

TI - CARACTERIZAÇÃO DE SEMICONDUTORES E ESTUDO DO EFETO HALL

9/10/2023

Maria Helene Nunes da Silveira, PL1, Grupo 2

9/10/2023

OBJETIVOS

- Estudar a dependência de tensão de Hall em semicondutores para:
 - diferentes intensidades do campo magnético externo
 - diferentes valores de corrente
 - variações de temperatura

INTRODUÇÃO TEÓRICA

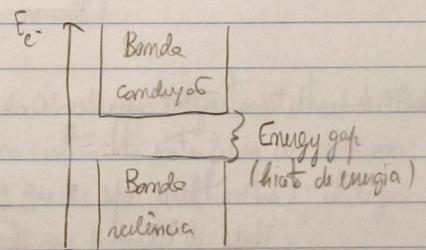
Semicondutores

tipo - n → deslocam eletrôns à

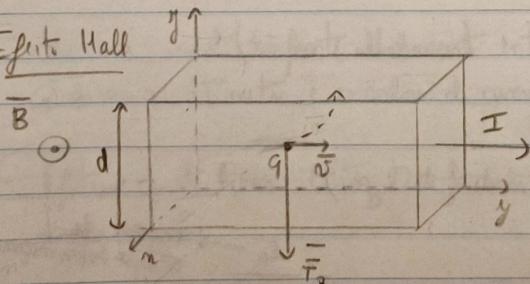
borda de condução

tipo - p → atraem eletrôns no

borda de valência



Efeito Hall



Material sujeito a \vec{B} paralelo a I

Se \vec{B} não paralelo a I (nesta caso $\vec{B} \perp I$)

$$\vec{F}_B \text{ que altera as trajetórias das cargas}$$
$$\vec{F}_B = q \langle \vec{v} \rangle \times \vec{B}$$

Cargas deslocam - n transversalmente \Rightarrow que - n campo transversal $\vec{E}_t \Rightarrow$ gera \vec{F}_E que
cruza em intensidade ate compensar $\vec{F}_B \Rightarrow$ muita - n força resultante sobre os cargas \Rightarrow
 \Rightarrow manteve um equilíbrio

$$qE_t = q \langle \vec{v} \rangle B \sin \theta$$

\hookrightarrow ângulo entre $\langle \vec{v} \rangle$ e \vec{B}

$$\text{Termo de Hall} \rightarrow V_H = d \frac{E}{t} = d < n > B \sin \theta$$

grelha pés

campo transversal E_t

$$|| \quad \vec{B} + \vec{I} \Rightarrow \theta = 90^\circ \Rightarrow \sin \theta = 1$$

$$\boxed{V_H = \frac{1}{m_q} \frac{d}{S} B I_p} \quad (1)$$

constante de amostra

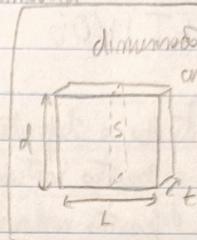
m = nº de transportadores de carga

1/n unidade de volume

(unidades: m^{-3})

meio m³ de amostra

dimensões da amostra



$$q = 1,602 \times 10^{-19} \text{ C}$$

$$\text{Coeficiente de Hall} \rightarrow \boxed{R_H = \frac{1}{m_q}} \quad (2) \quad (\text{unidades: } \text{m}^3/\text{C})$$

$$\text{Condutividade elétrica} \rightarrow \boxed{\sigma_0 = \frac{L \cdot I_p}{t \times d \cdot V_p}} \quad (3) \quad (\text{unidades: } \Omega^{-1} \text{m}^{-1})$$

volume de amostra

Mobilidade elétrica \rightarrow rapidez com que um e^- se move sob ação de um campo elétrico

$$\mu = \frac{<n>}{E}$$

$$\boxed{\mu = \sigma_0 R_H} \quad (4) \quad (\text{unidades: } \text{m}^{-3})$$

$$\text{Resistividade elétrica} \rightarrow \boxed{\frac{1}{\sigma_0}} \quad (5) \quad (\text{unidades: } \Omega \text{ m})$$

$\frac{E_g}{2K_B T} \rightarrow$ energia de ativação da resistividade

$$\text{Condutividade elétrica em função de temperatura} \rightarrow \sigma(T) = \sigma_0 e^{-\frac{E_g}{2K_B T}}$$

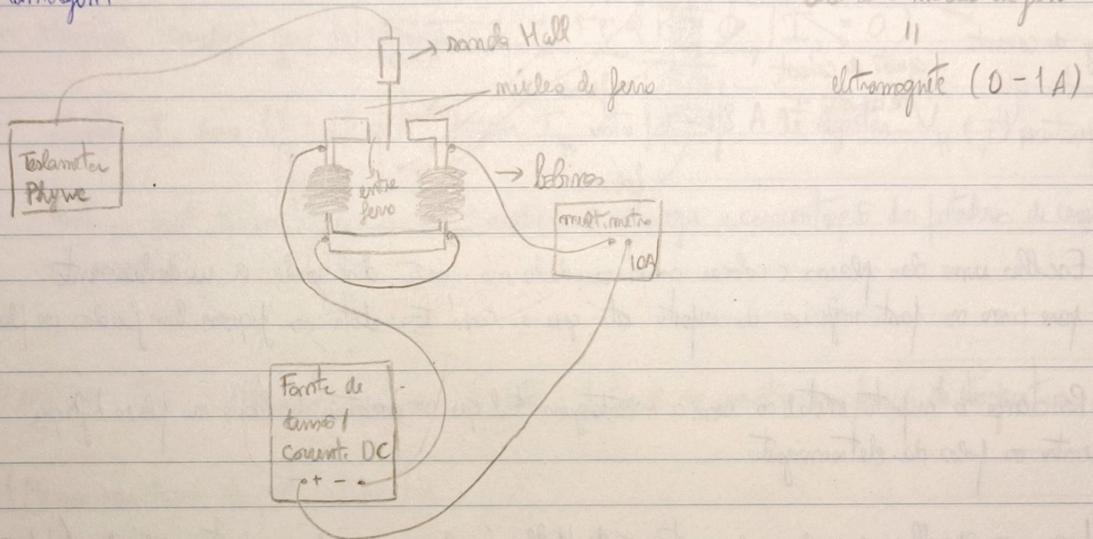
Condutividade intrínseca de amostra \rightarrow temperaturas mais altas

$$\sigma \propto \frac{1}{V_p} \Rightarrow \boxed{\ln(V_p) \cdot \ln(V_0) + \frac{E_g}{2K_B} \frac{1}{T}} \quad (6)$$

