

# Conversor Termoelétrico: Análise do Funcionamento da Célula de Peltier

Emanuel Ricardo - n° 65677, Hugo Proença - n° 65683, João Martins - n° 65695, João Penedo - n° 65697

Laboratório de Complementos de Electromagnetismo e Termodinâmica, MEFT - IST 2009/10

(Dated: April 14, 2010)

Este trabalho laboratorial tem como **objectivo** o estudo do funcionamento de uma célula de Peltier, quer considerando o **efeito de Seebeck**, correspondente a uma **máquina térmica** - produção de uma diferença de potencial (trabalho eléctrico) a partir de um gradiente de temperaturas, quer analisando o **efeito de Peltier**, sendo que a célula desempenha o papel de **bomba de calor** no sistema (mantém um gradiente térmico dada uma diferença de potencial).

Pretende-se comparar o **rendimento** ( $\eta$ ) da máquina térmica e a **eficiência** (*c.o.p.*) da bomba de calor (dependentes das temperaturas das fontes) com os de processos ideais, determinando a resistência óptima ( $R_o$ ) para a máquina térmica (maximização do rendimento). Para tal são registadas as tensões, as intensidades de corrente e as potências em jogo no sistema, analisando-se as perdas energéticas.

## I. INTRODUÇÃO

Os **efeitos termoelétricos** reúnem dois contextos energéticos à partida díspares: o electrodinâmico e o termodinâmico. Dispositivos que, como a célula de Peltier, tiram partido destes fenómenos têm grande utilidade em domínios como o da engenharia electrotécnica, intervindo também em processos diversos, desde sistemas desumidificadores e sensores térmicos (termopar) até à síntese de cadeias de ADN (no contexto da biologia molecular).

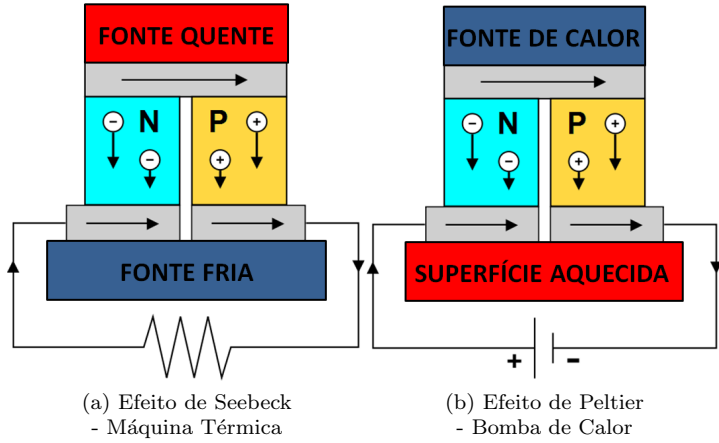


Figura 1: Efeitos termoelétricos e sistemas termodinâmicos associados

O **efeito de Seebeck** corresponde à conversão directa de uma diferença de temperaturas nas junções entre dois materiais condutores ou semicondutores  $\alpha$  e  $\beta$  numa diferença de potencial (estabelecimento de uma corrente eléctrica em circuito fechado). Tem-se ainda a relação:

$$\Delta V = S_{\alpha-\beta} \cdot \Delta T \quad (1)$$

Sendo  $S_{\alpha-\beta}(T)$  dito poder termoelétrico do par de materiais (esta relação é válida para uma gama definida de temperaturas).

Por outro lado, o **efeito de Peltier** corresponde à conversão inversa: transformação de uma diferença de potencial/corrente numa diferença de temperaturas nas junções dos dois materiais. Tem-se agora a relação:

$$\mathfrak{S}_W = \Pi_{\alpha-\beta} \cdot \mathfrak{S}_C \quad (2)$$

Sendo  $\Pi_{\alpha-\beta}(T)$  o coeficiente de Peltier do par de materiais,  $\mathfrak{S}_W$  e  $\mathfrak{S}_C$  as densidades respectivamente de energia e de corrente. Note-se a designada **segunda relação de Kelvin** que associa os coeficientes dos efeitos referidos:

$$\Pi_{\alpha-\beta} = S_{\alpha-\beta} \cdot T \quad (3)$$

Existe ainda um outro efeito termoelétrico alheio ao âmbito deste trabalho experimental, designado efeito de Thompson, igualmente devido a Lord Kelvin (William Thomson) que relaciona fontes e sumidouros de calor, a lei de Joule e o designado calor de Thompson.

