

Estudo de um Conversor Termoelétrico

Ana Sofia Camões de Sousa 96508 | Duarte Miguel de Aguiar Pinto e Morais Marques 96523

Isabel Maria Jaló Alexandre 96537 | Martim da Costa Graça Marques Ferreira 96554

IST | MEFT | Laboratório de Eletromagnetismo e Termodinâmica

Prof^o João Luís Maia Figueirinhas | Prof^a Maria Raquel Nunes Pereira Crespo

Grupo 5C | Ano letivo 2020/2021

15 de abril de 2021

Resumo

Neste trabalho, foi estudado o funcionamento do conversor termoelétrico baseado na célula de Peltier, a operar como máquina térmica e bomba de calor. No primeiro caso, foram determinadas a resistência térmica, do amperímetro e de carga ótima, assim como as potências e rendimentos associados, para três temperaturas da fonte quente, tendo-se obtido que os rendimentos reais não corrigidos η_1 foram, em média, cerca de 54% dos respetivos rendimentos corrigidos η_3 , os quais, em média, foram cerca de 11% dos rendimentos da máquina ideal, η_c . Para a bomba de calor, foram determinadas as potências e eficiências para um único ensaio, tendo-se obtido uma eficiência corrigida de $\epsilon_2 = 1.836 \pm 0.008$ (0.4%), cerca de 7% da eficiência da bomba térmica ideal.

1 Introdução [1]

Este trabalho experimental teve como objetivo o estudo de um conversor termoelétrico, realizado com base numa célula de Peltier, a funcionar como máquina térmica e como bomba de calor. Com os dados obtidos, calcularam-se diversas potências, o que permitiu estimar o rendimento/eficiência do conversor e suas variações com a temperatura.

Para entender o funcionamento da célula de Peltier utilizada é preciso ter em conta três efeitos termoelétricos reversíveis, os efeitos de Peltier, Seebeck e Thomson.

Se dois condutores (condutor 1 e condutor 2) estiverem ligados entre si e as junções estiverem a temperaturas diferentes, ΔT vai provocar o aparecimento de uma diferença de potencial, $\Delta\phi$ - efeito de Seebeck. Chama-se coeficiente de Seebeck, potência termoelétrica ou poder termoelétrico do par de condutores 1 e 2 a:

$$S_{21} = \frac{\Delta\phi}{\Delta T} \quad (1)$$

Por outro lado, o efeito de Peltier ocorre quando dois condutores (condutor 1 e condutor 2) ligados entre si têm a mesma temperatura nas duas junções e são sujeitos a uma corrente. Essa corrente, conforme o seu sentido, provoca a libertação de calor numa junção e a absorção de calor na outra, originando um fluxo de calor da junção que absorve calor para a que o liberta. Sendo $J = \frac{I}{A}$ a densidade de corrente e $J_Q = \frac{P}{A}$ a densidade de fluxo de potência térmica num dos condutores, chama-se coeficiente de Peltier a:

$$\pi = \frac{J_Q}{J} \quad (2)$$

Definindo $\pi_{21} = \pi_1 - \pi_2 = \frac{J_{Q1} - J_{Q2}}{J}$, a 2^a relação de Kelvin permite relacionar os coeficientes de Seebeck e de Peltier:

$$TS_{21} = \pi_{21} \quad (3)$$

Para o efeito de Thomson deve-se considerar uma barra homogênea condutora percorrida por uma corrente I e submetida a um gradiente de temperatura $\vec{\nabla}T$. Define-se o calor de Thomson como $\vec{J} \cdot (G\vec{\nabla}T)$, onde G é o coeficiente de Thomson. A 1^a relação de Kelvin relaciona os três efeitos apresentados:

$$\frac{d\pi_{21}}{dT} + G_2 - G_1 = S_{21} \quad (4)$$

Estes efeitos acontecem devido aos diferentes níveis de energia preenchidos da banda de condução para os dois condutores, o que provoca movimento de eletrões.

