

Conversor Termoelétrico

Gonçalo Quinta n° 65680, Fernando Rodrigues n°66326, Teresa Jorge n°65722 e Vera Patrício n°65726

*Laboratório de Complementos de Electromagnetismo e Termodinâmica
Mestrado Integrado em Engenharia Física Tecnológica 2009/2010
Instituto Superior Técnico (IST)*

(Dated: 27 de Março de 2010)

Foi estudado o funcionamento de um conversor termoelectrico baseado na célula de Peltier em dois regimes. No primeiro, em que a tensão gerada pela célula é aplicada a uma resistência, foi determinado que uma resistência de $4,13 \pm 0,97 \Omega$ maximiza essa conversão. De entre os valores obtidos, o rendimento máximo obtido nesse processo foi de $0,90 \pm 0,02\%$. O rendimento corrigido, para 16 V, tendo em conta as perdas termoelectricas do sistema, foi de 7,60%. A resistência térmica do sistema obtida foi de $3,89 \pm 0,36 \text{ K/W}$. A mesma célula, funcionando como bomba de calor, tem uma potência de arrefecimento máxima de $2,842 \pm 0,081 \text{ W}$ e uma eficiência máxima de $3,75 \pm 0,08$, dentro da gama de resultados obtidos.

I. INTRODUÇÃO

A célula de Peltier é um aparelho que funciona com base em efeitos termoelétricos, cujo propósito consiste em converter directamente de temperatura nas extremidades da célula em voltagem eléctrica e vice-versa. Numa escala atómica, a aplicação de um gradiente de temperatura nas extremidades de um condutor origina uma diferença de energias cinéticas das partículas entre as duas extremidades, nomeadamente das cargas eléctricas. Ligando esse condutor a um circuito, irá originar-se um fluxo de cargas da extremidade mais quente para a mais fria, criando uma pequena voltagem - efeito de Seebeck.[1] Inversamente, ao aplicar-se uma diferença de potencial nas extremidades, irá haver uma maior discrepância nas barreiras de potencial nas junções dos condutores, correspondendo a uma maior e menor densidade de energias cinéticas das partículas nas extremidades, ou seja, numa diferença de temperaturas - efeito de Peltier.[2] É de notar que estes efeitos ocorrem única e exclusivamente na presença de 2 condutores diferentes, já que é na junção dos dois que existe uma quebra do fluxo de calor, ocorrendo pontos de aquecimento (onde se liberta calor) e de arrefecimento (onde entra calor).

Estes dois fenómenos não são independentes, já que qualquer um deles dá origem ao outro, mas cada par de materiais (A e B) tem um coeficiente específico para cada efeito. Um dos coeficientes denomina-se coeficiente de Peltier, e relaciona a densidade de energia J_W com a densidade de corrente J_c numa junção

$$\Pi_{AB} \equiv \frac{J_W}{J_c} \quad (1)$$

O restante coeficiente, o de Seebeck, serve como uma medida de diferença de potencial $\Delta\phi$ originada devido a uma determinada diferença de temperaturas ΔT

$$S_{AB} \equiv \frac{\Delta\phi_{AB}}{\Delta T} \quad (2)$$

estando relacionado com o coeficiente de Peltier pela 2ª relação de Kelvin

$$\Pi_{AB} = TS_{AB} \quad (3)$$

onde T é a média das temperaturas absolutas nas junções.

Existe ainda um terceiro fenómeno termoelétrico relacionado com os anteriores, mas que não será abordado na experiência. Esse é o efeito de Thomson que diz que qualquer corpo que conduza corrente eléctrica, quando o faz, emite ou absorve calor, estando relacionado com os restantes fenómenos pela 1ª relação de Kelvin

$$\frac{d\Pi_{AB}}{dT} + \tau_A - \tau_B = S_{AB} \quad (4)$$

onde τ representa o coeficiente de Thomson do metal, sendo este o único em que se pode medir individualmente a partir do material, ao contrário dos 2 restantes.[3]