Como sugere a Figura 1, dentro da célula a considerar existe uma cadeia de semicondutores  $n$  e  $p$  que possibilitam a equivalência entre a célula e uma máquina térmica (gradiente fixo de temperaturas) ou entre a célula e uma bomba de calor (diferença de potencial imposta). Os portadores de carga actuam também como portadores de energia térmica como sugere (b).

É importante referir que a potência dissipada numa resistência incluída num circuito eléctrico é dada pela **lei de Joule** (em conjugação com a lei de Ohm):

$$P = VI = \frac{V^2}{R} \quad (4)$$

Para o caso da potência posta em jogo num sistema de arrefecimento por fluido de refrigeração, tem-se:

$$P = \frac{\Delta m}{\Delta t} c \cdot \Delta T = \frac{\Delta v}{\Delta t} \rho \cdot c \cdot \Delta T \quad (5)$$

Sendo que o volume que circula na unidade de tempo corresponde ao caudal.

Considerando a máquina térmica, podemos determinar o seu **rendimento**, que em primeira aproximação é dado por:

$$\eta = \frac{W}{Q_{FQ}} = \frac{P_{\text{Peltier}}}{P_{FQ}} \quad (6)$$

Considerando primeiro correcções devidas a dissipação na fonte quente e depois devidas a condução de energia que não é contabilizada no efeito de Seebeck, temos rendimentos corrigidos dados por:

$$\eta' = \frac{P_{\text{Peltier}}}{P_{\text{Peltier}} + P_{FF}} \quad (7)$$

$$\eta'' = \frac{P_{\text{Peltier}}}{P_{\text{Peltier}} + P_{FF} - P_{\text{Condução}}} \quad (8)$$

O rendimento máximo de uma máquina térmica corresponde a uma máquina reversível, *i.e.* um ciclo de Carnot, para o qual  $\eta_{\text{Carnot}} = 1 - T_{FF}/T_{FQ}$ . Para a bomba de calor, podemos considerar uma característica paralela, a **eficiência** (*c.o.p.*, *coefficient of performance*), dada no caso ideal (reversível) por  $c.o.p._{\text{heating}} = T_{FQ}/(T_{FQ} - T_{FF})$ , sendo que neste caso é determinado por:

$$c.o.p. = \frac{P_{\text{retirada}}}{P_{\text{Peltier}}} \quad (9)$$

Define-se ainda **resistência térmica**,  $R_T$ , como o quociente entre a diferença de temperaturas aos terminais de um material e a potência que nele flui.

## II. EXPERIÊNCIA REALIZADA

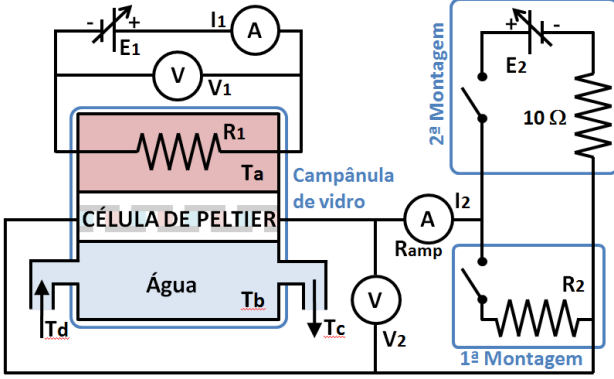


Figura 2: Montagem da experiência realizada

O sistema em estudo (Figura 2) é composto por uma célula de Peltier[1] colocada entre duas placas metálicas, estando uma em contacto térmico com uma resistência ( $R_1 \simeq 20\Omega$ ,  $T_a$ ), e outra com um sistema de arrefecimento por circulação de água ( $T_b$ ). Numa **primeira fase/montagem** (interruptores de  $R_2$  fechado e de  $E_2$  aberto),  $T_a$  e  $T_b$  correspondem, respectivamente, às temperaturas da fonte quente e da fonte fria, sendo que parte da energia térmica da fonte quente (dissipada/fornecida através de  $R_1$ ) é cedida à célula de Peltier. Esta energia é parcialmente transformada em energia eléctrica, sendo dissipada em  $R_2$  por efeito de Joule.

