

# Fenómenos Termoeléctricos

## Efecto Seebeck

*Laboratorio de termodinámica (TS)*

José Pazos Pérez

Grupo T2a

# Índice

<b>I</b>	<b>Introducción</b>	<b>2</b>
1.	Obxetivos	2
2.	Material	2
3.	O problema de estudo	3
<b>II</b>	<b>Procedemento experimental</b>	<b>4</b>
1.	Caracterización da resistencia	4
1.1.	Medidas . . . . .	4
1.2.	Regresión lineal . . . . .	4
2.	Evolución ó estado estacionario	5
2.1.	Medidas . . . . .	5
2.2.	Regresión non lineal . . . . .	9
2.3.	Cálculo de $\lambda_T$ e $C$ . . . . .	10
3.	Medida da forza electromotriz	11
3.1.	Modo aberto . . . . .	11
3.2.	Modo pechado . . . . .	11
3.2.1.	Medidas . . . . .	12
3.2.2.	Regresión lineal . . . . .	12
4.	Coefficientes de Seebeck	13
<b>III</b>	<b>Conclusións</b>	<b>14</b>

## Parte I

# Introducción

## 1. Obxetivos

Nesta práctica faremos varios experimentos cun dispositivo termoeléctrico e obteremos:

- O coeficiente de Seebeck( $S$ )
- A resistencia interna ( $r_i$ )
- A capacidade calorífica ( $C$ )
- A condutividade térmica ( $\lambda_T$ )

O obxectivo, ademáis de determinar estas cantidades, é a familiarización co uso e funcionamento dun dispositivo termoeléctrico. Ademáis, traballaremos a análise de datos e a regresión a curvas expoñenciais.

## 2. Material

- **Dispositivo termoeléctrico** con 142 pares de conductores A e B
- **Unión fría:** conectada ó grifo
- **Unión quente:** conectada á resistencia calefactora
- Fonte de corrente alterna
- Potenciómetro (como resistencia variable)
- Termómetro dixital conectado ás unións fría e quente
- Multímetros en configuración voltímetro e amperímetro

### 3. O problema de estudo

O efecto Seebeck prodúcese cando conectamos dous materiais, A e B, a dúas unións, fría e quente, que teñen unha diferenza de temperatura  $\Delta T$ . Esta diferenza provoca que apareza unha corrente entre ambos, cuxa forza electromotriz  $\varepsilon$  ven dada por:

$$\varepsilon = S \cdot \Delta T \quad (1)$$

$S$  é o coeficiente de Seebeck que buscamos determinar. Para iso quentaremos a unión quente mediante a resistencia, que proporcionará unha potencia  $W_R$ . Chamaremos  $T_2$  á unión quente e  $T_1$  á fría. Ademais, tendo en conta a capacidade calorífica  $C$  e a condutividade térmica  $\lambda_T$ , podemos escribir a ecuación de balance enerxético:

$$C \frac{dT_2}{dt} = W_R - \lambda_T(T_2 - T_1) \quad (2)$$

A temperatura da unión quente  $T_2$  crece exponencialmente ata que chega ó **estado estacionario**, no que acada o valor máximo  $T_2^\infty$ . Neste estado no que a temperatura non varía cúmprese:

$$W_R = \lambda_T(T_2^\infty - T_1) \quad (3)$$

Tamén podemos ver como evoluciona a temperatura  $T_2$  co tempo:

$$T_2(t) = T_2^\infty - (T_2^\infty - T_2(0)) \cdot e^{-\frac{\lambda_T}{C}t} \quad (4)$$

## Parte II

# Procedemento experimental

## 1. Caracterización da resistencia

Antes de estudar o sistema termoeléctrico debemos de coñecer o valor da resistencia calefactora,  $R_C$ . Para iso podemos utilizar a ley de Ohm:

$$V = IR \quad (5)$$

### 1.1. Medidas

Tomaremos pares de datos  $V, I$  para facer unha regresión lineal e obter o valor da resistencia. Para iso, colocamos o voltímetro en paralelo á fonte de corrente alterna e o amperímetro en serie coa fonte e a resistencia. Facemos varias medidas e obtemos a seguinte táboa:

$V(V) \pm 0,1V$	$I(mA) \pm 0,1mA$
10,43	12,3
20,0	24,1
40,5	49,7
59,7	73,5
80,2	98,5
100,4	123,3
120,5	147,7
139,9	170,8
160,7	195,7
162,5	198,1

Cadro 1: Medidas de tensión ( $V$ ) e intensidade ( $I$ )

### 1.2. Regresión lineal

Tendo o cadro cos datos podemos facer unha regresión lineal simple por mínimos cadrados sen término independente (explicación nos apuntes de técnicas experimentais de Alfredo Amigo). Obtemos a seguinte gráfica e o valor para  $R_C$ :

$$R_C = 818,5 \pm 1,0\Omega \quad (6)$$

É un axuste de 5 noves, con  $R^2 = 0,999993$ , polo que diremos que é moi preciso.