PROCEDIMENTO

PARTE A - Calibragem de campo magnético

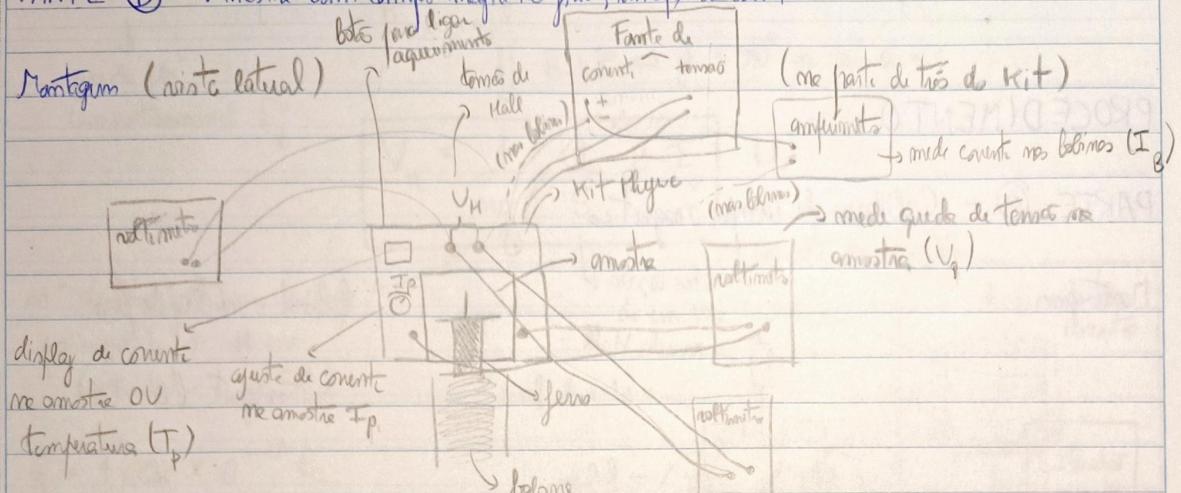
Montagem



- Verificar se núcleo de ferro e bobinas estão corretamente montados
- Utilizar roda e Teslametro para determinar intensidade do campo magnético: notar cuidadosamente a tempestade estática da roda e introduzi-la no centro do enrugado das bobinas; confirmar que o corrente que passa pelas bobinas é nula (medir com multímetro); utilizar o impacto da amostra semicondutora (numa amostra!) para fixar a roda de Hall
- Varia a corrente na fonte de corrente entre 0 - 1,5 A por passos, registrando a corrente lida no multímetro e os valores de campo magnético obtidos no Teslametro
- Efectuar ajuste linear $B(I_B)$ de forma a obter uma expressão matemática de calibragem do campo magnético

PARTE (B) - Amóstre com campo magnético fixo, variação de corrente

Montagem (não é lateral)



- Escolher uma das placas e colocar com cuidado no suporte, deslizando-a cuidadosamente para cima na parte inferior do suporte até que os contactos elétricos fiquem bem fixados na placa.
- Posicionar o suporte metálico com a montagem tal que a amóstre (rodada na placa) fique entre os pôlos do electromagneto.
- Ligar os aparelhos e verificar que a tensão de Hall é nula num campo magnético aplicado ($V_H = 0$). Se existir uma tensão não nula, ajustar corrente até que a tensão V_H comporte (não responda), usar corrente na fonte entre 15 a 20 mA; verifica que o display está em I_p .
- Após este ajuste, colocar todos os aparelhos em gelo.
- Colocar corrente de cerca 1 A nas bobinas; variar I_p entre -20 mA e 20 mA e ler valores correspondentes de V_H , medir também V_p .
- Construir gráfico V_H vs. I_p e determinar o tipo e a constante de proporcionalidade da corrente.

PARTE C) - Amostra com constante fixa; variação de tensão de Hall em função do campo magnético

(Mesma montagem de parte anterior)

- Verificar "condição geral" de experiência ($V_H = 0$; $B = 0$; $I_p = 0$)
- Ajustar I_p para 15 - 20 mA; varia I_B entre 0 - 18 A e registar V_H e V_p
- Realizar gráfico linear V_H vs B , e avaliar a natureza e concentração dos portadores de carga na amostra

PARTE D) - Variação de tensão de Hall e de tensão na amostra em função de temperatura

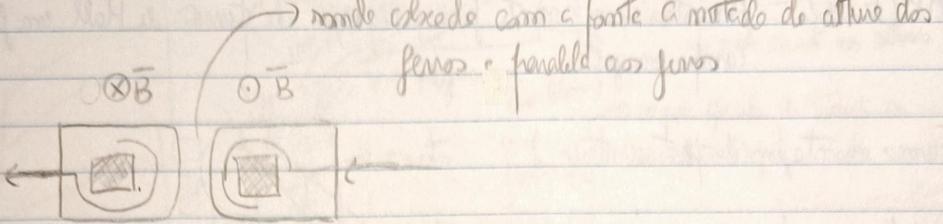
(Mesma montagem de parte anterior)

- Ligar bôtas e visualizar temperatura T_p no display
- Aumentar temperatura apressadamente 2s no bôto no frente da tábua de suportes
- Registrar quanto aumenta a temperatura e qual o tempo necessário para ter uma medição estabilizada (ponto fixo) de temperatura da amostra
- Definir timing e registrar dados $V_H(T_p)$ e $V_p(T_p)$ filmando: ajustar "condição geral" n' experiência; fazer $I_p = 15 - 20$ mA e $I = 1$ A; registrar dados entre temperatura ambiente e cerca de 120°C; quando atingir este temperatura desligar bôtas e filmar arrefecimento até temperatura inicial

NOTAS DE AULA - m_áximo amorte tipo - m

PARTE (A)

Vista superior



B negativo (bastar rodar os bobinas 180° para trocar sinal)

Realizamos 2 calibragens e escolhemos a melhor para considerar como calibragem final:

$$B = -0,2364 \frac{I}{S} - 0,0030$$

PARTE (B)

A corrente I_p apena atingiu $\sim 1,3\text{ A}$, logo aumentamos a tensão de fonte em $\sim 1\text{ V}$ (fazendo $\sim 8\text{ V}$)

$$R_H = (0,134 \pm 0,001) \text{ m}^3/\text{C}$$

$$m = (4,67 \pm 0,03) \times 10^{-19} \text{ m}^{-3}$$

PARTE (C)

I_p apena atingiu $\sim 1,5\text{ A}$

$$R_H = (0,114 \pm 0,006) \text{ m}^3/\text{C}$$

$$m = (5,47 \pm 0,3) \text{ m}^{-3}$$

PARTE (D)

T ambiente: $\sim 33^\circ\text{C}$

$$\mathcal{P} = \frac{9 \times 10^3}{2 \times 10^3} \text{ W}$$

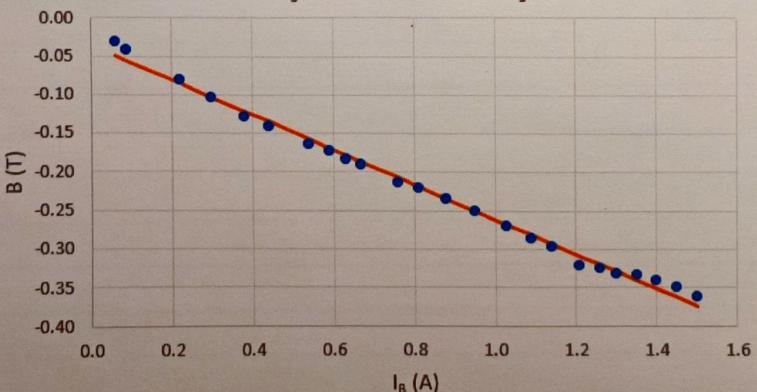
ANÁLISE DE DADOS E DISCUSSÃO

(A) Calibração

Calibração 1

I_B (± 0.01 A)	B (± 1 mT)	B (± 0.001 T)	Ajuste	Resíduos
0.06	-32	-0.032	-0.049	0.017
0.09	-42	-0.042	-0.056	0.014
0.22	-81	-0.081	-0.085	0.004
0.30	-104	-0.104	-0.103	-0.001
0.38	-129	-0.129	-0.121	-0.008
0.44	-141	-0.141	-0.135	-0.006
0.54	-163	-0.163	-0.157	-0.006
0.59	-173	-0.173	-0.168	-0.005
0.63	-183	-0.183	-0.177	-0.006
0.67	-190	-0.190	-0.186	-0.004
0.76	-213	-0.213	-0.207	-0.006
0.81	-220	-0.220	-0.218	-0.002
0.88	-235	-0.235	-0.234	-0.001
0.95	-251	-0.251	-0.250	-0.001
1.03	-269	-0.269	-0.268	-0.001
1.09	-285	-0.285	-0.281	-0.004
1.14	-296	-0.296	-0.292	-0.004
1.21	-321	-0.321	-0.308	-0.013
1.26	-325	-0.325	-0.320	-0.005
1.30	-332	-0.332	-0.329	-0.003
1.35	-333	-0.333	-0.340	0.007
1.40	-340	-0.340	-0.351	0.011
1.45	-350	-0.350	-0.362	0.012
1.50	-362	-0.362	-0.374	0.012