Após verificar que a água (fluido refrigerador) cobre a bomba hidráulica, é ligada a torneira, permitindo a sua circulação. Tomando  $E_1 = 10V$ , começa-se por analisar a situação de equilíbrio para  $R_2 = 5\Omega$  e depois para  $R_2 = 2\Omega$ , registando-se as grandezas necessárias para o **cálculo da resistência de carga óptima**  $R_o$ . Se considerarmos o equivalente de Thévenin da célula de Peltier, a potência em  $R_2$  é máxima quando (demonstrável a partir da condição  $P'(R) = 0$ )  $R_2$  é igual à resistência equivalente, que corresponde, então, a  $R_o$ , sendo calculável a partir da equação (onde  $R_{amp}$  é a resistência interna do amperímetro, calculada medindo a tensão  $V_{amp}$  aos seus terminais):

$$R_o = \frac{5I_2(R = 5\Omega) - 2I_2(R = 2\Omega)}{I_2(R = 2\Omega) - I_2(R = 5\Omega)} - 2R_{amp} \quad (10)$$

Fixa-se o valor de  $R_2$  no valor óptimo encontrado. Para  $E_1 = 7, 10, 13, 16V$  é feita uma análise do sistema, determinando o **rendimento da máquina térmica** para os diferentes valores de  $T_a$  correspondentes, considerando ainda uma correcção a  $\eta$ .

Retira-se agora a resistência  $R_2$  do circuito, o que corresponde, na figura, a abrir ambos os interruptores. Ajusta-se a fonte  $E_1$  (logo a potência da fonte quente) até ter em equilíbrio uma diferença  $\Delta T = T_a - T_b$  igual à diferença para o caso anterior em que  $E_1 = 7V$ , e para o outro em que  $E_1 = 16V$ . Em ambas as situações é estudado o sistema e as grandezas envolvidas, sendo assim feito, por duas vezes, o cálculo, tanto da **resistência térmica**, como de um **rendimento corrigido** considerando a potência transferida por condução térmica.

Para uma **segunda montagem**, correspondente a ter o interruptor de  $R_2$  aberto e o de  $E_2$  fechado, pretende-se a utilização da célula como uma **bomba de calor** (a anterior fonte fria aquece e a anterior fonte quente arrefece), sendo que se tem de garantir, regulando a polaridade de  $E_2$ , o estabelecimento de uma corrente com o mesmo sentido que o da da montagem anterior. Regulando ainda a magnitude de  $E_2$ , são estudados, para  $I_2 = 0.3, 0.5A$ , os casos de equilíbrio, obtidos aplicando uma tensão em  $E_1$  de efeito oposto a  $E_2$ . O registo de grandezas permite o cálculo de potências postas em jogo nas “fontes” e do *c.o.p.* do sistema.

## III. RESULTADOS

### A. Máquina Térmica

#### 1. Determinação da resistência de carga óptima

Para uma tensão na fonte quente de  $E_1 = 10V$  temos as tensões e intensidades resultantes incluídas na Tabela I.

Tabela I: Grandezas para a determinação de  $R_o$

$R_2 (\Omega)$	$V_1 (V)$	$I_1 (A)$	$V_2 (V)$	$I_2 (mA)$
$2.00 \pm 0.01$	$10.63 \pm 0.01$	$0.51 \pm 0.01$	$353.0 \pm 0.2$	$84.7 \pm 0.2$
$5.00 \pm 0.01$	$10.65 \pm 0.01$	$0.51 \pm 0.01$	$219.1 \pm 0.2$	$62.9 \pm 0.2$

Sendo que se mediu, apenas para  $R_2 \simeq 5\Omega$ , a tensão aos terminais do amperímetro,  $V_{amperímetro} = 15.4 \pm 0.1 mV$ , obtendo-se directamente (levando em consideração o valor de  $I_2$ ) a resistência interna do amperímetro  $R_{amp} = 0.245 \pm 0.009\Omega$ .