A célula de Peltier é constituída por diversos condutores ligados em série entre si por semicondutores do tipo P e N. O elevado número de condutores permite aumentar a diferença de potencial na célula. É importante referir que a condutividade dos semicondutores altera-se significativamente com a temperatura.

No conversor termoelétrico considerado, a célula de Peltier trabalha como uma pilha, tendo associada uma força eletromotriz ϵ e uma resistência interna R_i .

Para o funcionamento como máquina térmica, coloca-se a célula entre uma fonte quente, da qual absorve calor, e uma fonte fria, para a qual cede calor. Tendo em conta o efeito de Seebeck, esta diferença de temperaturas vai originar uma tensão, logo a célula vai produzir energia, trabalho elétrico W_e ,

a partir do calor fornecido pela fonte quente, Q_{fq} .

O rendimento desta máquina térmica será:

$$\eta = \frac{W_e}{Q_{fq}} = \frac{P_{we}}{P_{fq}} \quad (5)$$

A potência de perdas será $P_{perdas} = P_{fq} - P_{ff} - P_{we}$ (6).

Para realizar a bomba de calor utiliza-se o efeito de Peltier, fornecendo-se uma corrente à célula de Peltier de forma a retirar energia da fonte fria e ceder energia à fonte quente. A eficiência desta bomba de calor será o quociente do calor fornecido à fonte quente pelo trabalho elétrico cedido à célula de Peltier:

$$\epsilon = \frac{Q_{fq}}{W_e} = \frac{P_{fq}}{P_{we}} \quad (7)$$

Neste caso, a potência de perdas será $P_{perdas} = P_{ff} + P_{we} - P_{fq}$ (8).

Foi considerado que $c_{\text{água}} = 4186 \text{ JK}^{-1}\text{kg}^{-1}$ [2].

2 Montagem

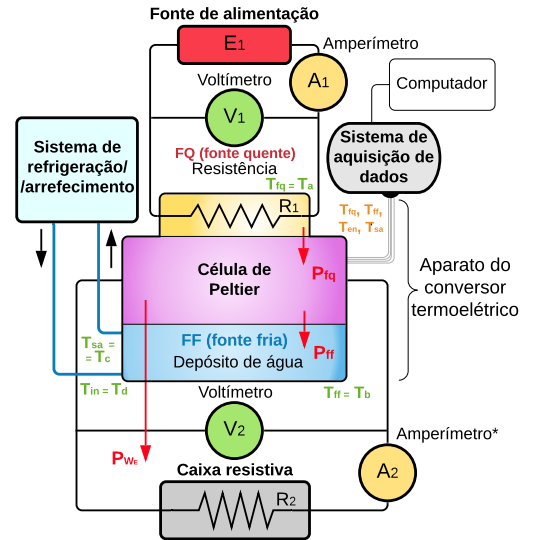


Figura 1: Diagrama de blocos da montagem para o estudo do conversor termoelétrico como máquina térmica

Para a realização deste trabalho experimental, utilizou-se a montagem presente na figura 1 para a máquina térmica e a montagem da figura 2 para a bomba de calor. As montagens são muito semelhantes. O elemento central é a célula de Peltier que está colocada entre uma resistência (fonte quente para a máquina térmica e fonte fria para a bomba de calor), integrada num circuito com fonte de alimentação, amperímetro e voltímetro, e um depósito de água ligado a um sistema de refrigeração (fonte quente para a bomba de calor e fonte fria para a máquina térmica). A célula de Peltier está inserida num circuito elétrico que contém uma caixa resistiva, um voltímetro, um amperímetro e, no caso da bomba de calor, uma fonte de alimentação. Existe ainda um sistema de aquisição de dados que fornece a um computador a informação das temperaturas da fonte quente, da fonte fria e à entrada e saída do depósito de água em tempo real.

No procedimento experimental realizado remotamente, o amperímetro indicado na Figura 1 com um asterisco não fazia

parte da montagem experimental.