B em função de I - Calibração 1

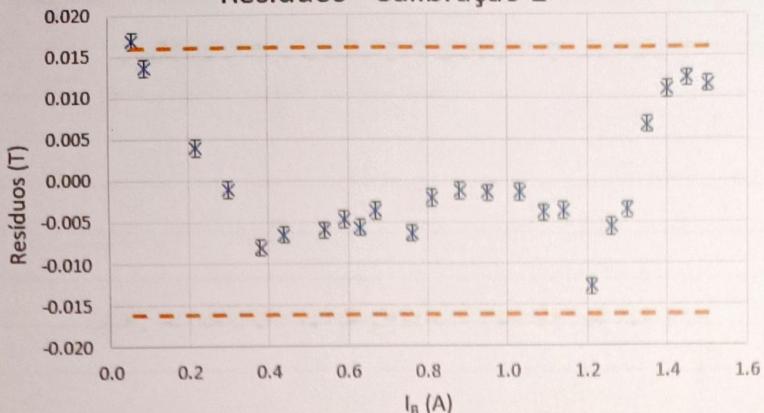


Ajuste Linear Calibração 1

m	-0.226	-0.035	b
u(m)	0.004	0.004	u(b)
r^2	0.994	0.0081	s(y)

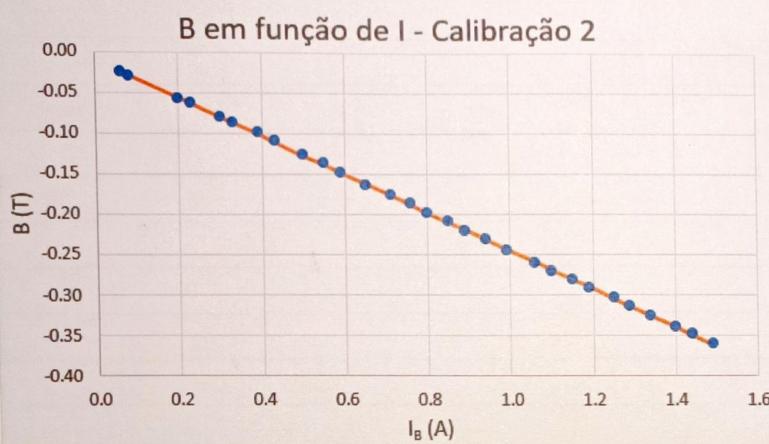
Resíduos - Calibração 1

(a traçado: $\pm 2s(y)$)

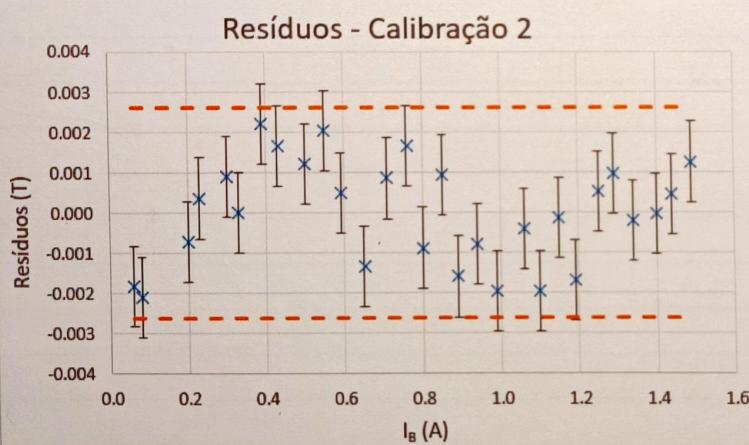


Calibragão 2

I_B (± 0.01 A)	B (± 1 mT)	B (± 0.001 T)	Ajuste	Resíduos
0.06	-25	-0.025	-0.023	-0.002
0.08	-30	-0.030	-0.028	-0.002
0.20	-57	-0.057	-0.056	-0.001
0.23	-63	-0.063	-0.0634	0.0004
0.30	-79	-0.079	-0.080	0.001
0.33	-87	-0.087	-0.08701	0.00001
0.39	-99	-0.099	-0.101	0.002
0.43	-109	-0.109	-0.111	0.002
0.50	-126	-0.126	-0.127	0.001
0.55	-137	-0.137	-0.139	0.002
0.59	-148	-0.148	-0.1485	0.0005
0.65	-164	-0.164	-0.163	-0.001
0.71	-176	-0.176	-0.177	0.001
0.76	-187	-0.187	-0.189	0.002
0.80	-199	-0.199	-0.198	-0.001
0.85	-209	-0.209	-0.210	0.001
0.89	-221	-0.221	-0.219	-0.002
0.94	-232	-0.232	-0.231	-0.001
0.99	-245	-0.245	-0.243	-0.002
1.06	-260	-0.260	-0.2596	-0.0004
1.10	-271	-0.271	-0.269	-0.002
1.15	-281	-0.281	-0.2809	-0.0001
1.19	-292	-0.292	-0.290	-0.002
1.25	-304	-0.304	-0.305	0.001
1.29	-313	-0.313	-0.314	0.001
1.34	-326	-0.326	-0.3258	-0.0002
1.40	-340	-0.340	-0.33998	-0.00002
1.44	-349	-0.349	-0.3494	0.0004
1.49	-360	-0.360	-0.361	0.001



Ajuste Linear Calibração 2			
m	-0.236	-0.009	b
$u(m)$	0.001	0.001	$u(b)$
r^2	0.9998	0.0013	$s(y)$



Os resíduos com tendências polinomiais da calibragão podem ser explicados por um esgarçamento não uniforme de alguns dos dados registados. Ainda assim, obtém-se uma relação linear entre a intensidade do campo magnético e o constante que põe em causa os bairros para ambas as calibragões.

Comparando as calibragões, a calibragão ② tem ajuste linear com desvio-padrão muito menor e é mais próximo de 1, pelo que foi esta a calibragão escolhida para o resto da experiência.

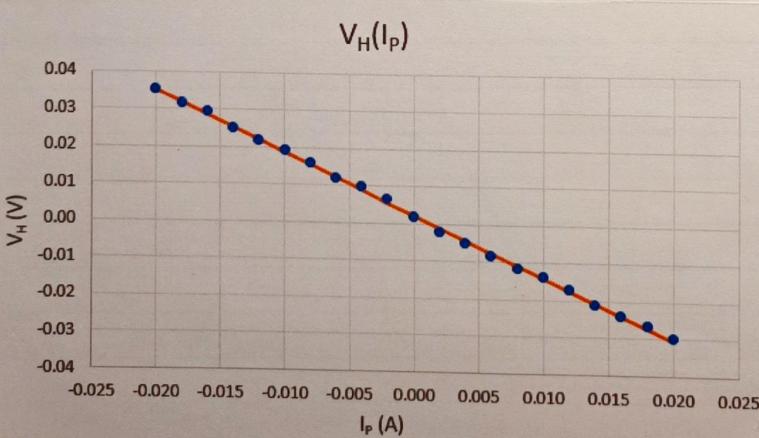
$$B = -0,236 I_B - 0,009$$

(B) Varian I_p ; B constante

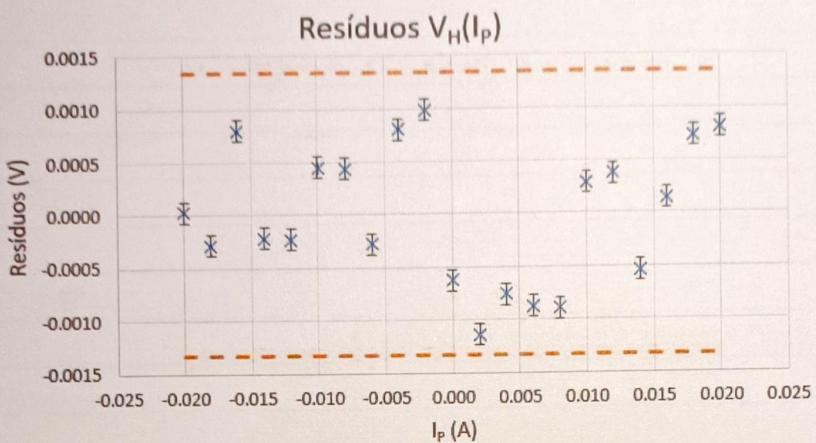
Mediu - m $I_B = (1,0004 \pm 0,0001)$ A, e usando a eq. de calibrado, determinau - m