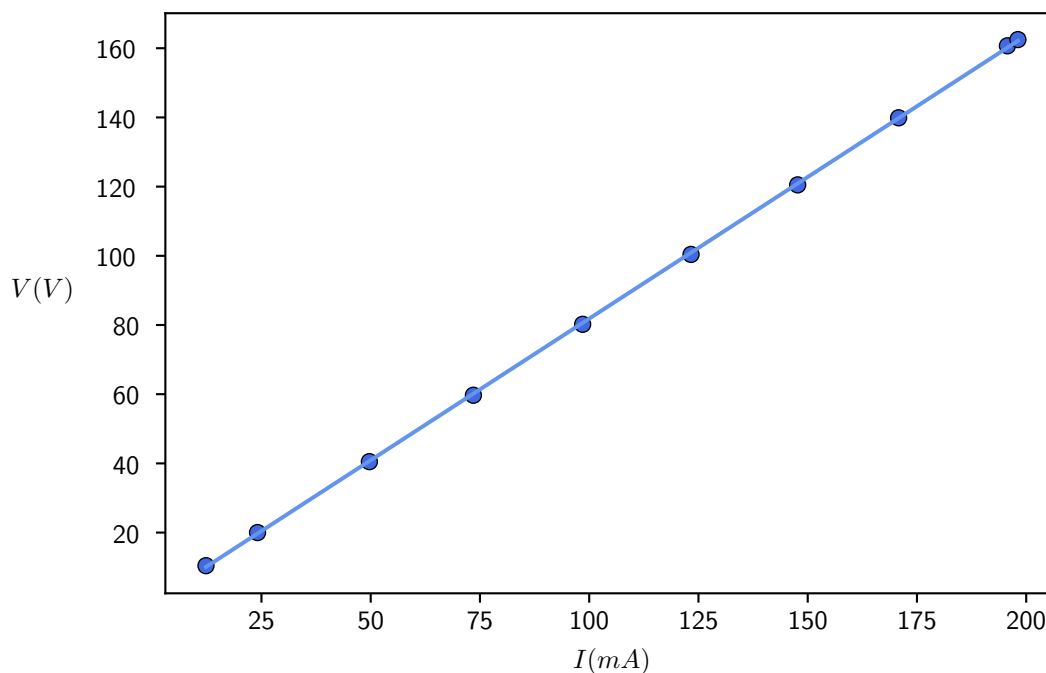


Figura 1: Tensión fronte a Intensidade con regresión lineal

## 2. Evolución ó estado estacionario

Agora procederemos a quantar o circuito quente coa resistencia calefactora e ver como evoluciona a temperatura do sistema. Primeiro desconectamos o amperímetro e mantemos o voltímetro. Miramos que o grifo da unión fría esté funcionando e acendemos o termómetro e a fonte de corrente alterna. Veremos como o valor de  $T_2$  comezará a subir no termómetro.

### 2.1. Medidas

Elaboraremos un cadro no que anotaremos  $T_1$  e  $T_2$  cada minuto ata que  $T_2$  non suba máis de  $0,1^\circ C$  cada 2 minutos. Presentamos as táboas para 125,2V e 150,5V.

As incertidumbres das medidas serán de  $0,1^\circ C$  para as temperaturas, e de aproximadamente 3s para o tempo, para ter en conta calquer error pola nosa parte ao anotar os datos xusto cando pasa  $1min$ .