3 Procedimento

Para estudar o sistema como uma máquina térmica, começou-se por verificar o funcionamento adequado do sistema de circulação de água. Ao longo da experiência, mediu-se por diversas vezes o caudal, de forma a avaliar se se mantinha constante.

Para determinar a resistência de carga ótima, R_2 , (igual a R_i se ϵ e R_i não dependerem da temperatura nem da corrente) começou-se por medir a tensão e a corrente no amperímetro A_2 , de forma a calcular a sua resistência utilizando a Lei de Ohm. De seguida, com V_1 aproximadamente 10V, colocou-se R_2 a 5 Ω e, após as temperaturas estabilizarem, registaram-se os dados de temperatura e de I_1 , V_1 , I_2 e V_2 . Alterou-se R_2 para 2 Ω e realizou-se o mesmo procedimento. Tem-se, então (onde os subscritos 2 e 5 simbolizam o valor considerado para R2):

$$R2_{opt} = \frac{R2_5 \cdot I2_5 - R2_2 \cdot I2_2}{I2_2 - I2_5} - 2 \cdot R_{amp} \quad (9)$$

Para calcular as potências e rendimentos já referidos, colocouse R_2 próximo do valor determinado para a resistência ótima. Remotamente, escolheu-se uma tensão para V_1 entre 2 e 5 V e registaram-se os parâmetros do aparato até este atingir o equilíbrio. Repetiu-se este procedimento para uma voltagem inserida entre 5 e 7.5V e entre 7.5 e 12V.

Para determinar a potência de condução e da resistência térmica entre a fonte quente e a fonte fria, abriu-se o circuito de R_2 . Foram registradas todas as grandezas envolvidas para duas diferenças de potencial, de modo a determinar a relação entre a potência dissipada (P_3) e a diferença de temperaturas entre as fontes quente e fria, traduzida por:

$$R_t = \frac{T_a - T_b}{P_3} \quad (10)$$

Para estudar o conversor como uma bomba de calor, utilizou-se $R_2 = 10\text{ V}$. Após registrar o caudal, ajustou-se E_1 de forma a ter $I_2 = 0.5\text{ A}$. Observou-se que a temperatura da resistência R_1 , T_{ff} , começou a descer. Aplicou-se de seguida uma tensão em R_1 de modo a que T_{ff} ficasse constante a cerca de 20°C . Após ser atingido o regime estacionário, registaram-se os valores de temperatura, corrente e tensão. Este procedimento foi repetido com E_1 ajustado de forma a ter $I_2 = 0.3\text{ A}$.

4 Dados recolhidos

	Ensaio 1	Ensaio 2
$R_2(\Omega)$	5.0 ± 0.1	2.0 ± 0.1
$V_1(V)$	9.33 ± 0.01	9.77 ± 0.01
$I_1(A)$	0.460 ± 0.001	0.482 ± 0.001
$V_2(V)$	0.289 ± 0.001	0.262 ± 0.001
$I_2(mA)$	52.8 ± 0.1	66.9 ± 0.1
$V_{amp}(mV)$	13.2 ± 0.1	16.7 ± 0.1
$\frac{dm}{dt}(g/s)$	1.321 ± 0.020	1.321 ± 0.020

Tabela 1: Dados recolhidos a fim da determinação da resistência do amperímetro e da resistência ótima

	Ensaio 1	Ensaio 2
$V_1(V)$	6.72 ± 0.01	14.62 ± 0.01
$I_1(A)$	0.330 ± 0.001	0.720 ± 0.001
$\frac{dm}{dt}(g/s)$	0.80 ± 0.01	0.80 ± 0.01
$T_{fq} = T_a(C)$	31.731 ± 0.010	67.225 ± 0.010
$T_{ff} = T_b(C)$	24.293 ± 0.010	34.568 ± 0.010
$T_{sa} = T_c(C)$	21.435 ± 0.010	22.302 ± 0.010
$T_{en} = T_d(C)$	21.248 ± 0.010	21.116 ± 0.010

Tabela 2: Dados recolhidos a fim da determinação da potência de condução e da resistência térmica