$B = (-0,246 \pm 0,001) T$ (eq. de menor de imentos afos discundidos)

$I_p (\pm 1 \text{ mA})$	$I_p (\pm 0.001 \text{ A})$	$V_H (\pm 0.1 \text{ mV})$	$V_H (\pm 0.0001 \text{ V})$	$V_p (\pm 0.001 \text{ V})$	$V_H(I_p)$		$V_p(I_p)$	
					Ajuste	Resíduos	Ajuste	Resíduos
-20	-0.020	35.1	0.0351	1.087	0.03507	0.00003	1.093	-0.006
-18	-0.018	31.5	0.0315	0.982	0.0318	-0.0003	0.993	-0.011
-16	-0.016	29.3	0.0293	0.917	0.0285	0.0008	0.894	0.023
-14	-0.014	25.0	0.0250	0.787	0.0252	-0.0002	0.794	-0.007
-12	-0.012	21.7	0.0217	0.687	0.0219	-0.0002	0.694	-0.007
-10	-0.010	19.1	0.0191	0.612	0.0186	0.0005	0.595	0.017
-8	-0.008	15.8	0.0158	0.512	0.0154	0.0004	0.495	0.017
-6	-0.006	11.8	0.0118	0.392	0.0121	-0.0003	0.395	-0.003
-4	-0.004	9.6	0.0096	0.323	0.0088	0.0008	0.296	0.027
-2	-0.002	6.5	0.0065	0.232	0.0055	0.0010	0.196	0.036
0	0.000	1.6	0.0016	0.085	0.0022	-0.0006	0.096	-0.011
2	0.002	-2.2	-0.0022	-0.043	-0.0011	-0.0011	-0.004	-0.039
4	0.004	-5.1	-0.0051	-0.131	-0.0043	-0.0008	-0.103	-0.028
6	0.006	-8.5	-0.0085	-0.234	-0.0076	-0.0009	-0.203	-0.031
8	0.008	-11.8	-0.0118	-0.331	-0.0109	-0.0009	-0.303	-0.028
10	0.010	-13.9	-0.0139	-0.395	-0.0142	0.0003	-0.402	0.007
12	0.012	-17.1	-0.0171	-0.492	-0.0175	0.0004	-0.502	0.010
14	0.014	-21.3	-0.0213	-0.618	-0.0208	-0.0005	-0.602	-0.016
16	0.016	-23.9	-0.0239	-0.697	-0.0240	0.0001	-0.701	0.004
18	0.018	-26.6	-0.0266	-0.779	-0.0273	0.0007	-0.801	0.022
20	0.020	-29.8	-0.0298	-0.876	-0.0306	0.0008	-0.901	0.025



Ajuste Linear $V_H(I_p)$			
m	-1.64	0.0022	b
u(m)	0.01	0.0001	u(b)
r^2	0.9990	0.00067	s(y)



Os resíduos nos altômetros comprovando - n um relações lineares entre a tensão de Hall e a corrente que passou a amostra. O sinal de $V_H(I_p)$ é negativo, o que implica para um semicondutor do tipo - m.

De acordo com o protocolo da PHYWE, os dimensionais da amostra são:

$$d = 0,010 \text{ m}$$

$$L = 0,020 \text{ m}$$

$$t = 0,001 \text{ m}$$

$$S = d \times t = 0,000010 \text{ m}^2$$

Tomando a eq. (1) de introdução Técnica, calculou - n o coeficiente de Hall :

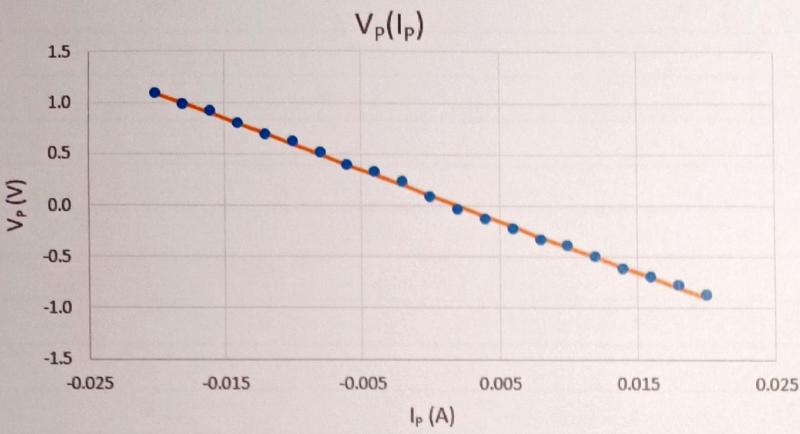
$$R_H = \frac{S}{d} \cdot \frac{1}{B} \cdot \frac{V_H}{I_p} \rightarrow \text{m}$$

$$\text{obtendo - n } R_H = (0,0067 \pm 0,0001) (\text{m}^3/\text{C}) \quad u(R_H)(\%) = 0,9\%$$

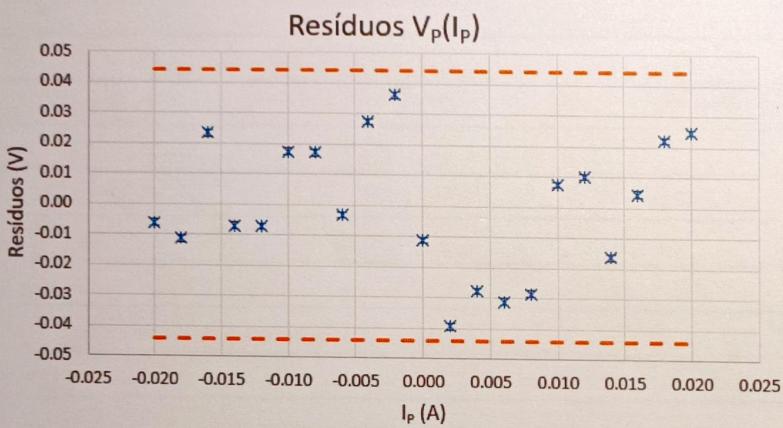
Tomando a eq. (2), calculou - n também o n de transportadores de carga por unidade de volume

$$n = \frac{1}{q R_H} \quad \text{obtendo - n } n = (933 \pm 9) \times 10^{18} \text{ m}^{-3}$$

$$u(n)(\%) = 0,9\%$$



Ajuste Lineal $V_p(I_p)$		
m	-49.8	0.096
u(m)	0.4	0.005
r^2	0.9988	0.022
s(y)		



Os erros são também aleatórios, logo comprova-se a relação linear entre a tensão e a corrente de amostra.