$t(min)$	$T_1(^{\circ}C)$	$T_2(^{\circ}C)$
1	19,4	25,3
2	19,5	25,9
3	19,4	26,4
4	19,4	27,0
5	19,4	27,5
6	19,5	28,1
7	19,6	28,6
8	18,2	29,0
9	18,2	29,4
10	18,3	29,9
11	18,4	30,4
12	18,4	30,8
13	18,5	31,2
14	18,8	31,6
15	18,7	31,9
16	18,6	32,2
17	18,7	32,6
18	18,8	32,9
19	18,9	33,2
20	19,0	33,5
21	19,2	33,7
22	19,1	33,9
23	19,0	34,2
24	19,1	34,4
25	19,1	34,7
26	19,4	34,9
27	19,5	35,1
28	19,3	35,3
29	19,5	35,6
30	19,4	35,8
31	19,3	35,9
32	19,6	36,1
33	19,9	36,3
34	20,0	36,4

$t(min)$	$T_1(^{\circ}C)$	$T_2(^{\circ}C)$
35	20,1	36,7
36	20,4	36,8
37	20,1	36,9
38	20,0	37,1
39	19,9	37,3
40	20,1	37,4
41	20,3	37,5
42	20,4	37,7
43	20,3	37,9
44	20,5	38,0
45	20,4	38,1
46	20,5	38,2
47	20,5	38,3
48	20,4	38,4
49	20,5	38,5
50	20,5	38,6
51	20,6	38,8
52	20,5	38,9
53	20,7	38,9
54	20,7	39,0
55	20,6	39,1
56	20,5	39,2
57	20,7	39,3
58	20,6	39,4
59	20,6	39,4
60	20,7	39,5
61	20,7	39,6
62	20,9	39,7
63	17,3	39,5
64	17,3	39,5
65	17,3	39,6
66	17,3	39,6
67	17,3	39,7
68	17,3	39,7

Cadro 2: Medidas de  $T_1$  e  $T_2$  respecto ó tempo para  $V_1 = 125,2V$

$t(min)$	$T_1(^{\circ}C)$	$T_2(^{\circ}C)$
1	17,7	42,0
2	17,6	42,3
3	17,7	42,6
4	17,7	42,9
5	17,7	43,3
6	17,6	43,6
7	17,7	43,9
8	17,7	44,3
9	17,8	44,5
10	17,8	44,8
11	17,8	45,0
12	17,7	45,2
13	17,7	45,5
14	17,7	45,7
15	17,8	45,8
16	17,8	46,1
17	17,9	46,3
18	17,8	46,4
19	17,9	46,6
20	17,9	46,8
21	17,9	47,0
22	17,9	47,1

$t(min)$	$T_1(^{\circ}C)$	$T_2(^{\circ}C)$
23	17,9	47,3
24	18,0	47,4
25	17,9	47,6
26	17,9	47,7
27	18,0	47,8
28	17,9	48,0
29	17,9	48,1
30	17,9	48,2
31	18,0	48,3
32	17,9	48,4
33	18,0	48,5
34	17,9	48,6
35	17,9	48,7
36	17,9	48,8
37	18,0	48,9
38	18,0	48,9
39	18,1	49,0
40	18,1	49,1
41	18,1	49,2
42	18,1	49,3
43	18,1	49,3
44	18,1	49,3

Cadro 3: Medidas de  $T_1$  e  $T_2$  respecto ó tempo para  $V_2 = 150,5V$

Podemos debuxar as gráficas correspondentes a estes valores con `matplotlib`. Sen embargo, na primeira (2) veremos algo curioso. O circuito quente sube exponencialmente ata acadar unha temperatura máxima na que se estabiliza. O circuito frío tamén tende a subir, pero hai dous saltos preocupantes arredor de  $t = 8min$  e  $t = 63min$ .

Tras comunicarlle o comportamento extraño do circuito ó profesor encargado este recolocou as sondas do termómetro e as medicións subsequentes non presentaron este problema (ó facer iso, o circuito termoeléctrico enfriouse un pouco, por eso podemos ver un salto en  $T_2$  cara ó final). Deducimos pois que foi un mal contacto da sonda colocada no circuito frío  $T_1$ , e descartaremos a súa contribución na primeira gráfica. A sonda de  $T_2$  parece que funcionou correctamente á vista dos resultados.



