

Conversor Termo-eléctrico

LCET/MEFT - 2º ano, 2º Semestre - 2013/2014
Turno de Sexta-feira

Professor João Figueirinhas

Grupo D

João Lourenço (75382)/ Miguel Mora (75399)/ Miguel Levy (75516)/ Ana Almeida (75986)

21/03/2014

Resumo

Neste trabalho, estudou-se o funcionamento de um conversor termoeléctrico baseado na célula de Peltier, tendo sido determinada a carga que maximiza o rendimento, o rendimento do conversor, bem como a variação desta grandeza com avariação da temperatura da fonte quente(FQ). Foram, ainda, determinadas as perdas energéticas e a resistência térmica. Analisou-se o funcionamento do conversor termoeléctrico como bomba de calor, calculando-se a potência de refrigeração e a sua eficiência.

1 Introdução

Neste trabalho, vamos utilizar um conversor termoeléctrico, composto por uma célula de Peltier, colocada entre duas placas metálicas. Uma das placas é aquecida por uma resistência (20Ω) e a outra arrefecida por um sistema de circulação de água.

Um conversor termoeléctrico permite a conversão de calor em tensão eléctrica e de tensão em calor, permitindo, desta forma, o seu estudo como máquina térmica e bomba de calor.

Máquina Térmica

Para a máquina térmica, tem-se que o gradiente de temperatura imposto, entre as duas placas, gera uma tensão (V). Este processo designa-se Efeito de Seebeck, vindo:

$$\Delta V = S_{Cu,Al} \Delta T \quad (1)$$

(onde $S_{Cu,Al}$ é o coeficiente de Seebeck, ΔT a diferença de temperaturas das placas metálicas e ΔV a diferença de potencial)

Considerando P_1 a potência que a fonte (E_1) dissipa, sendo esta transmitida em parte para a célula de Peltier através de efeito Joule entre o resistência térmica (R_1) e a placa, vem que:

$$P_1 = V_1 I_1 = \frac{V_1^2}{R_1} \quad (2)$$

A tensão eléctrica gerada pela célula de Peltier é fornecida a uma resistência exterior (R_2), sendo a potência dissipada:

$$P_2 = V_2 I_2 \quad (3)$$

A potência retirada da fonte fria (FF) pelo fluido de arrefecimento é dada por:

$$P_3 = \frac{\Delta m}{\Delta t} (T_c - T_d) c \quad (4)$$

(onde $\frac{\Delta m}{\Delta t}$ é o caudal, T_c a temperatura da água à saída, T_d a temperatura da água à entrada e c o calor específico da água)

Posto isto, vem que o rendimento é dado pela fracção entre a potência útil, fornecida à resistência exterior (R_2), e a potência fornecida pelo gerador. Considerando a potência dissipada na resistência R_1 como igual à fornecida pelo gerador, vem que:

$$\eta_1 = \frac{P_2}{P_1} \quad (5)$$

Como alguma parte da potência P_1 é dissipada para água (P_3), considera-se que a potência fornecida é a soma da potência fornecida a R_2 e de P_3 , vindo:

$$\eta_2 = \frac{P_2}{P_2 + P_3} \quad (6)$$

Desta forma, é retirada a fracção de potência dissipada pela fonte quente para o exterior.

Considerando, ainda, que uma parte de P_1 é transmitida por condução ($P_{conducao}$) à fonte fria, vem:

$$P_3 = P_{Peltier} + P_{conducao} \quad (7)$$

(onde $P_{Peltier}$ é a potência fornecida à FF devido à célula de Peltier)

Para se determinar $P_{conducao}$, vem que:

$$R_{termica} = \frac{T_{FQ} - T_{FF}}{P_3} \quad (8)$$

E que:

$$P_{conducao} = \frac{T_{FQ} - T_{FF}}{R_{termica}} \quad (9)$$

Desta forma, calcula-se um quarto rendimento:

$$\eta_3 = \frac{P_2}{P_2 + P_{Peltier}} \quad (10)$$

A potência de Carnot para a máquina térmica é de:

$$\eta_{Carnot} = 1 - \frac{T_{FF}}{T_{FQ}} \quad (11)$$

Bomba de Calor

Quando as placas são submetidas a uma tensão (U), e percorridas por uma corrente, faz com que se gere um gradiente de temperatura, o que provoca a libertação de calor por uma das placas e a absorção pela outra. Este processo é designado Efeito de Peltier.