Usando a eq. (3), calculou-se a condutividade térmica de amostra, tendo:

$$\sigma_0 = \frac{L}{t \times d} \left| \frac{I_p}{V_p} \right| \rightarrow \frac{1}{lm} \quad \text{obtém-se} \quad \sigma_0 = (40,1 \pm 0,3) (\Omega^{-1} m^{-1})$$

$$u(\sigma_0) (\%) = 0,8\%$$

Usando a eq. (4), determinou-se a mobilidade elétrica

$$\mu = (0,268 \pm 0,003) m^{-3}$$

$$u(\mu) (\%) = 1,2\%$$

Usando a expressão (5) determinou-se a resistividade líquida de amostra:

$$1/\sigma_0 = (2,4925 \pm 0,0002) (\Omega \text{ cm})$$

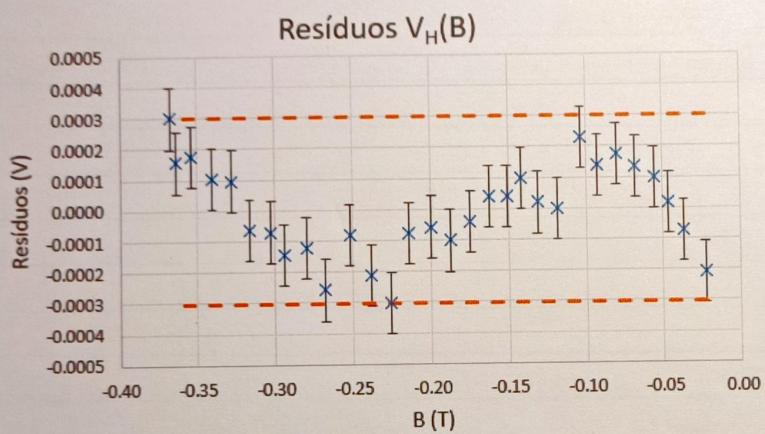
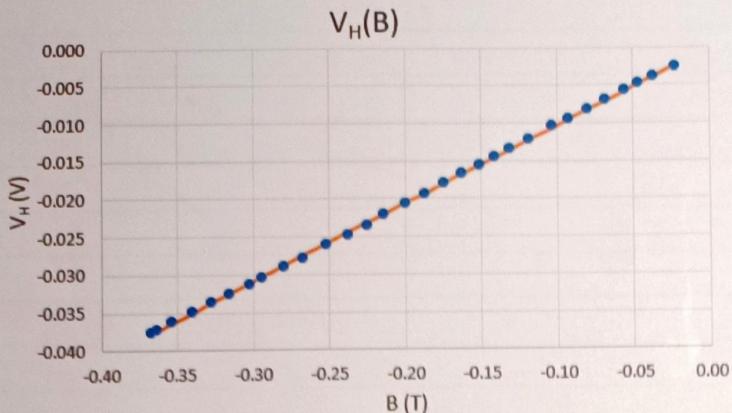
$$u(1/\sigma_0) (\%) = 0,01\%$$

O intervalo de resistividade indicado no protocolo PHYWE para m-Ge é de $[2; 2,5] \Omega \text{ cm}$, logo, tendo em conta a incerteza, o valor calculado está dentro do esperado.

Todos os valores determinados nesta parte de experiência têm incertezas relativamente baixas.

② Variação de I_p constante

I_B (A)	$u(I_B)$ (A)	B ($\pm 0,001$ T)	V_H ($\pm 0,1$ mV)	V_H ($\pm 0,0001$ V)	V_P ($\pm 0,001$ V)	$V_H(B)$	
						Ajuste	Resíduos
0.05916	0.00001	-0.023	-2.6	-0.0026	-0.766	-0.0024	-0.0002
0.11830	0.00001	-0.037	-3.9	-0.0039	-0.766	-0.0038	-0.0001
0.15902	0.00001	-0.047	-4.8	-0.0048	-0.765	-0.00482	0.00002
0.19946	0.00001	-0.056	-5.7	-0.0057	-0.764	-0.0058	0.0001
0.25042	0.00001	-0.068	-6.9	-0.0069	-0.765	-0.0070	0.0001
0.30144	0.00001	-0.080	-8.1	-0.0081	-0.766	-0.0083	0.0002
0.35357	0.00001	-0.093	-9.4	-0.0094	-0.766	-0.0095	0.0001
0.39843	0.00001	-0.103	-10.4	-0.0104	-0.766	-0.0106	0.0002
0.46303	0.00001	-0.118	-12.2	-0.0122	-0.766	-0.01220	0.00000
0.51744	0.00001	-0.131	-13.5	-0.0135	-0.766	-0.01352	0.00002
0.56184	0.00001	-0.142	-14.5	-0.0145	-0.766	-0.0146	0.0001
0.60058	0.00001	-0.151	-15.5	-0.0155	-0.766	-0.01554	0.00004
0.65010	0.00001	-0.163	-16.7	-0.0167	-0.767	-0.01674	0.00004
0.70019	0.00001	-0.175	-18.0	-0.0180	-0.767	-0.01796	-0.00004
0.75542	0.00001	-0.188	-19.4	-0.0194	-0.766	-0.0193	-0.0001
0.80663	0.00001	-0.200	-20.6	-0.0206	-0.767	-0.0205	-0.0001
0.86765	0.00001	-0.214	-22.1	-0.0221	-0.768	-0.0220	-0.0001
0.91593	0.00001	-0.226	-23.5	-0.0235	-0.768	-0.0232	-0.0003
0.96911	0.00001	-0.238	-24.7	-0.0247	-0.769	-0.0245	-0.0002
1.02802	0.00001	-0.252	-26.0	-0.0260	-0.769	-0.0259	-0.0001
1.09484	0.00001	-0.268	-27.8	-0.0278	-0.770	-0.0275	-0.0003
1.14577	0.00001	-0.280	-28.9	-0.0289	-0.770	-0.0288	-0.0001
1.2066	0.0001	-0.294	-30.4	-0.0304	-0.771	-0.0303	-0.0001
1.2426	0.0001	-0.303	-31.2	-0.0312	-0.771	-0.0311	-0.0001
1.3005	0.0001	-0.316	-32.6	-0.0326	-0.772	-0.0325	-0.0001
1.3483	0.0001	-0.328	-33.6	-0.0336	-0.772	-0.0337	0.0001
1.4021	0.0001	-0.340	-34.9	-0.0349	-0.773	-0.0350	0.0001
1.4586	0.0001	-0.354	-36.2	-0.0362	-0.774	-0.0364	0.0002
1.4990	0.0001	-0.363	-37.2	-0.0372	-0.774	-0.0374	0.0002
1.5173	0.0001	-0.368	-37.5	-0.0375	-0.774	-0.0378	0.0003



No gráfico de V_H em função de B observa-se uma tendência linear; no entanto, os resíduos têm uma tendência polinomial, além de que a ordem da magnitude ($1/B$) apesar da proximidade com o esperado de acordo com a eq. (1), foi determinada com muito pouca precisão (como visto no tableau dos parâmetros do ajuste a sua incerteza é o dobro do próprio valor). Isto indica que poderia haver um esparçamento mais uniforme entre os dados medidas (principalmente nos extremos).

Assim, determinou-se com este ajuste o coeficiente de Hall, reservando mais uma vez à eq. (1). Obteve-se $I_p = (0.018 \pm 0.001) \text{ A}$, logo, tendo:

$$R_H = \frac{S}{d} \frac{1}{I_p} \frac{V_H}{B} \rightarrow m$$

obtém-se $R_H = (0.0057 \pm 0.0003) (\text{m}^3/\text{C})$

$u(R_H) (\%) = 6\%$

Com a eq. (2) voltamos a obter o mº de transportadoras de carga por unidade de volume:

$$m = (109 \pm 6) \times 10^{19} \text{ m}^{-3}$$

$$u(m)(\gamma) = 6\gamma.$$

O coeficiente foi determinado com a mesma ordem de grandeza do valor de parte anterior, e com apenas uma ordem de grandeza de diferença; contudo, ambos os valores têm uma incerteza maior relativamente à parte anterior, apontando para uma maior qualidade do ajuste $V_H(I_p)$ comparativamente a $V_H(B)$.