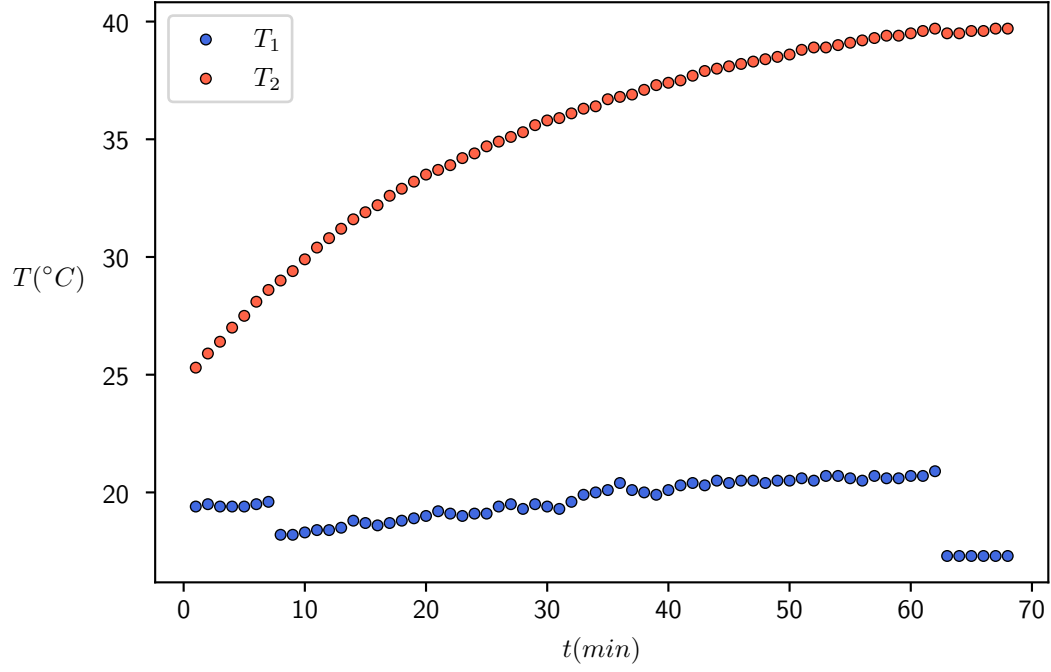


Figura 2: Temperaturas do circuito frío  $T_1$  e do quente  $T_2$  fronte o tempo para  $V = 125, 2V$

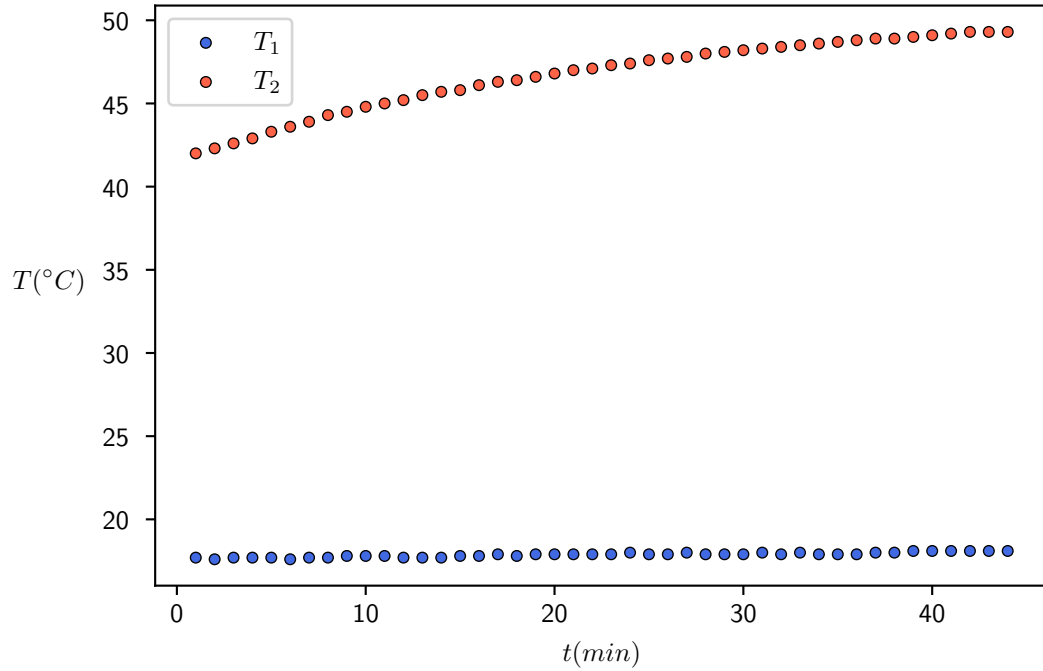


Figura 3: Temperaturas do circuito frío  $T_1$  e do quente  $T_2$  fronte o tempo para  $V = 150, 5V$

Tamén podemos observar que na segunda medición, con  $V = 150, 5V$ , tivemos que tomar menos valores ata chegar ó estado estacionario. Isto se debe a que o circuito xa estaba quente da experiencia anterior.

Nesta segunda gráfica (3) vemos que  $T_1$  non ten ningún salto raro. Ademáis, vemos que crece moi pouquiño, pero aumenta algo de valor, non é constante. Esto se debe á transmisión de calor que se produce dende o circuito quente ó frío.