Assim sendo, é possível aplicar este efeito como base do funcionamento de uma bomba de calor, uma vez que a tensão aplicada gera um fluxo de calor entre as duas placas, sendo que uma aquece e a outra arrefece, vindo:

$$J_Q = \Pi_{Cu,Al} J \quad (12)$$

(onde $\Pi_{Cu,Al}$ é o coeficiente de Peltier, J_Q a densidade do fluxo de energia e J a densidade do fluxo de corrente)

Considerando a fonte fria a resistência e a água a fonte quente, vem que:

$$P_3 = P_1 + P_2 \quad (13)$$

Com $T_F F = T_{ambiente}$, sendo esta condição imposta pela tensão V_1 , tem-se que:

$$P_{refrigeracao} = V_1 I_1 \quad (14)$$

Sendo as eficiências desta bomba dadas por:

$$\epsilon = \frac{P_3}{P_2} \quad (15)$$

$$\epsilon_{Carnot} = \frac{T_{FF}}{T_{FF} - T_{FQ}} \quad (16)$$

Resistência carga ótima

Para calcular a resistência para a qual se consegue extrair maior rendimento do sistema, vem que:

$$R_{2o} = \frac{5(I_2)_{R=5\Omega} - 2(I_2)_{R=2\Omega}}{(I_2)_{R=2\Omega} - (I_2)_{R=5\Omega}} - R_{amp} \quad (17)$$

Assim, utilizou-se este valor de resistência para a máquina térmica e bomba de calor.

2 Montagem e Procedimento Experimental

I - Determinação da resistência de carga ótima

1. Monte o circuito conforme a figura 1:

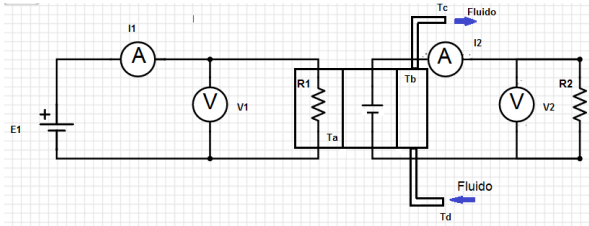


Figura 1: Montagem experimental para a primeira parte da experiência.

2. Retirar os valores de T_{FQ} , T_{FF} , T_{OUT} e T_{IN} (T_a , T_b , T_c e T_d);
3. Ligar a bomba que alimenta o circuito de refrigeração;
4. Selecione $R_2 = 5\Omega$;
5. Selecione $E_1 = 10V$ e espere até que o sistema atinja o equilíbrio térmico (as diferentes temperaturas estabilizam).
6. Em equilíbrio térmico, registre as temperaturas (T_a , T_b , T_c e T_d), as tensões (V_1 e V_2) e as correntes (I_1 e I_2).
7. Realize o passo 6 para $R_2 = 2\Omega$
8. Calcule a resistência ótima através da fórmula ??.

II - Máquina Térmica

Rendimentos:

1. Ajuste o valor de R_2 por forma a ter $R_2 = R_{2o}$;
2. Selecione uma tensão de $E_1 = 7V$;
3. Em equilíbrio térmico, registre as temperaturas, as tensões e as intensidades e o tempo necessário para obter 60ml de água;
4. Calcule o caudal;
5. Calcule P_1 , P_2 e P_3 ;
6. Calcule os rendimentos: η_1 , η_2 e η_{Carnot} ;
7. Realize o passo 4, 5 e 6 para $E_1 = 10, 13$ e $16V$;

Potência condução:

1. Faça as alterações ao circuito conforme a figura 2 (retire R_2 do circuito, anulando I_2 por interrupção do circuito):

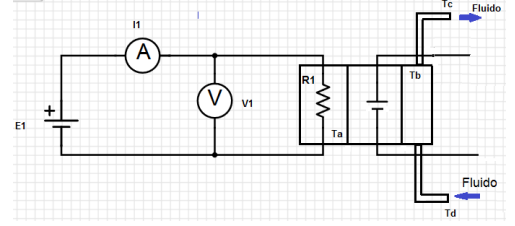


Figura 2: Montagem experimental sem R_2 .