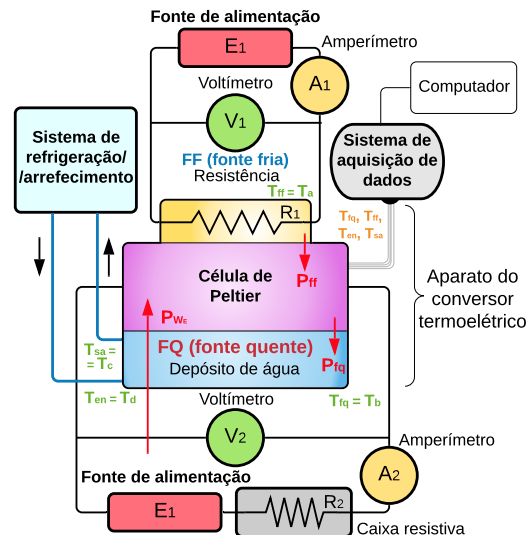


Figura 2: Diagrama de blocos da montagem para o estudo do conversor termoeletrico como bomba de calor

	Ensaio 1	Ensaio 2
$V_1(V)$	4.62 ± 0.01	1.76 ± 0.01
$I_1(A)$	0.226 ± 0.001	0.085 ± 0.001
$V_2(V)$	2.458 ± 0.001	1.540 ± 0.001
$I_2(A)$	0.508 ± 0.001	0.307 ± 0.001
$\frac{dm}{dt} (g/s)$	0.80 ± 0.01	0.80 ± 0.01
$T_{ff} = T_a(C)$	12.921 ± 0.010	15.312 ± 0.010
$T_{fq} = T_b(C)$	24.615 ± 0.010	22.171 ± 0.010
$T_{sa} = T_c(C)$	21.786 ± 0.010	21.447 ± 0.010
$T_{en} = T_d(C)$	21.343 ± 0.010	21.412 ± 0.010

Tabela 3: Dados recolhidos referentes à bomba de calor

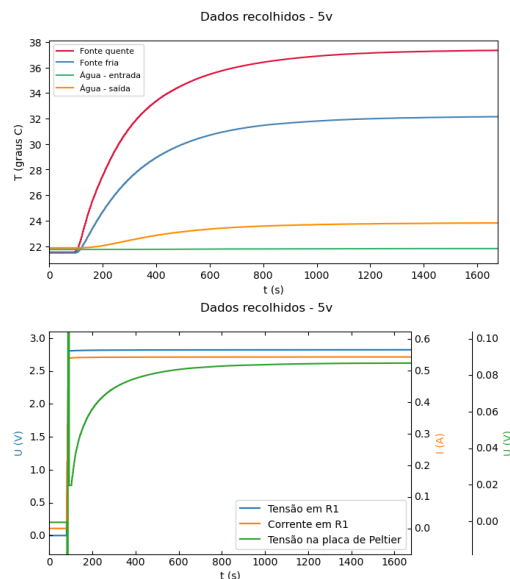


Figura 3: Máquina térmica: dados recolhidos com a seleção de 5 V^1

5 Análise dos dados

Aos dados apresentados das temperaturas foram ainda "descontadas" as discrepâncias destas quando no regime estacionário (considerando como temperatura real a média das quatro temperaturas), antes do decorrer das experiências realizadas, sendo propagadas as incertezas adequadamente.

¹Devido a uma flutuação dos dados, alguns encontram-se omitidos deste gráfico. Não foram considerados relevantes para a evolução do sistema, dado tratar-se claramente de um pico momentâneo.