## 2.2. Regresión non lineal

Faremos unha regresión non lineal de  $T_2$  a unha curva do estilo:

$$y = a + b \cdot e^{cx} \quad (7)$$

Se a comparamos con (4) podemos identificar:

$$\begin{aligned} y &= T_2(t) & x &= t \\ a &= T_2^\infty & b &= -(T_2^\infty - T_2(0)) & c &= -\frac{\lambda_T}{C} \end{aligned}$$

Debuxamos as gráficas cos seus parámetros de axuste<sup>1</sup>:

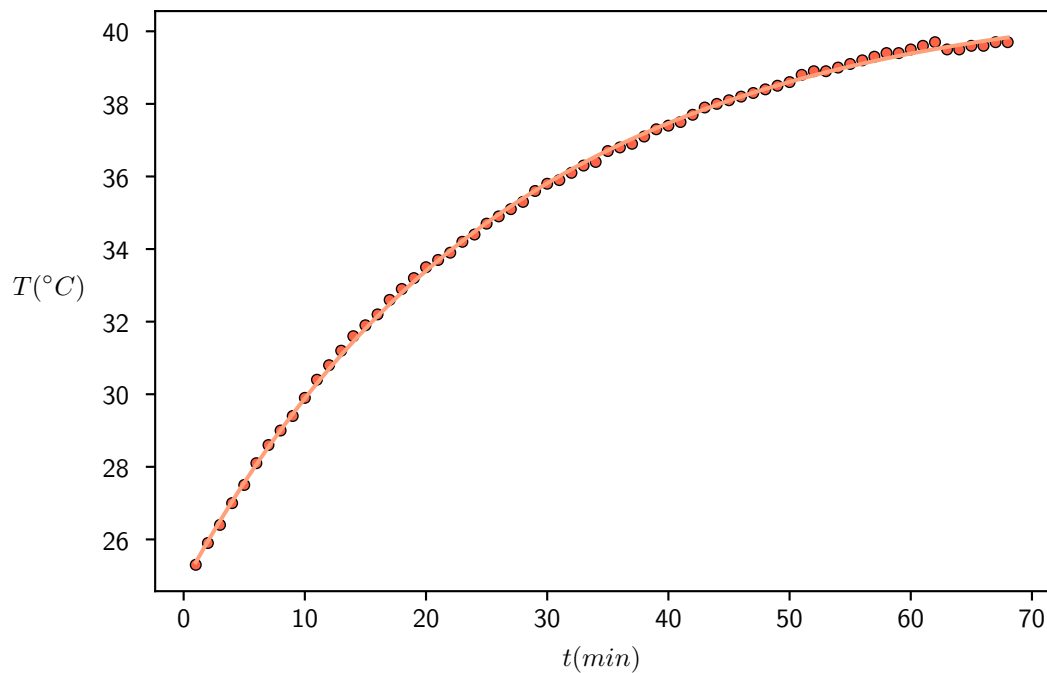


Figura 4: Temperaturas do circuito quente  $T_2$  con regresión non lineal para  $V = 125, 2V$

---

<sup>1</sup>Representaremos as gráficas en graos celsius por ser máis intuitivas pero realizaremos todos os cálculos en Kelvin.