2. Ajuste E_1 por forma a obter $T_a = T_{a(E1=7V)}$;
3. Em equilíbrio térmico registre as temperaturas, I_1 , V_1 e o tempo necessário para obter 60ml de água;
4. Calcule o caudal;
5. Calcule P_3 e a resistência térmica (eq. ??);
6. Com o valor da resistência térmica, calcule, para os casos anteriores ($E_1 = 7, 10, 13, 16V$) a potência de condução (eq. ??) e η_3 (eq. ??).

II - Bomba de Calor

1. Altere a montagem experimental conforme a figura 3 (substituir R_2 por um fonte de tensão E_2 em série com uma resistência de 10Ω), garantido que a corrente na célula de Peltier flui no mesmo sentido que no caso anterior:

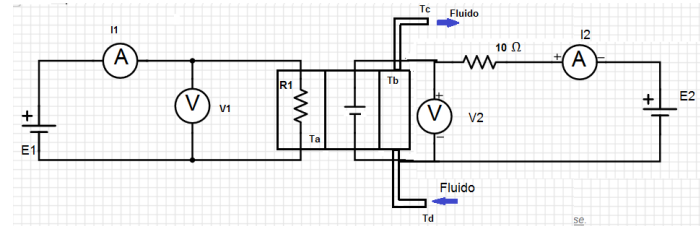


Figura 3: Montagem experimental para a segunda parte da experiência.

2. Selecione $E_2 \approx 5V$ por forma a obter $I_2 = 0,5A$;
3. Verifique que T_a começa a descer;
4. Aplique uma tensão em E_1 por forma a obter $T_a = 23^\circ C$;
5. Em equilíbrio térmico registre as temperaturas, tensões intensidades e meça o tempo necessário para obter 60ml de água na proveta;
6. Calcule o caudal;
7. Determine $P_{refrigeracao} = P_1$, P_2 e P_3 , bem como as eficiências (eq. ?? e ??).
8. Repita os passos 3-7, para $I_2 = 0,3A$.

3 Análise de Resultados

3.1 Calibração dos sensores

Por forma, a ter resultados mais fidedignos mediu-se as temperaturas antes de iniciar a experiência, sendo que o esperado seria estas apresentarem o mesmo valor, como tal não ocorreu, esse erro foi descontado ao longo da experiência nas temperaturas obtidas, para posterior realização de cálculos

$T_a(^{\circ}C)$	$T_b(^{\circ}C)$	$T_c(^{\circ}C)$	$T_d(^{\circ}C)$
$20,019 \pm 0,001$	$19,941 \pm 0,001$	$20,046 \pm 0,001$	$20,190 \pm 0,001$

Tabela 1: Valores iniciais de temperatura, usadas para correcções posteriores.

3.2 Resistência carga óptima

Primeiramente, foi calculada a resistência para a qual se obtia maior rendimento, sendo necessário retirar os valores das intensidades de corrente e medir a tensão e intensidade do amperímetro por forma a obter a sua resistência e determinar a resistência de carga óptima através da equação ??.

$R_2 = 5\Omega$			
$T_a(^{\circ}C)$	$T_b(^{\circ}C)$	$T_c(^{\circ}C)$	$T_d(^{\circ}C)$
$44,834 \pm 0,005$	$29,402 \pm 0,005$	$21,364 \pm 0,005$	$19,790 \pm 0,005$
$V_1(V)$	$V_2(V)$	$I_1(A)$	$I_2(A)$
$10,54 \pm 0,01$	$0,350 \pm 0,001$	$0,525 \pm 0,001$	$0,0661 \pm 0,0001$
$V(dm^3)$	$t(s)$	$\phi(g/s^{-1})$	
$0,060 \pm 0,003$	$85,9 \pm 0,3$	$(7,0 \pm 0,4) \times 10^4$	
$R_2 = 2\Omega$			
$T_a(^{\circ}C)$	$T_b(^{\circ}C)$	$T_c(^{\circ}C)$	$T_d(^{\circ}C)$
$44,068 \pm 0,005$	$29,423 \pm 0,005$	$21,323 \pm 0,005$	$19,562 \pm 0,005$
$V_1(V)$	$V_2(V)$	$I_1(A)$	$I_2(A)$
$10,53 \pm 0,01$	$0,221 \pm 0,001$	$0,525 \pm 0,001$	$0,0874 \pm 0,0001$
$V(dm^3)$	$t(s)$	$\phi(g/s^{-1})$	
$0,060 \pm 0,003$	$87,4 \pm 0,3$	$(6,9 \pm 0,4) \times 10^4$	
R_{amp}			
$V_{amp}(V)$	$I_{amp}(A)$	$R_{amp}(\Omega)$	
$0,014 \pm 0,001$	$0,0661 \pm 0,0001$	$0,21 \pm 0,02$	
$R_{optima} = 6,9 \pm 0,1\Omega$			

Tabela 2: Valores de temperaturas, tensões, intensidades e caudais para uma resistência de 2Ω e outra de 5Ω , bem como valores necessários a cálculo da resistência do amperímetro.