Os metais foram os primeiros materiais onde o efeito de Peltier foi verificado, seguidos dos semicondutores com elementos PN que conduzem a corrente eléctrica por electrões e lacunas, sendo este o caso célula de Peltier a usar no trabalho. Dependendo do sentido da corrente usado, a célula de Peltier pode bombear calor da fonte fria para a fonte quente ou da fonte quente para a fonte fria. Estas células são utilizadas para o arrefecimento de sistemas, pelo que estarão optimizadas para fazer uso do primeiro processo.[4]

Neste trabalho a célula de Peltier será usada como motor (a produzir trabalho eléctrico numa resistência) e como bomba de calor (a arrefecer a extremidade mais fria), razão pela qual será calculada, entre outras quantidades, o rendimento η e eficiência ϵ dos mesmos, sendo estes dados respectivamente por

$$\eta = \frac{P_R}{P_E}, \quad \epsilon = \frac{P_Q}{P_W} \quad (5)$$

P_R - Potência utilizada para produzir trabalho útil na resistência (W)

P_E - Potência transferida para a célula pela fonte quente (W)

P_Q - Potência transferida para a fonte quente (W)

P_W - Potência transferida para a célula (W)

onde o rendimento será sujeito a um tratamento mais rigoroso, com certas correcções posteriores.

II. EXPERIÊNCIA REALIZADA

A. Estudo do efeito de Seebeck:

O sistema em causa está esquematizado na figura 1.

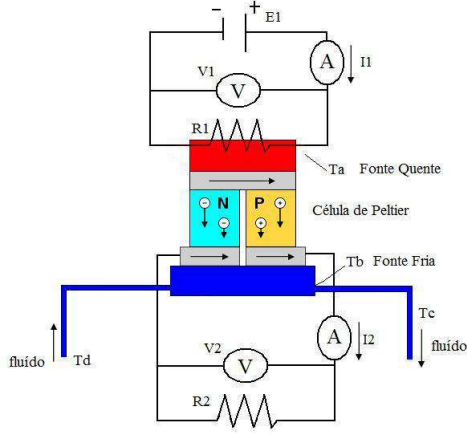


Figura 1. Esquema da montagem

1. Determinação da resistência de carga óptima

Para se determinar o valor de resistência para o qual a potência fornecida ao circuito é a maior possível, são estudados os valores de corrente gerados pela célula no equilíbrio térmico com duas resistências $R2$ diferentes, neste caso de 5 e 2 Ω . Recorrendo ao teorema de Thévenin é assim possível obter a resistência óptima, dada pela expressão

$$R_{2o} = \frac{5I_{25} - 2I_{22}}{I_{22} - I_{25}} - 2R_a \quad (6)$$

I_{22} - Corrente do circuito utilizando $R2 = 2 \Omega$ (A)

I_{25} - Corrente do circuito utilizando $R2 = 5 \Omega$ (A)

R_a - Resistência interna do amperímetro (Ω)

2. Determinação do rendimento da célula e sua variação com a temperatura da fonte quente

Usando o valor da resistência óptima obtida anteriormente, vão ser aplicadas várias tensões na fonte E1 e medidas as respostas do sistema - T_a , T_b , T_c , T_d , I_1 , V_1 , V_2 de acordo com a fig1 - após ter sido atingido o estado de equilíbrio, para cada tensão. A partir destes valores é possível calcular a potência fornecida (P_1), potência gerada pela célula de Peltier (P_2) e potência dissipada para a fonte fria (P_3):

$$P_1 = V_1 I_1 \quad (7)$$

$$P_2 = \frac{V_2^2}{R_2} \quad (8)$$

$$P_3 = \frac{\Delta m}{\Delta t} (T_c - T_d) 4.18c \quad (9)$$

c - capacidade calorífica da água ($\text{cal g}^{-1} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$)

onde P_3 é calculada com recurso ao caudal $\frac{\Delta m}{\Delta t}$ medido anteriormente.

É assim possível calcular o rendimento da célula utilizando a fórmula mencionada na introdução, que, utilizando a notação do esquema, toma agora a forma

$$\eta = \frac{P_2}{P_1} \quad (10)$$

3. Determinação da potência transmitida à fonte fria por condução e da resistência térmica

Interrompendo a corrente I_2 , existe apenas transferência de energia por condução, da fonte quente para a fonte fria, efeito esse que também se encontra presente durante o funcionamento da célula de Peltier. Nessas condições, regula-se a fonte E1 de modo a fornecer 16 V de tensão, deixando o sistema estabilizar. Attingido o equilíbrio térmico, registam-se os valores de todas as grandezas envolvidas, para uma posterior determinação da potência transferida por condução para a fonte fria - P_{FF} - dada pela fórmula (9).

