que os metais apresentam uma densidade de portadores elevada, é naturalmente esperado que apresentem um menor coeficiente de Hall de acordo com a eq. 6. No entanto, no caso de um semiconductor devido a ter  $n$  menor, a tensão de Hall gerada pode ser considerável aumentando assim a relevância para aplicações tecnológicas.

Em semicondutores, o comportamento do efeito Hall é definido também pelo comportamento dos portadores de carga que pode ser de 2 tipos: por **eletrões** (ou portadores de carga negativa) e/ou **lacunas** (portadores de carga positiva). Quando se trata de um cristal puro, o número de eletrões  $n$  é igual ao número de lacunas  $p$  uma vez que para cada eletrão que é excitado da banda de valência para a banda de condução cria naturalmente uma lacuna na banda de valência. Estes materiais definem-se como semicondutores intrínsecos, sendo os exemplos mais comuns o Silício, Germânio ou Diamante.

No entanto, na maioria de casos práticos em componentes tecnológicos, existe a necessidade de dopar em pequenas percentagens os semicondutores intrínsecos com átomos para melhorar a condutividade elétrica dos materiais. Estes semicondutores são os denominados semicondutores extrínsecos e podem ser de 2 tipos:

- **tipo-n:** Materiais dopados com elementos químicos (e.g. fósforo, arsénio) capazes de doar eletrões à banda de condução.

- **tipo-p:** Materiais dopados com elementos químicos (e.g. boro, gálio) capazes de aceitar elétrons na banda de valência, criando maioritariamente lacunas.

Assim, a expressão do coeficiente de Hall para semicondutores é mais complexa que a apresentada na eq. 6, pois com a dopagem os 2 tipos de portadores de carga possuem um papel preponderante dado que apresentam densidades e mobilidades diferentes. Neste caso o  $R_H$  passa a ser expresso por:

$$R_H = \frac{-n\mu_e^2 + -p\mu_p^2}{e(-n\mu_e + -p\mu_p)} \quad (8)$$

sendo  $n$  e  $p$  as densidades e  $\mu_e$  e  $\mu_p$  as mobilidades para os elétrons e lacunas, respetivamente.

O trabalho consistirá na verificação da dependência da tensão de Hall  $V_H$  com  $I$  e  $B$ . Atendendo à equação 6, é possível rapidamente depreender que a medida da tensão de Hall e do factor de Hall permite identificar o tipo de portadores interveniente no processo de condução elétrica (lacunas ou elétrons) e rotular de semicondutor do tipo-p ou tipo-n. Para facilitar este estudo, usa-se uma amostra de material semicondutor (Ge) dopado com elevado coeficiente de Hall.

## Referências

1. M. Alonso, E. J. Finn, “Fundamental University Physics”, Vol.2, Addison-Wesley, 1980.
2. C. Kittel, “Introduction to Solid State Physics” 8th edition, John. Wiley and Sons, 2008.

## Vídeos interessantes – fenómeno e aplicações:

- Hall Effect  
[https://www.youtube.com/watch?v=iPU\\_pzrg4UE&ab\\_channel=EdorealEngineering](https://www.youtube.com/watch?v=iPU_pzrg4UE&ab_channel=EdorealEngineering)
- What is Hall Effect and How Hall Effect Sensors Work  
[https://www.youtube.com/watch?v=wpAA3qeOYil&ab\\_channel=HowToMechatronics](https://www.youtube.com/watch?v=wpAA3qeOYil&ab_channel=HowToMechatronics)

### 3 Preparação

1. Interpretar como é gerado o campo magnético na experiência (bobines + núcleo de ferro em U) e suas características em magnitude e direcção no entreferro, e o espaço onde irá posicionar a amostra. Qual a grande vantagem do uso deste tipo de campos magnéticos?
2. Noção de calibração  $B(I)$  e qual a relação esperada entre a intensidade de corrente e a intensidade de campo magnético gerada.
3. Procure (referenciando!) coeficientes de Hall para os materiais silício, germânio, cobre e zinco e estime a ordem de grandeza esperada para a tensão de Hall, por cada 1 T de campo magnético, utilizando as condições indicadas no protocolo.
4. Atendendo à montagem de Hall que irá utilizar (figura 3), definir o procedimento a adoptar para determinar experimentalmente o tipo do semiconductor (tipo-p ou tipo-n).
5. No esquema do circuito electrónico experimental existe um potenciómetro para compensar a tensão de Hall originada pelo pequeno desalinhamento dos contactos que é ajustada a zero na ausência de campo magnético. Se este procedimento não for realizado, de que forma podem as medidas ser comprometidas?
6. É muito importante que tenha noção da dinâmica temporal de processos que envolvem controlo de temperatura. A condução e dissipação térmica são processos com características temporais distintas! Em particular, a dissipação de calor nos materiais é um processo lento, fortemente dependente das características dos materiais e das suas dimensões.
  - a) No caso de medidas com variação de temperatura, a temperatura da amostra deverá variar lenta ou rapidamente? que considerações devem ser tidas em conta para definir o ponto de medida de temperatura face à distribuição do campo de temperaturas na amostra? como garantir condições óptimas de medida? o meio envolvente deve ser um rápido ou lento dissipador de calor (qual o impacto na medida)? Em suma:

Que cuidados irá adoptar na execução experimental do estudo de variações com a temperatura para que:

    - i. impeça danos nas amostras por exposição a calor excessivo
    - ii. garantir a fiabilidade das medidas «térmicas».

### 4 Trabalho Laboratorial

#### 4.1 Montagem

Na montagem da figura 3 o símbolo representado no centro da amostra representa a sonda de

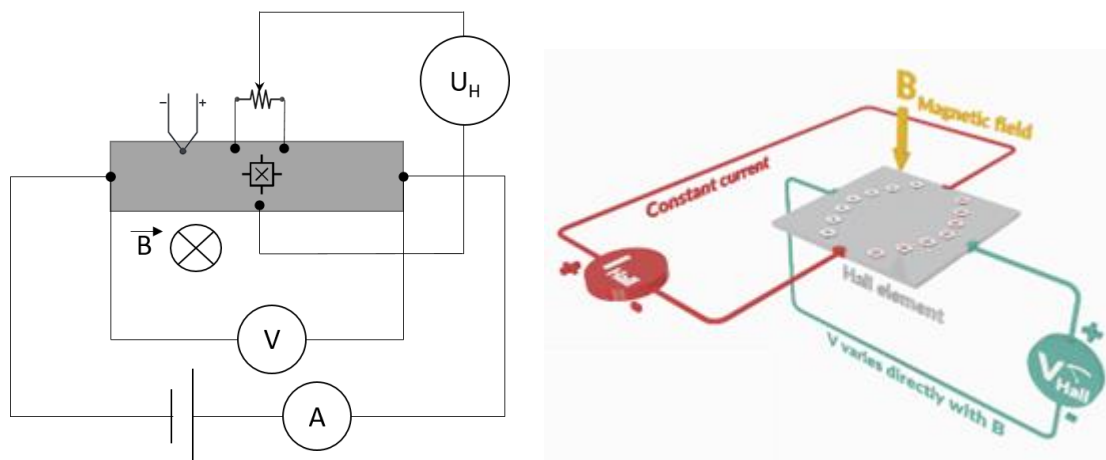


Figura 3: Esquema do circuito elétrico da montagem de medida do efeito Hall (Circuito da Phywe à esquerda e imagem elucidativa à direita).

Hall que permitirá medir o campo magnético. Também se identifica o símbolo do termopar que irá medir a temperatura.

## 4.2 Amostras

A placa-amostra e suas ligações são muito frágeis e devem ser manuseados com todo o cuidado! Note que o espaço de colocação das amostras (entreferro) é muito curto, pelo que deve ter todas as precauções para não danificar e/ou raspar a amostra e contactos durante o seu posicionamento.

A placa-amostra é inserida no suporte da Phywe com amostra virada para o executante. O aquecimento da amostra está integrado na placa através de um circuito resistivo (visível na face traseira), assim como a medição da temperatura.

## 4.3 Produção de campo magnético e sua medição.

Nesta experiência o campo é gerado de forma controlada por um conjunto de bobines, um núcleo de ferro em U (com o espaço para colocação das amostras) e uma fonte de corrente. Tendo em conta a fragilidade das amostras e o espaço reduzido de entreferro, podemos evitar a utilização em permanência da sonda magnética para o campo  $B$  da amostra, através da «calibração do campo magnético». A calibração do campo magnético determina a relação entre o campo magnético  $B$  na zona de colocação da amostra em função da corrente que percorre as bobines geradoras de campo. Assim, todas as atividades da experiência são feitas controlando apenas a corrente que alimenta as bobines, e a análise feita recorrendo à curva de calibração do campo magnético obtida.