3.3 Máquina Térmica

Nesta secção variou-se os valores de tensão em E_1 e mediu-se as grandezas habituais, para posterior cálculo das potências (P_1 , P_2 e P_3) a partir das quais se determinaram os rendimentos, vindo:

$E_1 = 7V$			
$T_a(^{\circ}C)$	$T_b(^{\circ}C)$	$T_c(^{\circ}C)$	$T_d(^{\circ}C)$
$32,957 \pm 0,001$	$25,430 \pm 0,001$	$21,336 \pm 0,001$	$20,567 \pm 0,001$
$V_1(V)$	$V_2(V)$	$I_1(A)$	$I_2(A)$
$7,17 \pm 0,01$	$0,194 \pm 0,001$	$0,358 \pm 0,001$	$0,0265 \pm 0,0001$
$\phi(g/s^{-1})$	$P_1(W)$	$P_2(W)$	$P_3(W)$
$(6,8 \pm 0,4) \times 10^4$	$2,57 \pm 0,01$	$(5,14 \pm 0,14) \times 10^{-3}$	$1,8 \pm 0,1$
$\eta_1(\%)$	$\eta_2(\%)$	η_{Carnot}	
$0,20 \pm 0,01$	$0,29 \pm 0,02$	$23,10 \pm 0,01$	
$E_1 = 10V$			
$T_a(^{\circ}C)$	$T_b(^{\circ}C)$	$T_c(^{\circ}C)$	$T_d(^{\circ}C)$
$45,813 \pm 0,001$	$30,076 \pm 0,001$	$21,874 \pm 0,001$	$20,387 \pm 0,001$
$V_1(V)$	$V_2(V)$	$I_1(A)$	$I_2(A)$
$10,55 \pm 0,01$	$0,410 \pm 0,001$	$0,526 \pm 0,001$	$0,0562 \pm 0,0001$
$\phi(g/s^{-1})$	$P_1(W)$	$P_2(W)$	$P_3(W)$
$(6,8 \pm 0,4) \times 10^4$	$5,55 \pm 0,01$	$(2,44 \pm 0,05) \times 10^{-2}$	$4,2 \pm 0,2$
$\eta_1(\%)$	$\eta_2(\%)$	η_{Carnot}	
$0,44 \pm 0,01$	$0,57 \pm 0,04$	$34,40 \pm 0,01$	
$E_1 = 13V$			
$T_a(^{\circ}C)$	$T_b(^{\circ}C)$	$T_c(^{\circ}C)$	$T_d(^{\circ}C)$
$59,094 \pm 0,001$	$35,166 \pm 0,001$	$23,147 \pm 0,001$	$20,855 \pm 0,001$
$V_1(V)$	$V_2(V)$	$I_1(A)$	$I_2(A)$
$13,18 \pm 0,01$	$0,626 \pm 0,001$	$0,656 \pm 0,001$	$0,0854 \pm 0,0001$
$\phi(g/s^{-1})$	$P_1(W)$	$P_2(W)$	$P_3(W)$
$(7,0 \pm 0,4) \times 10^4$	$8,65 \pm 0,01$	$(5,33 \pm 0,10) \times 10^{-3}$	$6,7 \pm 0,4$
$\eta_1(\%)$	$\eta_2(\%)$	η_{Carnot}	
$0,62 \pm 0,01$	$0,79 \pm 0,06$	$40,50 \pm 0,01$	
$E_1 = 16V$			
$T_a(^{\circ}C)$	$T_b(^{\circ}C)$	$T_c(^{\circ}C)$	$T_d(^{\circ}C)$
$76,744 \pm 0,001$	$41,203 \pm 0,001$	$24,743 \pm 0,001$	$21,169 \pm 0,001$
$V_1(V)$	$V_2(V)$	$I_1(A)$	$I_2(A)$
$16,05 \pm 0,01$	$0,900 \pm 0,001$	$0,717 \pm 0,001$	$0,1229 \pm 0,0001$
$\phi(g/s^{-1})$	$P_1(W)$	$P_2(W)$	$P_3(W)$
$(6,9 \pm 0,4) \times 10^4$	$11,5 \pm$	$0,111 \pm 0,002$	10 ± 1
$\eta_1(\%)$	$\eta_2(\%)$	η_{Carnot}	
$0,96 \pm 0,02$	$1,06 \pm 0,08$	$46,30 \pm 0,01$	