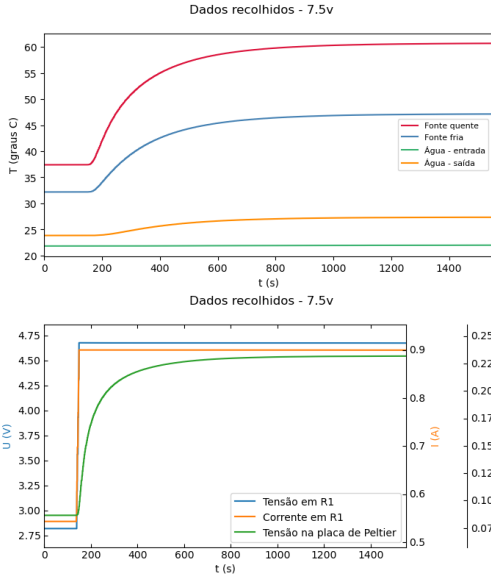


Figura 4: Máquina térmica: dados recolhidos com a seleção de 7.5 V

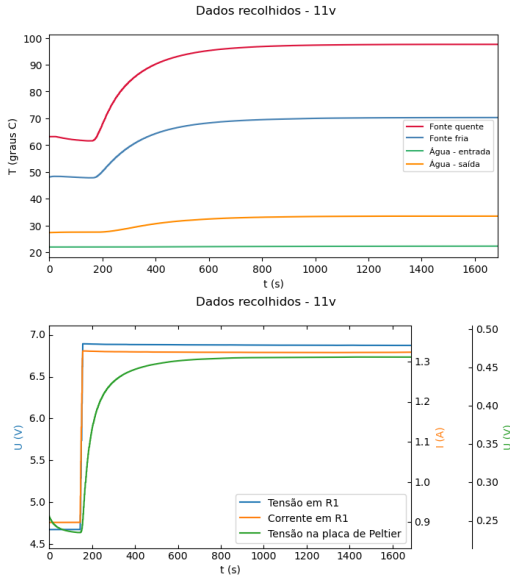


Figura 5: Máquina térmica: dados recolhidos com a seleção de 11 V

Nos dados referentes à máquina térmica (os quais figuram em 3, 4 e 5), foram consideradas como incertezas os desvios padrão das medidas ao longo de 50 pontos. No caso dos dados de 8, tratam-se dos pontos finais, enquanto que para determinação das temperaturas de equilíbrio, foram considerados os 50 pontos iniciais do ensaio 3.

T_a (C)	19.617 ± 0.010
T_b (C)	19.480 ± 0.010
T_c (C)	19.672 ± 0.010
T_d (C)	19.524 ± 0.010

Tabela 4: Temperaturas de referência - bomba de calor, potência de condução e resistência térmica

T_{fq} (C)	21.5260 ± 0.0008
T_{ff} (C)	21.4657 ± 0.0007
T_{en} (C)	21.740 ± 0.002
T_{sa} (C)	21.8645 ± 0.0006

Tabela 5: Temperaturas de referência - máquina térmica, dados recolhidos remotamente

De modo a não sobre-estimar incertezas, foram ainda arredondadas apenas para efeitos de apresentação, sendo considerado o seu valor não truncado durante todos os cálculos intermédios.

5.1 Determinação das resistências ótima, do amperímetro e térmica

$R_a(\Omega)$	0.250 ± 0.003	0.250 ± 0.002
$R_a(\Omega)$	0.250 ± 0.003	
$R_{opt}(\Omega)$	9 ± 2	

Tabela 6: Resistência ótima e resistência do amperímetro determinadas

Considerou-se que a resistência térmica, R_t , varia linearmente com a diferença de temperatura entre as fontes quente e fria, ou seja, foi realizada uma interpolação linear entre os dois pontos determinados. Esta foi utilizada para a determinação dos P_3 (potência de perdas por condução) em 8.