#### 4.4 Material e equipamento a utilizar:

- Eletromagnete (0-1A) e respetiva fonte de alimentação da Phywe.
- Placa de amostra (semicondutores p-Ge ou n-Ge) com dimensões aproximadas de 2cm x 1cm x 2.12mm.
- Sonda de Hall e Teslameter (Phywe).
- kit Phywe de efeito Hall.
- Multímetros para medição de corrente elétrica nas bobinas; queda de tensão na amostra e a tensão de Hall.

A corrente elétrica e a temperatura da amostra são medidas e indicadas no próprio suporte da placa de amostras.

#### 4.5 Procedimento Experimental

##### 4.5.1 Calibração do campo magnético

1. Eletromagnete: verificar se o núcleo de ferro e as bobinas estão devidamente montados, de forma a criar um circuito magnético fechado, ao longo do núcleo ferromagnético e entreferro.
2. Desenhar o circuito elétrico necessário para a alimentação de corrente às bobinas, que deverão estar em série. Utilizar a fonte de tensão/corrente DC (Phywe) disponível na bancada. Incluir adequadamente um multímetro para controlar a corrente das bobinas.
3. Utilizar a sonda Hall e o Teslameter da Phywe para determinar a intensidade do campo magnético.
4. Após retirar cuidadosamente a tampa protetora, introduzir a sonda de Hall no centro do entreferro das bobinas e confirmar que a corrente que passa pelas bobinas é nula. Pode-se utilizar o suporte da amostra semiconductor (sem amostra!) para fixar a sonda de Hall. Registrar o valor que é indicado no voltímetro de forma a determinar o valor do campo remanescente.
5. Variar a corrente entre 0–1.5 A por passos registando os valores de campo magnético obtidos no Teslameter.
6. Efetuar um ajuste da curva de forma a ter uma expressão matemática de calibração do campo magnético.



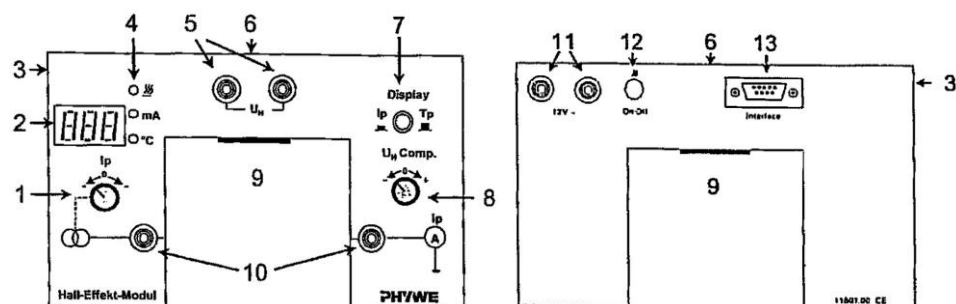


Figura 4: Esquema do sistema da Phywe

#### Manuseamento do kit Phywe

1. Ajuste da corrente na amostra  $I_P$ ;
2. 'Display' com indicação da corrente na amostra ou da sua temperatura;
3. Furo roscado para barra de suporte;
4. LEDs que indicam o modo selecionado para o 'display' e o aquecimento da amostra;
5. Par de conetores para medição da tensão de Hall  $U_H$ ;
6. Furo para inserção da sonda magnética tangencial;
7. Comutador para seleção da indicação do 'display';
8. Botão para compensação do zero da tensão de Hall (Reóstato);
9. Conetor para fixação da placa com a amostra;
10. Par de conetores para medição da queda de tensão na amostra;
11. Par de conetores para ligação da fonte de alimentação (12 V AC);
12. Comutador para ligação do aquecimento;
13. Conetor da interface RS232 para ligação à interface Cobra3 (não usado).

#### 4.5.2 Amostra com campo magnético fixo; variação da corrente

1. Escolher uma das placas disponíveis da Phywe e colocar com cuidado no suporte dedicado, deslizando-a cuidadosamente para cima na parte inferior do suporte até que os contactos elétricos fiquem bem fixados na placa.
2. Posicionar o suporte metálico com a montagem tal que a amostra (soldada na placa) fique entre os polos do eletromagnete.
3. Verificar as seguintes ligações: voltímetro de grande sensibilidade para medir a tensão de Hall ( $U_H$  no suporte); voltímetro para medir a tensão na amostra ( $U_P$  no suporte); amperímetro para medir a corrente nas bobinas; alimentação do circuito para colocação da amostra dedicado Phywe (na traseira do suporte).
4. Ligar os aparelhos e verificar que a tensão de Hall é nula sem campo magnético aplicado.