#### 2. Determinação do rendimento da máquina térmica

Após efectuada a substituição da resistência de carga por  $R_o$ , obtiveram-se os dados apresentados na Tabela II correspondentes ao sistema em equilíbrio para quatro valores diferentes de  $T_a$  (induzidos pela escolha de  $E_1$ ).

Tabela II: Grandezas para a determinação do rendimento

$E_1 (V)$	7	10	13	16
$V_1 (V)$	$7.23 \pm 0.01$	$10.65 \pm 0.01$	$13.15 \pm 0.01$	$16.00 \pm 0.01$
$I_1 (A)$	$0.35 \pm 0.01$	$0.51 \pm 0.01$	$0.63 \pm 0.01$	$0.76 \pm 0.01$
$V_2 (mV)$	$178.9 \pm 0.2$	$382.0 \pm 0.2$	$549.0 \pm 0.2$	$759.0 \pm 0.2$
$I_2 (mA)$	$27.6 \pm 0.2$	$58.5 \pm 0.2$	$86.7 \pm 0.2$	$119.6 \pm 0.2$
$T_a (K)$	$307.87 \pm 0.27$	$322.76 \pm 0.27$	$337.89 \pm 0.27$	$359.64 \pm 0.27$
$T_b (K)$	$300.22 \pm 0.27$	$306.41 \pm 0.27$	$313.25 \pm 0.27$	$324.27 \pm 0.27$
$T_c (K)$	$295.28 \pm 0.27$	$295.76 \pm 0.27$	$297.64 \pm 0.27$	$299.05 \pm 0.27$
$T_d (K)$	$294.59 \pm 0.27$	$294.25 \pm 0.27$	$295.11 \pm 0.27$	$295.90 \pm 0.27$

Note-se que  $T_a$  e  $T_b$  correspondem respectivamente às fontes quente e fria, sendo  $T_c$  representativa da água que sai e  $T_d$  da que entra no sistema de refrigeração. Ao longo do trabalho foram feitas medições periódicas do caudal do fluido de refrigeração, necessárias na determinação da potência da fonte fria por (5). Tem-se  $c \equiv c_{H_2O} = 4186 J/(kg \cdot K)$  e  $\rho \equiv \rho_{H_2O} = 998 kg/m^3$ , considerando-se ainda, para esta parte da experiência,  $\Delta v = 80.0 \pm 0.5 cm^3$  e  $\Delta t = 161 \pm 1 s$ , logo um caudal de  $(4.97 \pm 0.03) \times 10^{-7} m^3/s$ .

Tirando a resistência  $R_2$  do circuito,  $I_2$  anula-se e cessa a acção termoelectrica introduzida pela célula. Procura-se manter, como referido, o sistema em equilíbrio para um gradiente térmico próximo do existente durante o período de funcionamento da célula. Para  $7V$  tinha-se  $\Delta T = 7.71K$ , tendo-se agora, para uma tensão menor,  $\Delta T' = 7.65K$ . Também para  $16V$  tinha-se  $\Delta T = 34.58K$ , tendo-se agora, para uma tensão menor,  $\Delta T' = 35.37K$ . Os dados relativos a esta situação são apresentados na Tabela III.

Tabela III: Grandezas para a determinação do rendimento corrigido

$E_1 (V)$	7	16
$V_1 (V)$	$6.58 \pm 0.01$	$14.62 \pm 0.01$
$I_1 (A)$	$0.32 \pm 0.01$	$0.71 \pm 0.01$
$T_a (K)$	$310.71 \pm 0.27$	$358.10 \pm 0.27$
$T_b (K)$	$303.00 \pm 0.27$	$323.51 \pm 0.27$
$T_c (K)$	$296.37 \pm 0.27$	$299.45 \pm 0.27$
$T_d (K)$	$295.73 \pm 0.27$	$296.36 \pm 0.27$

Para esta parte da experiência,  $\Delta v = 80.0 \pm 0.5 cm^3$  e  $\Delta t = 192 \pm 1 s$ , logo o caudal corresponde a  $(4.17 \pm 0.03) \times 10^{-7} m^3/s$ .