	Ensaio 1	Ensaio 2
$T_{fq} = T_a(C)$	31.69 ± 0.02	67.18 ± 0.02
$T_{ff} = T_b(C)$	24.39 ± 0.02	34.66 ± 0.02
$T_{sa} = T_c(C)$	21.34 ± 0.02	22.20 ± 0.02
$T_{en} = T_d(C)$	21.30 ± 0.02	21.17 ± 0.02
$P_{fq}(W)$	2.22 ± 0.02	10.53 ± 0.03
$P_{ff}(W)$	0.13060 ± 0.00004	3.47605 ± 0.00005
$R_t(\Omega)$	55.9 ± 0.4	9.36 ± 0.02
$R_t(\Omega)$	$(-1.85 \pm 0.02) \cdot (T_a - T_b) + (69.4 \pm 0.5)$	

Tabela 7: Resultados da determinação da potência de condução e da resistência térmica

5.2 Máquina térmica

	Ensaio 1	Ensaio 2	Ensaio 3
$\Delta m(g)$	0.056 ± 0.001		
$\Delta t(s)$	0.458 ± 0.004		
$T_{fq}(C)$	37.333 ± 0.003	60.672 ± 0.004	97.595 ± 0.002
$T_{ff}(C)$	32.136 ± 0.003	47.124 ± 0.002	70.294 ± 0.003
$T_{en}(C)$	21.812 ± 0.002	21.976 ± 0.003	22.315 ± 0.003
$T_{sa}(C)$	23.8173 ± 0.0007	27.3276 ± 0.0008	33.505 ± 0.003
$T_{fqcorr}(C)$	37.456 ± 0.004	60.672 ± 0.004	97.595 ± 0.002
$T_{ffcorr}(C)$	32.320 ± 0.004	47.124 ± 0.002	70.294 ± 0.003
$T_{encorr}(C)$	21.721 ± 0.003	21.976 ± 0.003	22.315 ± 0.003
$T_{sacorr}(C)$	23.602 ± 0.002	27.3276 ± 0.0008	33.505 ± 0.003
$V_1(V)$	2.82225 ± 0.00003	4.67417 ± 0.00005	6.8750 ± 0.0003
$I_1(A)$	0.54308 ± 0.00002	0.89966 ± 0.00002	1.32365 ± 0.00005
$V_P(V)$	0.086612 ± 0.000007	0.23169 ± 0.00001	0.46377 ± 0.00003
$P_{fq}(mW)$	1532.70 ± 0.07	4205.2 ± 0.1	9100.2 ± 0.6
$P_{ff}(mW)$	960 ± 30	2730 ± 80	5700 ± 200
$P_{We}(mW)$	1.4101 ± 0.0003	10.0904 ± 0.0009	40.429 ± 0.005
$P_P(mW)$	570 ± 30	1460 ± 80	3300 ± 200
$P_3(mW)$	86 ± 1	195 ± 2	381 ± 5
$\eta_1 \cdot 10^{-3}$	0.9200 ± 0.0002	2.3995 ± 0.0003	4.4427 ± 0.0008
$\eta_2 \cdot 10^{-3}$	1 ± 30	4 ± 10	7 ± 5
$\eta_3 \cdot 10^{-3}$	2 ± 37	4 ± 12	8 ± 6
$\eta_4 \cdot 10^{-3}$	16.54 ± 0.03	40.58 ± 0.02	73.64 ± 0.01

Tabela 8: Máquina térmica: dados considerados, potências e rendimentos calculados

Na tabela 8, η_1 é calculado pela expressão 5, em η_2 descontam-se as perdas na fonte quente, em η_3 descontam-se ainda as perdas por condução e η_4 é o rendimento da máquina de Carnot equivalente. O "caudal" Δt considerado é a média dos 6 valores recolhidos no decorrer da experiência, no início e no fim de cada ensaio.

5.3 Bomba de calor

Para cada corrente I_2 , determinaram-se as taxas de transferência de energia $P_{ff} = V_1 I_1$, a potência de refrigeração ou de arrefecimento (potência fornecida pela fonte de alimentação E_1), $P_{fq} = c_{\text{água}} \frac{\Delta m}{\Delta t} \Delta T$, a potência cedida à fonte quente (depósito de água), e $P_{We} = V_2 I_2$, a potência elétrica fornecida ao conversor termoeletrónico para retirar calor da fonte fria e o fornecer à fonte quente. Recorrendo a estes valores, determinaram-se ainda