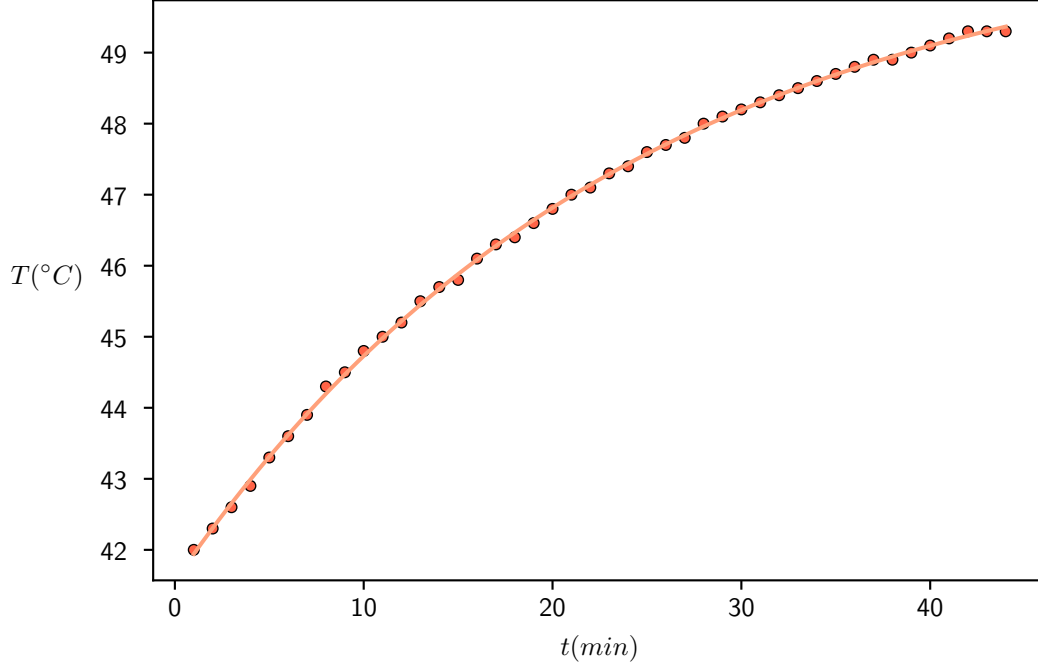


Figura 5: Temperaturas do circuito quente  $T_2$  con regresión non lineal para  $V = 150,5V$

	<b>a(K)</b>	<b>b(K)</b>	<b>c(s<sup>-1</sup>)</b>
<b>V = 125,2V</b>	$314,094 \pm 0,051$	$-16,330 \pm 0,045$	$(-6,271 \pm 0,057) \cdot 10^{-4}$
<b>V = 150,5V</b>	$323,846 \pm 0,054$	$-9,284 \pm 0,044$	$(-6,954 \pm 0,093) \cdot 10^{-4}$

Cadro 4: Valores do axuste non lineal

Vemos que ambos valores de  $a = T_2^\infty$  son algo maiores que os acadados nos experimentos, aínda que non moito, polo que non quedaba demasiado para acadar o estado estacionario.

### 2.3. Cálculo de $\lambda_T$ e $C$

A partir destes datos podemos calcular  $\lambda_T$  e  $C$ . Despexamos  $\lambda_T$  de (3) e temos:

$$\lambda_T = \frac{W_R}{T_2^\infty - T_1} = \frac{V^2}{R_C(T_2^\infty - T_1)} \quad (8)$$

$$s(\lambda_T) = \lambda_T \sqrt{\left(\frac{2s(V)}{V}\right)^2 + \left(\frac{s(R_C)}{R_C}\right)^2 + \left(\frac{s(T_2^\infty)}{T_2^\infty - T_1}\right)^2 + \left(\frac{s(T_1)}{T_2^\infty - T_1}\right)^2} \quad (9)$$

Na ecuación anterior aparece  $T_1$ , que asumiremos constante ó longo do experimento. Sen embargo, como o seu valor variou tanto no primeiro experimento, e non era estríctamente constante no segundo, tomaremos as súas medias con tratamento de incertidumbres. Para  $V = 125,2V$  tomaremos a incertidumbre de  $T_1$  como  $\pm 2K$ , xa que é o rango que cubre o

salto maior. Podemos intuír que este resultado non terá un índice de confianza alto. No segundo caso, con  $V = 150, 5V$ ,  $s(T_1) = \pm 0, 1K$ .

$V = 125, 2V$	$\bar{T}_1 = 292,7 \pm 2,0K$
$V = 150, 5V$	$\bar{T}_1 = 290,8 \pm 0,10K$

Cadro 5: Valores medios de  $T_1$

Sustituíndo podemos calcular a condutividade, e unha vez a teñamos tamén podemos despexar a capacidade calorífica có parámetro  $c$  da regresión anterior:

$$C = -\frac{\lambda_T}{c} \quad s(C) = \left| \frac{1}{c} \right| \sqrt{s(\lambda_T)^2 + (C \cdot s(c))^2} \quad (10)$$

$V = 125, 2V$	$\lambda_T = 0,895 \pm 0,084 \text{ W/K}$	$C = 1430 \pm 130J/K$
$V = 150, 5V$	$\lambda_T = 0,8392 \pm 0,0033 \text{ W/K}$	$C = 1207 \pm 17J/K$

Cadro 6: Condutividade e capacidade caloífica do termoeléctrico

### 3. Medida da forza electromotriz

Agora, mantendo o voltaxe do xerador para permanecer no estado estacionario, retiramos o voltímetro do circuito RC. Mediremos a  $\varepsilon$  xerada polo efecto Seebeck en dúas configuracións.