Essa potência será utilizada para corrigir o rendimento obtido para a célula de Peltier trabalhando nas mesmas condições, em que é fornecida uma tensão de 16 V, corrigindo essa que, observando as trocas de energia presentes, altera o rendimento para

$$\eta' = \frac{P_2}{P_2 + P_3 - P_{FF}} \quad (11)$$

Outro resultado útil que se pode obter com P_{FF} é chamado de resistência térmica, que se trata de uma medida da dissipação de energia entre as duas faces da célula, sendo a sua expressão

$$R_t = \frac{T_A - T_B}{P_3} \quad (12)$$

Para averiguar a eficácia da célula, compara-se os rendimentos obtidos pelos respectivos rendimentos de motores reversíveis operando às mesmas temperaturas. Estes últimos são calculados utilizando

$$\eta_{rev} = 1 - \frac{T_b}{T_a} \quad (13)$$

B. Estudo do efeito de Peltier: Bomba de calor

A figura 2 esquematiza o circuito usado.

1. Determinação da eficiência da bomba de calor e da potência de arrefecimento

Substituindo R_2 no circuito por uma fonte de tensão E2 em série com uma resistência de 10 Ω , faz-se variar

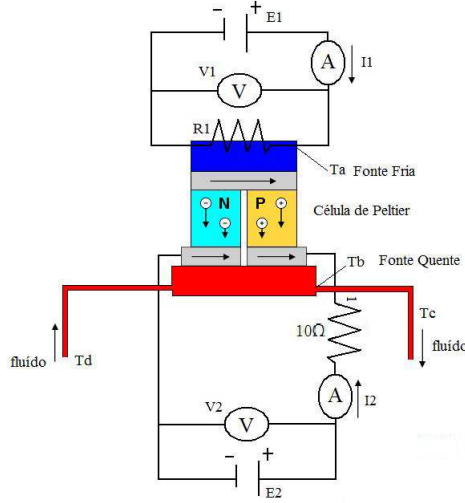


Figura 2. Esquema da montagem - Bomba de calor

a fonte de tensão $E1$ de modo a alterar a potência transferida à fonte fria (P1). O sistema atinge assim equilíbrio térmico a diferentes temperaturas, transferindo uma potência $P3$ para a fonte quente, sendo registadas todas as grandezas envolvidas. Com os dados obtidos, é possível calcular a eficiência ϵ - razão entre a potência transferida para a fonte quente e a potência dada à bomba de calor - referida em (5), cuja expressão fica

$$\epsilon = \frac{P3}{V2I2} \quad (14)$$

Finalmente, calcula-se a potência de arrefecimento, que corresponde simplesmente à potência fornecida à fonte fria - P1. Novamente, para uma avaliação da utilidade da célula de Peltier como bomba de calor, serão comparadas as eficiências obtidas com as calculadas para uma máquina reversível operando nas mesmas condições, sendo estas últimas calculadas a partir de

$$\epsilon_{rev} = \frac{1}{1 - \frac{T_a}{T_b}} \quad (15)$$

III. RESULTADOS

Para todas as medições que se seguem, o erro de leitura considerado de $I2$ foi de 0,2 mA, de $I1$ foi 0,01 A. Para $V2$ o erro de leitura corresponde a 0,02 mV e 0,01 V para $V1$. Quanto à temperatura e resistência, foram considerados erros de 0,1 °C e 5%, respectivamente.