Reavendo os valores da σ_0 calculado na parte anterior, determinou - se a probabilidade ótima para uma vez usando a eq. (4)

$$\mu = (0,23 \pm 0,01) \text{ m}^{-3}$$

$$u(\mu)(\gamma) = 6\gamma.$$

Este valor também foi calculado com a mesma ordem de grandeza do valor de parte anterior, mas com menor incerteza.

De modo a obter valores finais para estes constantes, fog - m a média do valor calculado na parte (B) com o valor calculado na parte (C), obtendo - se

$$\bar{R}_H = (0,0062 \pm 0,0001) (\text{m}^3/\text{c})$$

$$u(\bar{R}_H)(\gamma) = 1,5\gamma.$$

$$\bar{m} = (101 \pm 2) \times 10^{19} \text{ m}^{-3}$$

$$u(\bar{m})(\gamma) = 2\gamma.$$

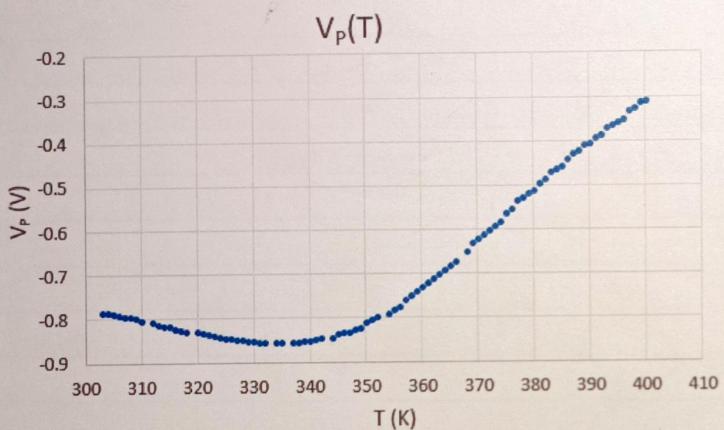
$$\bar{\mu} = (0,25 \pm 0,01) \text{ m}^{-3}$$

$$u(\bar{\mu})(\gamma) = 6\gamma.$$

Quanto a V_p em função de B , como vê na tabela, V_p apenas varia entre $[-0,766; -0,744]$ V, que corresponde a uma variação de aproximadamente 1% e, portanto, não é possível concluir sobre qualquer relação entre o campo magnético e a tensão da amostra.

D) Variáveis da temperatura

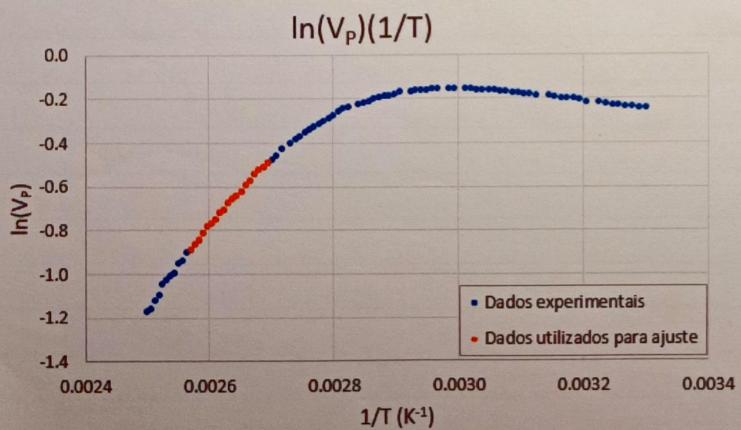
→ Aquecimento



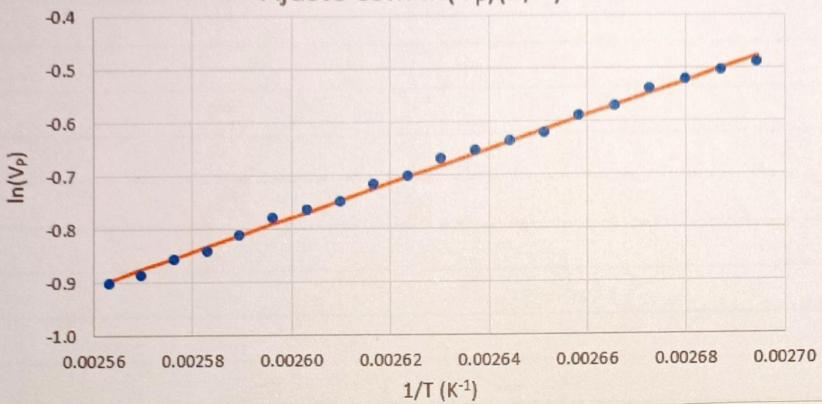
$$u(V_p) = 0,001 \text{ V}$$

$$u(\ln(V_p)) = \sqrt{\frac{u(V_p)^2}{V_p}}$$

Construiu-se o gráfico de $\ln(V_p)$ em função de $1/T$ (de acordo com a eq. (6)) e realizou-se o ajuste linear para determinar a energia de ativação da semicondutora no regime intrínseco ($m = p$), o qual corresponde a temperaturas mais altas (envolvem $[371, 389]$ K).



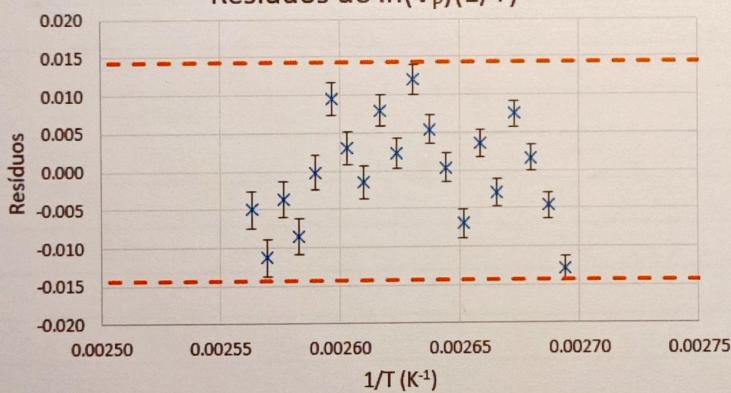
Ajuste com $\ln(V_p)(1/T)$



Ajuste Linear $\ln(V_p)(1/T)$

m	3188	-9.1	b
u(m)	43	0.1	u(b)
r²	0.997	0.0072	s(y)

Resíduos de $\ln(V_p)(1/T)$



Os resíduos são aleatórios, logo comprovou-se a relação exponencial esperada entre a condutividade da amostra e a sua temperatura.

Pontando da eq. (6), temos que o declive corresponde a m = $\frac{E_g}{2K_B}$ logo:

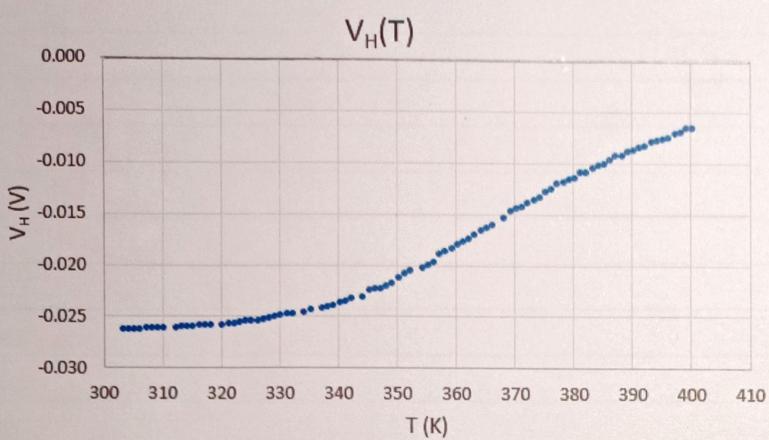
$$E_g = 2K_B m$$

Determinando - m a energia da ativação:

$$E_g (\text{aquecimento}) = (8,80 \pm 0,12) \times 10^{-20} \text{ J}$$

$$u(E_g (\text{aquecimento})) (\%) = 1,4\%$$

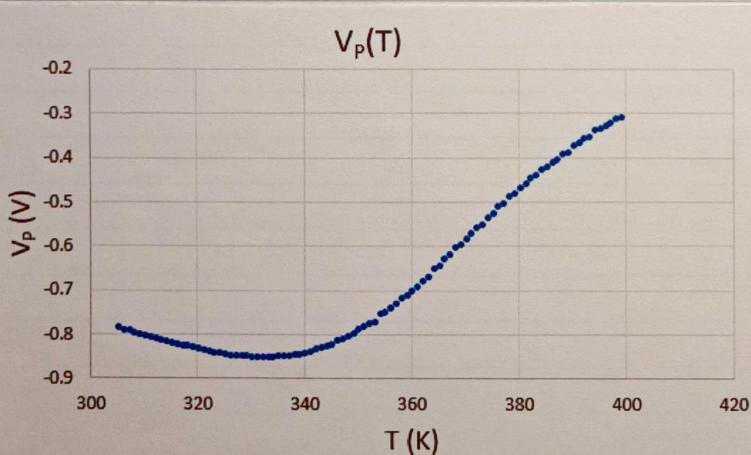
A inserção relativamente baixa mostra a equalidade do ajuste relâmpago



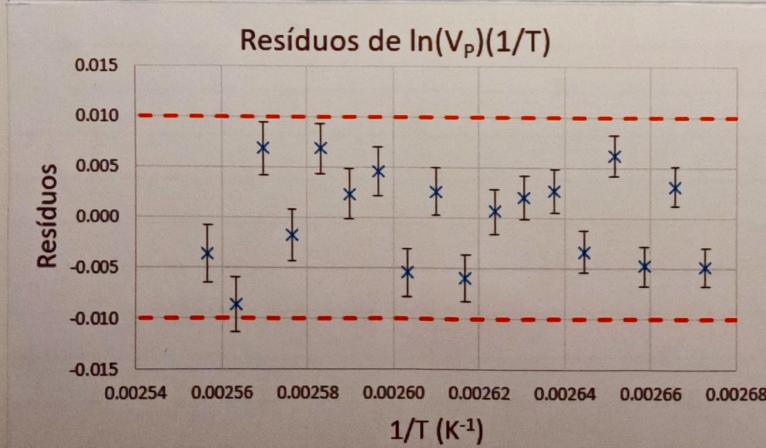
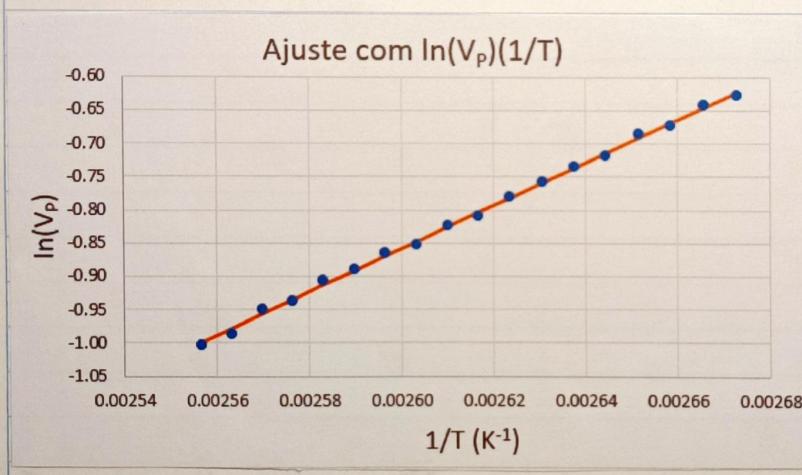
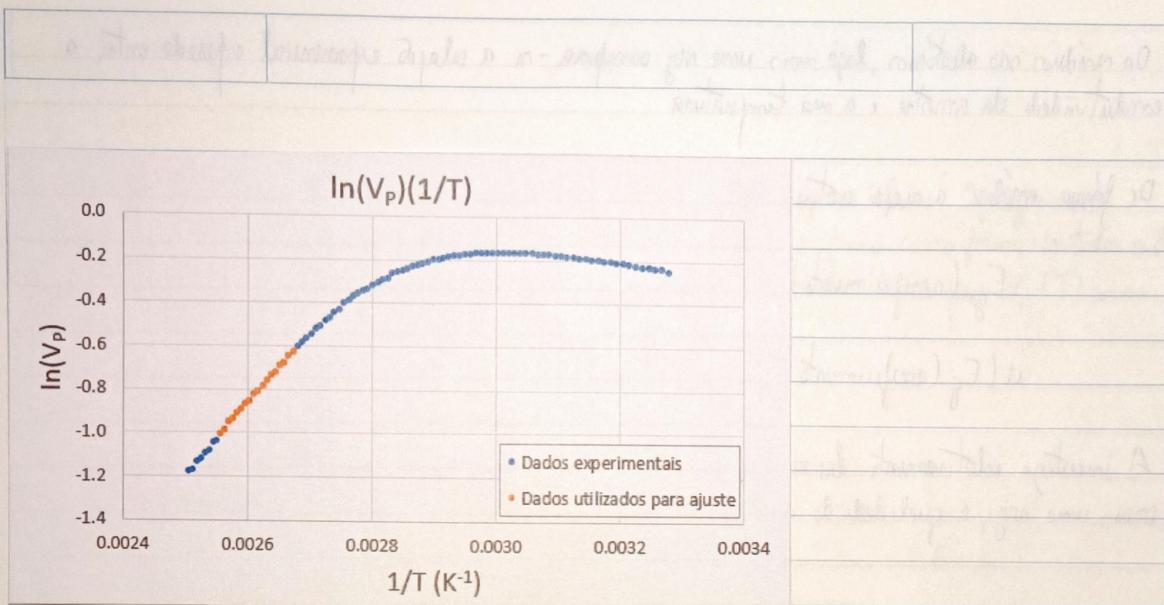
$$\mu(V_H) = 0,0001 \text{ V}$$

Como no gráfico acima, a tensão de Hall é negativa, como esperado, devido ao ser um semicondutor tipo-p e aproxima-se de zero com o aumento de temperatura (regime de condutividade intrínseca)

→ Arrefecimento



Procedeu-se à mesma análise da negra anterior, sendo a gama de temperaturas [374, 391] K a melhor para o ajuste linear:



Ajuste Linear $\ln(V_p)(1/T)$		
m	3238	-9.3
u(m)	33	0.1
r ²	0.998	0.0050
b		s(y)

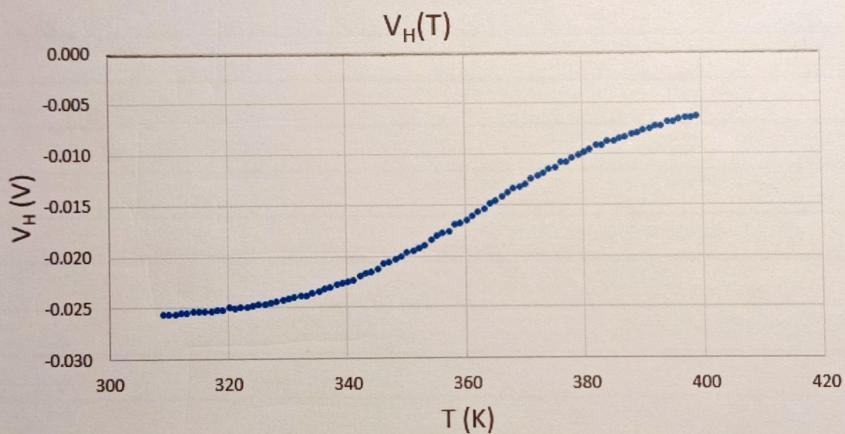
Os resultados são aleatórios, logo mais uma vez comprova-se a relação exponencial esperada entre a condutividade da amostra e a sua temperatura.