#### 3.1. Modo aberto

Conectamos o voltímetro directamente ós bornes do módulo termoeléctrico, en configuración DC. Obtemos os seguintes valores:

$V = 125, 2V$	$\varepsilon = 1,172 \pm 0,001V$
$V = 150, 5V$	$\varepsilon = 1,661 \pm 0,001V$

Cadro 7: Forza electromotriz  $\varepsilon$  en modo aberto, medindo en bornes

#### 3.2. Modo pechado

Cerramos o dispositivo termoeléctrico conectando ambos bornes en serie cun potenciómetro (resistencia variable). A caída de potencial do circuito é debida tanto á resistencia interna  $r_i$  como á do potenciómetro  $R_P$ .

$$\varepsilon = \Delta V_{r_i} + \Delta V_{R_P} \quad \rightarrow \quad \Delta V_{R_P} = \varepsilon - r_i I \quad (11)$$

### 3.2.1. Medidas

Conectando o voltímetro en paralelo nos bornes do potenciómetro e o amperímetro en serie, mediremos pares  $\Delta V_{RP}, I$  cos que poderemos facer un axuste lineal con término independente e obter  $\varepsilon$  e  $r_i$ . A continuación detallamos os cadros cas medidas:

$V_{RP}(V) \pm 0,001V$	$I(mA) \pm 0,1mA$	$V_{RP}(V) \pm 0,001V$	$I(mA) \pm 0,1mA$
0,245	194,9	0,728	192,6
0,320	175,1	0,800	176,7
0,356	168,4	0,899	155,5
0,399	159,0	0,935	148,1
0,441	149,6	0,998	134,5
0,495	137,6	1,033	126,9
0,569	121,8	1,096	113,8
0,605	114,5	1,126	107,6
0,643	106,5	1,184	95,4
0,695	95,7	1,221	87,8

Cadro 8:  $\Delta V_{RP}, I$  para  $V = 125,2V$

Cadro 9:  $\Delta V_{RP}, I$  para  $V = 150,5V$

### 3.2.2. Regresión lineal

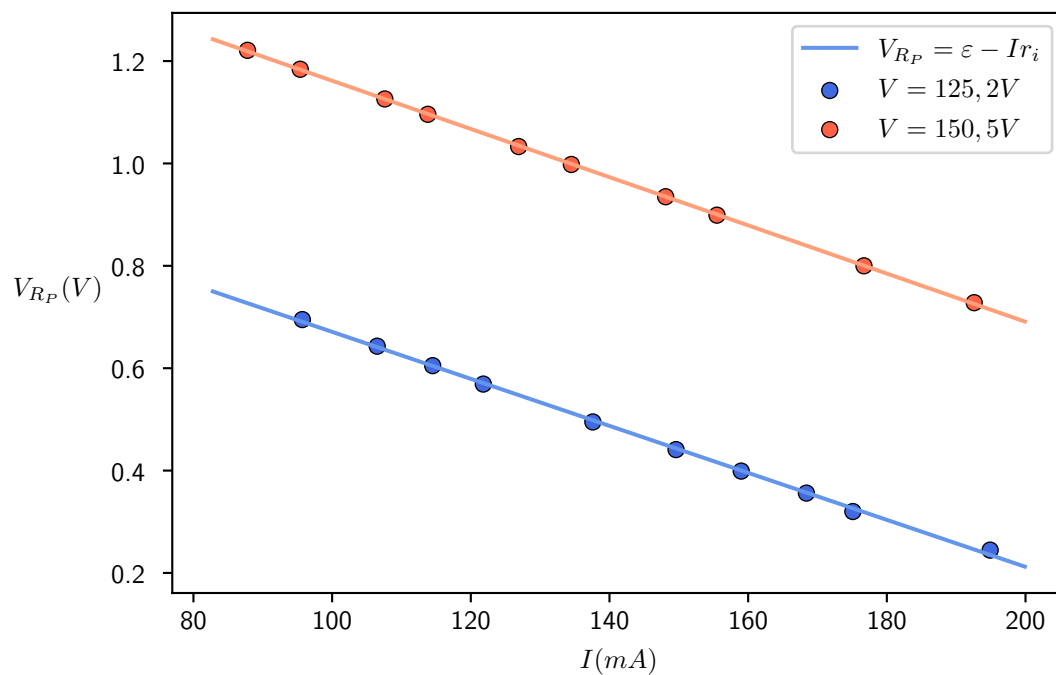


Figura 6:  $\Delta V_{RP}$  fronte a  $I$  con regresión lineal

	$\mathbf{r_i}$	$\varepsilon$	$R^2$
<b>V = 125, 2V</b>	$4,59116 \pm 1,1 \cdot 10^{-4}\Omega$	$1,130128 \pm 1,6 \cdot 10^{-5}V$	0,9995
<b>V = 150, 5V</b>	$4,709041 \pm 1,1 \cdot 10^{-5}\Omega$	$1,6324936 \pm 1,5 \cdot 10^{-6}V$	0,99996

Cadro 10: Valores do axuste lineal

Vendo os datos, ambos axustes son bastante precisos, un de 3 e outro de 4 noves. Procedamos agora a calcular os coeficientes de Seebeck, obxectivo final da práctica.