Tabela I. Dados para a determinação da resistência óptima

R2 (Ω)	$e_{R2}(\Omega)$	I2 (mA)	$e_{I2}(\text{mA})$	V_a ^a (mV)	$e_{V_a}(\text{mV})$
5	0,25	55,2	0,2	27,2	0,1
2	0,10	79,5	0,2	18,9	0,1

^a Tensão do amperímetro para o cálculo da sua resistência interna

Tabela II. Dados das correntes e tensões estabilizadas dada a voltagem $V1$

	$V1$ (V)	$I1$ (A)	$V2$ (V)	$I2$ (A)
A	7,05	0,34	0,157	0,031
B	10,06	0,48	0,306	0,061
C	13,05	0,63	0,466	0,108
D	16,01	0,77	0,665	0,154

Tabela III. Dados das temperaturas estabilizados dada a voltagem $V1$

	$V1$ (V)	$Ta(^{\circ}\text{C})$	$Tb(^{\circ}\text{C})$	$Tc(^{\circ}\text{C})$	$Td(^{\circ}\text{C})$
A	7,05	30,84	23,85	19,667	19,41
B	10,06	41,99	28,05	20,19	19,56
C	13,05	57,16	34,20	21,285	20,18
D	16,01	74,69	40,44	22,068	20,46

Tabela IV. Dados para a medição do caudal

m (g)	$e_m(\text{g})$	$t(\text{s})$	$e_t(\text{s})$
100	1	62	0,5

Tabela V. Dados das temperaturas estabilizadas sem efeito de Peltier

$Ta(^{\circ}\text{C})$	$Tb(^{\circ}\text{C})$	$Tc(^{\circ}\text{C})$	$Td(^{\circ}\text{C})$
38,00	74,938	22,33	20,92

Tabela VI. Dados das tensões e correntes estabilizados dada a voltagem $V2$ funcionamento como bomba de calor

	$V2$ (V)	$I2$ (A)	$V1$ (V)	$I1$ (A)
E	2,344	0,499	6,44	0,31
F	1,458	0,300	3,72	0,18
G	2,320	0,505	7,68	0,37

Tabela VII. Dados das temperaturas estabilizados fornecida a voltagem $V2$, funcionamento como bomba de calor

	$V2$ (V)	$Ta(^{\circ}\text{C})$	$Tb(^{\circ}\text{C})$	$Tc(^{\circ}\text{C})$	$Td(^{\circ}\text{C})$
E	2,344	17,11	27,48	21,71	21,28
F	1,458	15,81	23,88	21,53	21,39
G	2,320 ^a	20,90	29,28	22,36	21,70

^a com temperaturas de equilíbrio perto da temperatura ambiente

IV. ANÁLISE DOS RESULTADOS

Usando os dados da Tabela I e a equação (6) foi obtida uma resistência óptima de $4,13 \pm 0,97 \Omega$. A resistência interna do amperímetro determinada e usada no cálculo anterior foi de $0,342 \pm 0,002 \Omega$, obtida aplicando da Lei de Ohm aos valores de $I2$ e V_a da tabela mencionada.

O caudal obtido no início do trabalho foi $1,61 \pm 0,03$ g/s, tendo sido considerado constante até ao final da experiência.

A partir dos dados das Tabelas I e II e das equações

(7),(8) e (9) calcularam-se as potências que se encontram na tabela VIII.

Tabela VIII. Determinação das potências

	$P1$ (W)	e_{P1} (W)	$P2$ (W)	e_{P2} (W)	$P3$ (W)	e_{P3} (W)
A	2,40	0,07	0,0061	0,0003	1,75	0,71
B	4,83	0,11	0,0234	0,0012	4,22	0,75
C	8,22	0,14	0,0543	0,0027	7,43	0,81
D	12,33	0,17	0,1106	0,0055	10,85	0,87

Com as potências determinadas calcularam-se os rendimentos η para cada temperatura T_a da fonte quente, estando registados na tabela IX.

Tabela IX. Determinação do rendimento com a temperatura da fonte quente, e rendimento de Carnot

	T_a (°C)	η (%)	e_η (%)	η_{Carnot} (%)
A	30,8	0,26	0,02	2,3
B	42,0	0,49	0,03	4,4
C	57,2	0,66	0,04	7,0
D	74,7	0,90	0,06	9,8

Relativamente à potência transmitida por condução e resistência térmica, usando os valores da Tabela V e as expressões (9) e (12) obtiveram-se os valores $9,51 \pm 0,85$ W e $3,89 \pm 0,36$ K/W, respectivamente. Como consequência, o valor para o rendimento corrigido quando se fornece uma tensão de 16 V a R1 é de 7,60%.