Se existir uma tensão não nula, ajustar a corrente até zero no botão “ $U_H$  comp” no circuito do suporte da placa. Este teste deverá ser realizado com corrente elétrica a passar pela amostra, utilizando entre 15 e 20mA. Verificar que o ‘display’ está no  $I_P$  (o ‘display’ tem um comutador entre a corrente na amostra,  $I_P$ , e a temperatura da amostra,  $T_P$ ).

5. Após este ajuste da “condição zero”, colocar todos os valores em zero para iniciar a experiência.
6. Fazer passar uma corrente de cerca 1A nas bobinas.
7. Variar a corrente na amostra ( $I_P$ ) entre -20 mA e 20 mA e ler os valores correspondentes da tensão de Hall ( $U_H$ ). Medir também a tensão na amostra ( $V_P$ ) durante a experiência.

→ A análise desta parte do trabalho consiste em fazer o gráfico de  $U_H$  vs.  $I_P$ , a partir do qual é possível determinar o tipo e a concentração dos portadores de carga na amostra.

#### 4.5.3 Amostra com corrente fixa; variação da tensão de Hall em função do campo magnético

1. Sem mudar a montagem experimental, verificar a “condição zero” da experiência ( $U_H = 0$ ;  $B = 0$ ;  $I_P = 0$ ).
2. Ajustar a corrente na amostra para  $I_P = 15 - 20$ mA.
3. Variar a corrente nas bobinas ( $I_B$ ) entre 0 e 1,8 A e registrar os valores da tensão de Hall ( $U_H$ ) e a tensão na amostra ( $U_P$ ).

→ Novamente a análise dos resultados é feita graficamente, onde se deve verificar um comportamento linear entre a tensão de Hall,  $U_H$ , e o campo magnético,  $B$ , e avaliar a natureza e concentração dos portadores de carga na amostra.

#### 4.5.4 Variação da tensão de Hall e da tensão na amostra em função da temperatura

Esta parte do trabalho só pode ser realizada após discussão com o docente do método a adoptar para as medidas, face à reflexão e respostas às questões da Preparação do Trabalho! Antes de começar o estudo experimental, realize um ensaio rápido para ganhar sensibilidade à capacidade de aquecimento e arrefecimento da montagem disponível. (note que as conclusões que irá tirar são dependentes da temperatura inicial!).

1. Ligar o botão para visualizar a temperatura  $T_P$  da amostra no *display*.
2. Aumentar a temperatura APENAS durante 2 s  $\Delta t$ , ligando por apenas durante 2 o botão localizado na parte traseira do suporte da placa de amostras.

3. Registrar quanto aumenta a temperatura e qual o tempo requerido para ter uma medida tão estável quanto possível da temperatura da amostra.

Face ao que se observou, definir o *timing* e procedimento das medidas no estudo de  $U_H(T_P)$  e  $U_P(T_P)$  a realizar de seguida.

1. Ajustar a condição «zero» da experiência, se necessário.
2. Fazer passar uma corrente  $I_P$  de cerca 15-20mA na amostra e uma corrente  $I_B$  de cerca 1A nas bobinas.
3. Registrar as curvas para a tensão de Hall  $U_H(T_P)$  e para a tensão na amostra  $U_P(T_P)$  entre temperatura ambiente e cerca 120°C, realizando o aquecimento em passos, tal como determinado anteriormente.

## 5 Questões

1. Indique o que entende por campo remanente. Qual a sua natureza?
2. Qual pode ser a razão para que a tensão de Hall mude de sinal com o aumento da temperatura?
3. Determine o coeficiente de Hall, a concentração de portadores de carga, a mobilidade e o hiato de energia da amostra medida.
4. Compare os valores obtidos e recorrendo a tabelas existentes, estime os valores esperados para metais. Compare os resultados e seja crítico/comente quais as principais consequências e o que implicaria a nível experimental.
5. A partir da variação da condutividade intrínseca da amostra é possível avaliar a energia de ativação de amostras semicondutoras. Interprete a forma da variação da condutividade elétrica em função da temperatura da amostra semicondutora, sabendo que a variação térmica da condutividade num semicondutor intrínseco (puro) pode ser descrita na forma:

$$\sigma(T) = \sigma_0 e^{-E_g/2k_B T},$$

em que  $E_g$  é a energia de ativação do semicondutor. É de notar que a parte intrínseca corresponde às temperaturas mais altas na sequência de medições. Dado que a condutividade é proporcional a  $1/V_p$ , pode-se facilmente obter a relação gráfica necessária.

6. Discutir qual o efeito térmico na energia de ativação.