De forma análoga à negra anterior determinou-se a energia de ativação:

$$E_g(\text{anterior}) = (8,94 \pm 0,09) \times 10^{-20} \text{ J}$$

$$u(E_g(\text{anterior})) (\%) = 1,0 \%$$

A incerteza relativamente baixa e praticamente igual à calculada para o aquecimento misterioso, mais, uma vez, a qualidade do ajuste realizado.



Vendo o gráfico acima, mais uma vez verifica-se que a tensão de Hall é negativa para um semicondutor de tipo - n e que é mais próxima de zero quanto maior for a temperatura (isto é, o regime de condutividade intrínseca).

→ Comparações

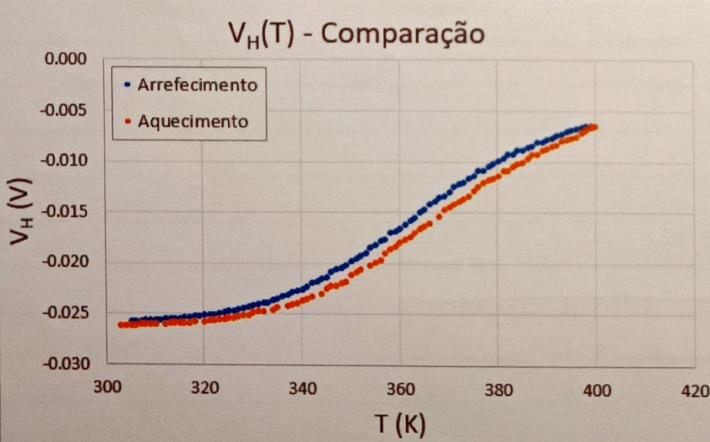
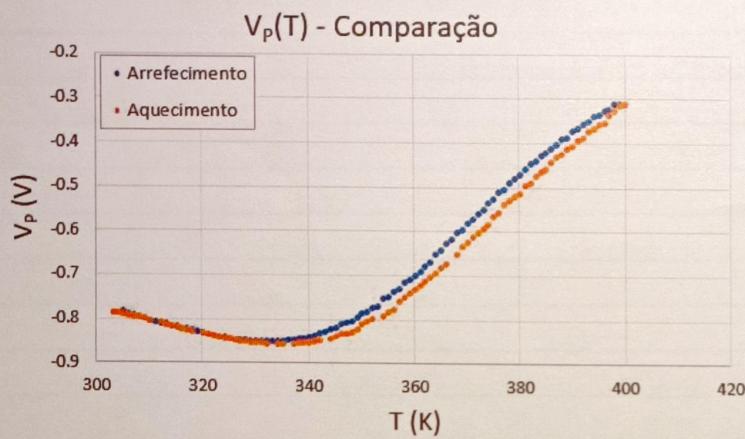
Para uma melhor precisão, calcula-se a média das duas energias de ativação determinadas:

$$\bar{E}_g = (8,87 \pm 0,05) \times 10^{-20} \text{ J}$$

$$u(\bar{E}_g) (\%) = 0,6 \%$$

As duas energias de ativação são não-discrepantes, até porque a incerteza de média é menor do que a incerteza de cada valor; no entanto, a pequena diferença pode ser justificada por diferenças

mesmos curvas de aquecimento e arrefecimento, como se observa nos gráficos abaixo. O aquecimento ocorreu mais lentamente do que o arrefecimento, podendo ter afetado a forma como foram registrados os dados a partir do vídeo, até porque se observou a mesma dissymetria nos curvas tanto para $V_p(T)$ como para $V_h(T)$.



EQUAÇÕES DE INCERTEZAS

Pont. A

$$B = mI + b$$

$$u(B) = \sqrt{(I \cdot u(m))^2 + (u(b))^2 + (m \cdot u(I))^2}$$

Pont. B

$$u(R_H) = \frac{s}{d} \sqrt{\left(-\frac{m}{B^2} u(B)\right)^2 + \left(\frac{m(m)}{B}\right)^2}$$

$$u(m) = \frac{1}{q} \sqrt{\left(-\frac{u(R_H)}{R_H^2}\right)^2} \quad (\text{também para a ponte C})$$

$$u(\sigma_0) = \sqrt{\left(-\frac{u(m)}{ImI}\right)^2}$$

$$u(\mu) = \sqrt{(R_H u(\sigma_0))^2 + (\sigma_0 u(R_H))^2} \quad (\text{também para a ponte C})$$

$$u(1/\sigma_0) = \sqrt{\left(-\frac{u(\sigma_0)}{\sigma_0^2}\right)^2}$$

Pont. C

$$u(R_H) = \frac{s}{d} \sqrt{\left(-\frac{m}{I_P^2} u(I_P)\right)^2 + \left(\frac{u(m)}{I_P}\right)^2}$$

Pont. D

$$u(E_f) = \sqrt{2k_B u(m)}$$

$$\text{Incerteza da média } u(n) = \frac{\sigma}{\sqrt{2}} \xrightarrow{\substack{\text{desvio - } \\ \text{medida - } \\ \text{raio}}} \xrightarrow{\substack{\text{m. de valores para cada variação}}} \text{medida}$$

(*) deu que o aqüieimento foi mais demorado que o aquecimento

CONCLUSÃO

- Com o calímetro, comprovou - se a dependência linear do campo magnético no corrente, obtendo - a $B = -0,236 I + 0,009$ mT que na prática realiza um melhor ajuste linear com melhor esforço entre os dados registrados.
- Para um nômicondutor de tipo - n comprovou - se a linearidade entre a tensão de Hall e a corrente de amostra, e entre a própria tensão de amostra e a corrente que se depara (declínio negativo, como esperado).
- Determinou - se a condutividade elétrica de m - Ge como $\sigma_0 = 40,1 \Omega^{-1} m^{-1} \pm 0,8\%$, e a sua resistividade como $1/\sigma_0 = 2,4925 \Omega m \pm 0,01\%$, a qual está dentro do intervalo esperado.
- Comprovou - se a linearidade entre a tensão de Hall e o campo magnético aplicado, ainda que o ajuste pudesse ser melhorado com melhor esforço dos dados, principalmente nos valores dos extremos.
- Não foi possível provar qualquer tipo de relação entre a tensão da amostra e o campo magnético aplicado dado que a tensão de amostra varia apenas 1% com a variação do campo magnético.
- Calculando a média e a incerteza de média dos grandes determinados, a partir dos declínios V_H (I_p) e V_H (B), tem - se como valores finais, com precisão relativamente elevada.

$$\text{Coeficiente de Hall: } R_H = 0,0062 \text{ m}^3/C \pm 1,5\%.$$

$$m^{\circ} \text{ de transformadores de corrente: } m = 1,01 \times 10^{21} \text{ m}^{-3} \pm 2\%.$$

(por unidade de volume)

$$\text{Mobilidade elétrica: } \mu = 0,25 \text{ m}^2/Vs \pm 6\%.$$

- Tanto no aquecimento como no ampeiramento de amostra, comprovou - se a relação exponencial entre a sua condutividade e a sua temperatura, e que a tensão de Hall é negativa para nômicondutor de tipo - n e aproximadamente zero em regime intrínseco (temperaturas altas).
- Obteve - se como valor final de energia da transição do nômicondutor (média de ambos os ampeiramentos) $E_g = 8,87 \times 10^{-20} \text{ J} \pm 0,6\%$, sendo que a incerteza, ainda que baixa, é explicada pelo ligeiro desvio entre os têndemias dos curvas de ampeiramento e aquecimento. (*)