## 4. Coeficientes de Seebeck

Despexamos o coeficiente de Seebeck da ecuación (1) e substituímos  $\Delta T$  por  $T_2^\infty - \bar{T}_1$  (xa que a forza electromotriz foi calculada no estado estacionario). Utilizando os datos obtidos nos cadros 4, 5 e 10 podemos calcular:

$$S = \frac{\varepsilon}{T_2^\infty - \bar{T}_1} \quad s(S) = S \sqrt{\left(\frac{s(\varepsilon)}{\varepsilon}\right)^2 + \left(\frac{s(T_2^\infty)}{T_2^\infty - \bar{T}_1}\right)^2 + \left(\frac{s(\bar{T}_1)}{T_2^\infty - \bar{T}_1}\right)^2} \quad (12)$$

Necesitamos un único valor de  $\varepsilon$ , así que tomamos a media entre o modo aberto e pechado, e obtemos:

$V = 125, 2V$	$\varepsilon = 1,15106 \pm 0,00050V$
$V = 150, 5V$	$\varepsilon = 1,64675 \pm 0,00050V$

Cadro 11: Valores medios da forza electromotriz  $\varepsilon$

E finalmente temos os coeficientes de Seebeck:

$V = 125, 2V$	$S = 0,0538 \pm 0,0050V/K$
$V = 150, 5V$	$S = 0,04994 \pm 0,00017V/K$

Cadro 12: Coeficiente de Seebeck  $S$  do dispositivo termoelectrico

## Parte III

# Conclusións

Nesta práctica estudamos un dispositivo termoeléctrico que, ó ser sometido a unha diferenza de temperatura, produce unha corrente polo efecto Seebeck. Calculamos varios parámetros que describen este fenómeno:

$V = 125, 2V$	$V = 150, 5V$
$S = 0,0538 \pm 0,0050 \text{ V/K}$	$S = 0,04994 \pm 0,00017 \text{ V/K}$
$r_i = 4,59116 \pm 1,1 \cdot 10^{-4} \Omega$	$r_i = 4,709041 \pm 1,1 \cdot 10^{-5} \Omega$
$C = 1430 \pm 130 \text{ J/K}$	$C = 1207 \pm 17 \text{ J/K}$
$\lambda_T = 0,895 \pm 0,084 \text{ W/K}$	$\lambda_T = 0,8392 \pm 0,0033 \text{ W/K}$

Cadro 13: Medicións obxectivo da práctica

Antes de pasar ó análise dos datos, podemos facer varias críticas á xestión da práctica. En primeiro lugar, a práctica ten unha clara fonte de error, que é a anomalía presentada polo termómetro. Un salto de máis de  $3^\circ\text{C}$  sobrepasa todos os límites razoables de error, e o idóneo sería repetir a práctica dende o principio. Isto non era factible xa que habería que esperar a que o dispositivo se enfriase e xa levábamos unha hora de práctica, polo que a instrucción foi seguir con eses datos.

O guión indica co coeficiente de Seebeck  $S$  ten un valor aproximado de  $0,059\text{V/K}$ . Os nosos valores foron entre  $0,054$  e  $0,050$ , non tan preto como sería desexable. Tamén vemos que entre eles hai unha difernencia considerable, e que as incertidumbres obtidas por tratamento de erros foron ridículamente baixas, polo que está claro que nalgunha parte do proceso deberíamos de introducir unha horquilla de erro máis ampla.

A diferenza entre os valores obtidos e o teórico pode deberse a varios factores. Primeiramente, ós problemas ocasionados polo termómetro. Pode que o aumento da temperatura do foco frío, que non permanece constante, e que tomáramos a media e non o valor máis alto tamén influa, así como quizáis non atopar con precisión o valor estacionario. Por último, tamén sería posible que o dispositivo non tivera o valor tabulado do coeficiente de Seebeck.

Para o resto de valores non temos unha referencia sobre canto teñen que medir. Estes serán de utilidade na próxima práctica, a do efecto Peltier.