### B. Bomba de Calor

Para o funcionamento da célula como bomba de calor, apresentam-se as tensões, intensidades de corrente e temperaturas no equilíbrio do sistema (Tabela IV).

Tabela IV: Grandezas para a determinação do *c.o.p.*, correspondente ao efeito de Peltier

$I_2 (A)$	0.3	0.5
$V_1 (V)$	$4.14 \pm 0.01$	$6.07 \pm 0.01$
$I_1 (A)$	$0.20 \pm 0.01$	$0.29 \pm 0.01$
$V_2 (V)$	$1.489 \pm 0.001$	$2.538 \pm 0.001$
$T_a (K)$	$292.31 \pm 0.27$	$297.19 \pm 0.27$
$T_b (K)$	$300.07 \pm 0.27$	$309.05 \pm 0.27$
$T_c (K)$	$297.33 \pm 0.27$	$299.87 \pm 0.27$
$T_d (K)$	$297.14 \pm 0.27$	$296.74 \pm 0.27$

Para esta parte da experiência, tem-se, para  $I_2 = 0.5 A$ ,  $\Delta v = 80.0 \pm 0.5 cm^3$  e  $\Delta t = 84 \pm 1 s$ , sendo que para  $I_2 = 0.3 A$ ,  $\Delta v = 70.0 \pm 0.5 cm^3$  e  $\Delta t = 302 \pm 1 s$ . Assim, o valor do caudal é de  $(2.32 \pm 0.02) \times 10^{-7} m^3/s$  para  $I_2 = 0.5 A$  e é de  $(9.52 \pm 0.06) \times 10^{-7} m^3/s$  para  $I_2 = 0.3 A$ .

## IV. ANÁLISE DE RESULTADOS

Numa fase inicial determinou-se o erro de leitura dos sensores através de um desvio à temperatura de equilíbrio térmico. A condição de equilíbrio térmico foi assegurada deixando os sensores em repouso à temperatura ambiente, durante uma noite. Foi verificado que estes não se encontravam em equilíbrio térmico, por conseguinte extrapolou-se um erro associado as diferentes medições dos sensores, determinado através da média entre o máximo desvio da média dos valores para a esquerda e o máximo desvio da média dos valores para a direita.

### A. Máquina Térmica

O valor de resistência óptima foi calculado com base na expressão (10). O resultado obtido<sup>1</sup> foi de  $6.166 \pm 1.950 \Omega$ .

Utilizando a resistência óptima determinou-se o rendimento da célula de Peltier a funcionar como máquina térmica para diferentes tensões fornecidas ao sistema.

Em primeiro lugar, de modo a possibilitar a análise do balanço energético do sistema, determinaram-se as potênciasostas em jogo. Foram assim calculadas, a potência responsável pelo fornecimento de energia térmica pela fonte quente ( $P_{FQ}$ ), a potência dissipada na resistência sujeita à tensão de Peltier ( $W = P_{\text{Peltier}}$ ) e a potência retirada pelo fluido de arrefecimento à fonte fria ( $P_{FF}$ ). De modo a analisar-se perdas de energia foi estimado um valor de potência dissipada/perdida dada por  $P_{\text{diss.}} = P_{FQ} - P_{FF} - W$ .

Tabela V: Potências em jogo no sistema térmico

$E_1 (V)$	$P_{FQ} (W)$	$P_{\text{Peltier}} (mW)$	$P_{FF} (W)$	$P_{\text{diss.}} (W)$
7	$2.531 \pm 0.076$	$4.938 \pm 0.041$	$1.439 \pm 1.139$	$1.086 \pm 1.214$
10	$5.432 \pm 0.112$	$22.350 \pm 0.088$	$3.153 \pm 1.149$	$2.256 \pm 1.261$
13	$8.285 \pm 0.138$	$47.600 \pm 0.127$	$5.260 \pm 1.163$	$2.977 \pm 1.301$
16	$12.160 \pm 0.168$	$90.776 \pm 0.176$	$6.542 \pm 1.171$	$5.528 \pm 1.339$

A partir dos valores de potências calculou-se o rendimento da célula de Peltier em análise. Numa primeira aproximação, considerou-se que toda a energia térmica fornecida pela fonte quente seria aproveitada e reencaminhada para a célula de Peltier, segundo a qual o rendimento da célula será dado por (6). O rendimento de Carnot foi calculado como base de comparação e os valores obtidos são apresentados na Tabela VI.