a potência total de perdas, dada por $P_p = P_{ff} + P_{We} - P_{fq}$, e as eficiências $\epsilon_1 = \frac{P_{fq}}{P_{We}}$ (eficiência real da bomba de calor), $\epsilon_2 = \frac{P_{fq} + P_p}{P_{We}} = \frac{P_{ff}}{P_{We}} + 1$ (eficiência corrigida descontando as perdas totais) e $\epsilon_c = \frac{T_{fq}}{T_{fq} - T_{ff}}$ (eficiência da bomba térmica reversível a operar entre as mesmas temperaturas), sendo de esperar que $\epsilon_1 \leq \epsilon_2 < \epsilon_c$.

	Ensaio 1	Ensaio 2
$T_{ff} = T_a(C)$	12.88 ± 0.02	15.27 ± 0.02
$T_{fq} = T_b(C)$	24.71 ± 0.02	22.26 ± 0.02
$T_{sa} = T_c(C)$	21.69 ± 0.02	21.35 ± 0.02
$T_{en} = T_d(C)$	21.39 ± 0.02	21.46 ± 0.02
$P_{ff}(W)$	1.044 ± 0.007	0.150 ± 0.003
$P_{fq}(W)$	1.0 ± 0.2	-
$P_{we}(W)$	1.249 ± 0.003	0.473 ± 0.002
$P_p(W)$	1.3 ± 0.2	-
ϵ_1	0.8 ± 0.2	-
ϵ_2	1.836 ± 0.008	-
ϵ_c	25.18 ± 0.09	42.2 ± 0.3

Tabela 9: Bomba de calor: potências e eficiências calculados

Constata-se, pela tabela 9, que o segundo ensaio não foi corretamente realizado: a temperatura da água à saída é inferior à de entrada. Por este motivo, não foram calculadas grandezas dependentes de T_c e de T_d , dado não serem representativas da realidade.

6 Determinação do Coeficiente de Seebeck

Com os dados obtidos de diferença de potencial entre os terminais da célula para diferentes temperaturas nas fontes, podemos determinar o coeficiente de Seebeck através da expressão 1, lembrando-nos que o valor obtido é o coeficiente de Seebeck do par de condutores usados a multiplicar pelo número de junções PN por que é composta a placa. Como este último valor nos é desconhecido, iremos determinar apenas o produto do coeficiente de Seebeck pelo número de junções da célula.

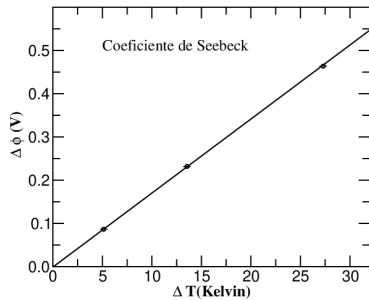


Figura 6: Ajuste para coeficiente de Seebeck

Obtivemos então $n \cdot S_{21} = (1.7126 \pm 0.0001) \cdot 10^{-2} (V/K)$. O ajuste é pouco significativo tendo em conta o reduzido número de pontos experimentais e apresenta ainda um erro sistemático (uma ordenada na origem) da ordem dos $10^{-3} V$.

7 Discussão dos resultados

7.1 Máquina térmica

Quanto ao estudo da máquina térmica, os resultados obtidos apresentam valores dentro do previsto e com incertezas, no geral, relativamente baixas.

Os rendimentos calculados apresentam a relação esperada ($\eta_1 \leq \eta_2 \leq \eta_3 < \eta_4$), verificando-se que a potência de trabalho elétrico obtido na resistência 2 é muito menor do que a potência fornecida à resistência 1 ou do que a dissipada para a água. O quociente entre os valores de η_1 e η_4 (rendimento de Carnot) é consistentemente da ordem dos 5% – 6%, verificando-se aumentos muito ligeiros à medida que se aumenta a tensão fornecida à

fonte quente. Esta diferença será devida a perdas de calor para o ambiente e durante o processo de condução, mas não apenas a estas, já que os valores de η_2 e η_3 são ainda muito inferiores ao de η_4 . Na prática o que se verifica é que há muita energia dissipada para a água, sendo que a melhor forma de diminuir este efeito seria certamente utilizar uma célula com maior coeficiente de Seebeck, nomeadamente utilizando semicondutores mais dopados.