Quanto à segunda metade do trabalho laboratorial, a eficiência e potência de arrefecimento, obtidos a partir dos dados das Tabelas VI e VII e das equações (5), (7) e (13), encontram-se na tabela X:

Tabela X. Determinação da eficiência, da potência de arrefecimento e da eficiência de Carnot

	$V2$ (V)	T_a (°C)	ϵ	e_ϵ	ϵ_{Carnot}	$P1$ (W)	e_{P1} (W)
E	2,344	17,11	2,47	0,06	29,01	1,996	0,068
F	1,458	15,81	2,17	0,07	36,83	0,670	0,039
G	2,320	20,90	3,75	0,08	36,09	2,842	0,081

V. CONCLUSÃO E CRÍTICAS

Os rendimentos obtidos para a célula de Peltier a funcionar como motor foram muito baixos, cerca de 10% dos esperados para uma máquina de Carnot, sendo o máximo atingido de $(0,90 \pm 0,02)\%$ com uma precisão de 93,63%, para uma tensão aplicada de 16V. Embora o esperado

nunca fosse próximo do de uma máquina de Carnot, já que esta é ideal, os valores obtidos são muito baixos quando comparados com outros motores não ideais como os a diesel ou gasolina. Tal pode ser explicado pelo desenho da célula, que não foi construída para trabalhar desse modo. Por outro lado, a existência de resistência térmica implica que rendimento da célula nunca seria máximo, já que em equilíbrio, por cada watt de potência fornecido a fonte fria aquece cerca de 4K (com 91% de precisão), diminuindo assim a diferença de temperatura entre fontes e portanto a capacidade da célula de gerar calor. Conclui-se assim que a diferença de potencial e corrente criada por efeito de Seebeck são muito pequenas. Verificou-se no entanto que o rendimento aumentava com o aumento da tensão, tal como era esperado pelo modelo de Carnot, já que a uma maior tensão implica o aumento de T_a . O valor de rendimento corrigido encontrado parece-nos demasiado elevado quando comparado com o rendimento ideal, o que pode indicar algum erro ou que as perdas energéticas são de facto muitíssimo elevadas.

Comparando com uma máquina de Carnot, a eficiência máxima obtida ($3,75 \pm 0,08$ com 99% de precisão) tal como tinha acontecido no caso anterior, é muito inferior, mais uma vez porque o modelo de Carnot ideal. É de notar que a potência de arrefecimento e eficiência máximos foram atingidos não só com uma maior corrente mas quando a temperatura da fonte fria se aproximou mais da temperatura ambiente. Também neste caso, quanto maior a corrente aplicada à célula maior a potência de arrefecimento e a eficiência. Note-se que, na realidade, a relação calculada não é a eficiência mas a "capacity of performance", já que se mede a performance do aparelho pelo calor que a fonte quente recebe, no caso da montagem o que o fluido absorve, e não a potência retirada da fonte fria (neste caso P1), como está definido para eficiência.[5]

Para o erro experimental contribuíram os maus contactos nos aparelhos e o facto da fonte quente estar em contacto com o ar, dissipando energia. Uma maneira de evitar esta perda energética na fonte quente seria isolando-a ou envolvendo toda a célula num ambiente de vácuo. Verificou-se que os termómetros não se encontravam calibrados, uma vez que indicavam diferentes temperaturas ambiente. A calibração teve de ser feita manualmente, assumindo que todos estariam à mesma temperatura inicial, o que pode ter contribuído para o erro. O sistema demorava também muito tempo a atingir o equilíbrio térmico, o que pode ter precipitado o registo de valores antes deste se verificar. Por fim, o valor da resistência óptima utilizado foi de 4Ω , já que era essa a precisão máxima disponível, não tendo sido fornecido, portanto, a potência máxima ao circuito.

[1] http://pt.wikipedia.org/wiki/Efeito_Seebeck
[2] http://pt.wikipedia.org/wiki/Efeito_Peltier
[3] http://en.wikipedia.org/wiki/Thermoelectric_effect
#Thomson.effect

[4] http://en.wikipedia.org/wiki/Thermoelectric_cooling
[5] http://en.wikipedia.org/wiki/Coefficient_of_performance