Tabela VI: Rendimento da máquina térmica, rendimento corrigido e rendimento de Carnot (em %)

$E_1 (V)$	$\eta$	$\eta'$	$\eta_{\text{Carnot}}$
7	$0.195 \pm 0.007$	$2.483 \pm 1.392$	$0.342 \pm 0.272$
10	$0.411 \pm 0.010$	$5.064 \pm 0.914$	$0.704 \pm 0.257$
13	$0.575 \pm 0.011$	$7.293 \pm 0.679$	$0.897 \pm 0.199$
16	$0.747 \pm 0.012$	$9.835 \pm 0.499$	$1.369 \pm 0.244$

Analisando os valores de potência dissipada, podemos deduzir que grande parte da energia térmica fornecida à fonte quente dissipar-se-á pelo meio ambiente, não sendo portanto conduzida para a célula de Peltier. Este último facto leva-nos a uma correcção no cálculo do rendimento (agora  $\eta'$ ) em que consideramos como potência fornecida à célula de Peltier a soma do trabalho eléctrico com a potência retirada pelo fluido de arrefecimento. Atente-se que estes últimos valores aproximam-se mais dos rendimentos de uma máquina de Carnot com características semelhantes às do sistema.

Tabela VII: Novo rendimento corrigido e rendimento de Carnot. Potência na condução e resistência térmica

<sup>1</sup> Os erros inerentes a medições indirectas são calculados considerando a teoria linearizada de propagação.

$E_1$ (V)	$P_{\text{Condução}}$ (W)	$\eta''$ (%)	$\eta_{\text{Carnot}}$ (%)	$R_T$ (K/W)
16 <sup>a</sup>	$5.382 \pm 0.984$	$7.263 \pm 12.53$	$9.657 \pm 0.509$	$6.425 \pm 1.275$
7	$1.113 \pm 0.955$	$1.489 \pm 9.42$	$2.480 \pm 1.297$	$6.925 \pm 6.429$

<sup>a</sup> Os resultados são apresentados pela ordem correspondente à realização experimental.

De modo a aperfeiçoar o cálculo do rendimento da célula, efectuou-se uma montagem que anulasse a passagem de corrente pela célula de Peltier, sendo a potência que chega à fonte fria apenas resultado da condução térmica entre fontes. Calculando a potência que chega por condução à fonte fria e desconsiderando-a no cálculo de potência fornecida à célula de Peltier foi possível obter valores de rendimento bem mais próximos dos de Carnot, como indicado na Tabela VII. Apresentam-se ainda os valores da resistência térmica da célula, para os dois valores de  $E_1$  estudados.

## B. Bomba de Calor

Nesta montagem em particular, a bomba de calor formada pela célula Peltier recebe um trabalho eléctrico definido pelo observador e fornece uma certa potência à antes designada fonte fria, retirando uma quantidade de energia da antes designada fonte quente. É assim criada uma diferença/gradiente de temperaturas. O rendimento da célula de Peltier a funcionar deste modo foi calculado através do quociente entre a potência colocada na fonte quente e o trabalho fornecido à célula e comparado com o rendimento ideal de uma bomba de calor. Estes valores dependem da corrente aplicada, sendo representados na Tabela VIII.

Tabela VIII: Grandezas de circuito, potência colocada na água e *c.o.p.* da bomba de calor

$I_2$ (A) <sup>a</sup>	$V_2$ (V)	$P_{\text{Retirada}}$ (W)	<i>c.o.p.</i>	<i>c.o.p.</i> -ideal
0.5	$2.538 \pm 0.001$	$3.037 \pm 0.505$	$2.393 \pm 0.072$	$3.026 \pm 0.116$
0.3	$1.489 \pm 0.001$	$0.753 \pm 0.601$	$1.687 \pm 1.079$	$3.466 \pm 0.207$

<sup>a</sup> Esta grandeza apresenta um erro de 1 mA associado.