7.2 Bomba de calor

Em primeiro lugar, como seria de esperar, verifica-se que P_{ff} é inferior no ensaio 2. Embora possivelmente não se tenha atingido o regime estacionário neste caso, esta diferença é bastante considerável, pelo que a relação entre os valores P_{ff} provavelmente se manteria. Uma vez que a corrente I_2 é superior no ensaio 1, sendo maior a potência elétrica P_{We} fornecida pela fonte quente, é necessária uma maior potência na fonte fria para a colocar à temperatura ambiente (cerca de $20^\circ C$).

O segundo ensaio foi realizado, muito provavelmente, ainda no regime transitório. Deste modo, não é possível comparar grande parte dos resultados obtidos no primeiro ensaio com as potências e eficiências do segundo ensaio que envolvessem utilizar os valores T_{en} e T_{sa} .

Para o ensaio 1, verifica-se que ϵ_1 corresponde a cerca de 43.6% do valor ϵ_2 . Isto indica que existe uma quantidade apreciável de trocas de calor que não são tidas em conta. Tal dever-se-á a trocas de calor do meio ambiente com a fonte fria, devido a diferenças de temperatura entre os dois. Este efeito, porém, seria difícil de mitigar, visto que a resistência R_1 está integrada no aparato do conversor termoeletrico. Outro aspeto a apontar é que, no caso do estudo do conversor termoeletrico como bomba de calor, a condução entre as duas fontes, considerada para a máquina térmica, não foi tida em conta, podendo também aí haver trocas de calor não contabilizadas.

É aparente a discrepância entre a eficiência da bomba ideal e ϵ_2 , o qual corresponde a cerca de 7.3% de ϵ_c . Sendo a discrepância face a ϵ_c bastante elevada, conclui-se que os processos envolvidos nesta bomba de calor desviar-se-ão bastante dos de um ciclo de Carnot, ou seja, não se tratará de um ciclo com processos isotérmicos e adiabáticos.

8 Conclusão e crítica

O trabalho realizado cumpriu os objetivos delineados e as conclusões, nomeadamente no que toca às relações entre rendimentos e eficiências, são, essencialmente, as esperadas.

O maior percalço a referir é o facto de apenas se poder ter analisado na íntegra um dos ensaios na parte do estudo da placa como bomba de calor, já que se verificou que a temperatura da água à saída da placa registada era inferior à temperatura à entrada, algo que não deveria suceder e que impossibilitou qualquer cálculo com significado físico que envolvesse essa variação de temperatura.

De resto, as eficiências e rendimentos calculados mostram que existem perdas de calor para o ambiente tanto nas fontes como durante o processo de condução, como seria de esperar, mas que mesmo quando estas são tidas em conta a placa continua muito aquém do rendimento/eficiência de uma máquina/bomba de calor reversível ideal. O sistema seria melhor se as junções tivessem maior coeficiente de Seebeck, se houvesse mais junções ou (talvez mais praticável) se se isolasse melhor termicamente a célula e as fontes. Poder-se-ia pensar que, no caso particular da máquina térmica, utilizar uma tensão mais baixa nos terminais da resistência, diminuindo a sua temperatura e a energia perdida para o meio, aumentaria o rendimento da máquina, mas verificou-se o contrário.

A resistência ótima encontra-se acima do esperado, o que sugere que a força eletromotriz e a resistência interna da célula de Peltier depende da temperatura.

Finalmente, para a determinação do coeficiente de Seebeck, teria sido mais interessante determinar o número de junções PN que compõem a célula e registar um maior número de pontos (ΔT ; $\Delta \phi$).

Referências

- [1] *Guia Experimental e Apresentações (página da cadeira).*
- [2] *Specific Heat.* URL: <http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbase/thermo/spht.html>.