Destaca-se o facto de a eficiência da célula de Peltier se apresentar menos rentável quando atravessada por uma menor corrente enquanto que a eficiência ideal se apresenta maior para menores gradientes de temperaturas.

## V. CONCLUSÕES E CRÍTICA

Relativamente à determinação da resistência de carga óptima,  $6.166 \pm 1.950 \Omega$ , observou-se que, tal como era esperado, perante as mesmas condições do sistema, esta foi aquela que proporcionou melhor desempenho, isto é, maximizou o trabalho produzido pela célula.

No estudo da célula de Peltier como máquina térmica verificou-se que o rendimento não corrigido e corrigido da célula aumentou

com a temperatura da fonte quente. Sendo sempre inferior ao do ciclo de Carnot, como era de esperar, os rendimentos referidos nunca ultrapassaram os 1.4%, algo comum para uma máquina térmica deste género, sendo o corrigido sempre superior ao não corrigido. A potência perdida na fonte quente aumentou numa proporção directa com a sua temperatura, dado coerente com o facto de a expressão corrigida de rendimento ter maior influência quando a célula de Peltier era submetida a um maior gradiente de temperatura.

Verificou-se ainda uma diminuição do erro relativo dos rendimentos, com o aumento da temperatura. Esta diminuição do erro deve-se à estimativa do erro de leitura dos sensores de temperaturas. Tal erro foi considerado constante, não considerando qualquer influência da temperatura sobre o mesmo, o que faz com que o erro induzido pelos sensores seja mais relevante para menores temperaturas.

Ao calcular o quociente entre o rendimento sem correcções e o rendimento de Carnot, obteve-se um valor quase constante, cerca de  $0.079 \pm 0.003$ . A mesma relação foi igualmente verificada para o rendimento corrigido. Tal relação pode ser usado para calcular o rendimento da máquina térmica com  $T_{FQ} \in [36.5; 86.5](^{\circ}\text{C})$  e  $T_{FF} \in [27.0; 51.1](^{\circ}\text{C})$  com recurso, apenas, ao rendimento do ciclo de Carnot, que por sua vez só depende da temperatura da fonte quente e da fonte fria. Além de reforçar a coerência entre as medidas efectuadas, este dado leva-nos a supor que a irreversibilidade dos processos térmicos que ocorrem na célula de Peltier possui uma certa relação de proporcionalidade, dependente das características da célula utilizada, com a diferença de temperatura entre fontes. Contudo, deve-se ter em atenção que a relação entre rendimento de Peltier e rendimento de Carnot apenas pode ser confirmada para estes intervalos específicos de temperatura.

Efectuando uma segunda correcção no cálculo de rendimentos, obteve-se valores mais próximos dos do ciclo de Carnot, tal como previsto teoricamente. Deve-se no entanto referir que estes valores possuem um erro bastante elevado devido à grande influência que o erro inerente aos sensores de temperatura tem sobre o cálculo da potência dissipada por condução através da célula de Peltier.

Na última parte da experiência foi observado que a célula de Peltier tem um funcionamento melhor como bomba de calor do que máquina térmica, pois consegue criar diferenças térmicas elevadas (dezenas de kelvin) a partir de correntes reduzidas (décimas de ampère). As eficiências obtidas suportam a última premissa.

A eficiência obtida para  $i = 0.3 \text{ A}$  foi consideravelmente inferior (cerca de metade) à que era esperada. Como o sistema foi desligado antes da conclusão da experiência, é possível que, quando se restabeleceram as ligações do sistema, não se tenha esperado tempo suficiente para que se estabelecesse o equilíbrio, o que influenciaria os valores de temperaturas medidos e originaria o desvio encontrado.

Ao longo da actividade verificaram-se flutuações inesperadas no caudal do fluido de refrigeração, o que pode ajudar a explicar os desvios à exactidão encontrados, sendo que a implementação de um sistema digital regulador de caudal poderia extinguir esta fonte de erro.

[1] “[http://en.wikipedia.org/wiki/Thermoelectric\\_effect](http://en.wikipedia.org/wiki/Thermoelectric_effect),” Thermoelectric Effect: Wikipedia article.

[2] J. Figueirinhas, Apontamentos das aulas teóricas (10-11 Mar.).