Tabela 3: Valores de temperaturas, tensões, intensidades, caudais, potência e rendimentos para diferentes tensões na fonte.

Analisando os valores presentes na tabela 3, tem-se que conforme esperado, o η_1 que corresponde ao rendimento real da máquina é baixo, sendo menor que os restantes rendimentos calculados. O rendimento de Carnot é maior e o rendimento η_2 , que despesa as perdas energéticas em

R_1 , também é baixo, mas superior ao rendimento real, verificando-se $\eta_{Carnot} > \eta_2 > \eta_1$.

Outro facto que se pode extrair deste dados, é o de o rendimento da máquina aumentar com a tensão fornecida.

Para determinar a potência transmitida à fonte fria por condução térmica através da célula de Peltier, retirou-se a resistência R_2 do circuito, vindo:

$E_1 = 7V$			
$T_a(^{\circ}C)$	$T_b(^{\circ}C)$	$T_c(^{\circ}C)$	$T_d(^{\circ}C)$
$33,285 \pm 0,001$	$25,766 \pm 0,001$	$22,204 \pm 0,001$	$21,579 \pm 0,001$
$V_1(V)$	$I_1(A)$	$R_{Term}(\Omega)$	
$6,81 \pm 0,01$	$0,339 \pm 0,001$	$4,2 \pm 0,1$	
$E_1 = 16V$			
$T_a(^{\circ}C)$	$T_b(^{\circ}C)$	$T_c(^{\circ}C)$	$T_d(^{\circ}C)$
$74,124 \pm 0,001$	$40,226 \pm 0,001$	$24,647 \pm 0,001$	$21,858 \pm 0,001$
$V_1(V)$	$I_1(A)$	$R_{Term}(\Omega)$	
$14,95 \pm 0,01$	$0,744$	$4,3 \pm 0,1$	

Tabela 4: Valores retirados para o cálculo da resistência térmica.

Tendo os valores das resistências térmicas para estes dois casos, obteve-se o seguinte ajuste:

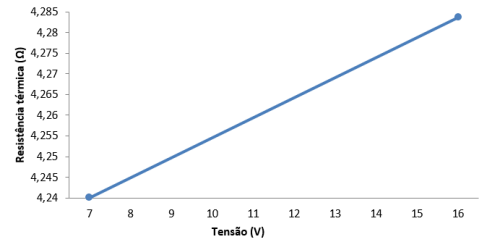


Gráfico 1: Ajuste $R_{term}(V)$

A partir destes valores e por aplicação da fórmula ??, calculou-se η_3 (rendimento em que não se consideram as perdas por condução) para os casos anteriores, vindo:

$V(V)$	$\eta_3(\%)$
7	$4,2 \pm 1,3$
10	$4,3 \pm 1,4$
13	$4,6 \pm 1,2$
16	$5,31 \pm 4,2$

Tabela 5: Valores dos rendimentos η_3 para $E_1 = 7, 10, 13, 16V$.

Este rendimento conforme esperado, é menor que o de Carnot e maior que os restantes, uma vez que as perdas por condução são desprezadas.

$V(V)$	$\eta_1(\%)$	$\eta_2(\%)$	$\eta_3(\%)$	$\eta_{Carnot}(\%)$
7	$0,20 \pm 0,01$	$0,29 \pm 0,02$	$4,2 \pm 1,3$	$23,10 \pm 0,01$
10	$0,44 \pm 0,01$	$0,57 \pm 0,04$	$4,3 \pm 1,4$	$34,40 \pm 0,01$
13	$0,62 \pm 0,01$	$0,79 \pm 0,06$	$4,6 \pm 1,2$	$40,50 \pm 0,01$
16	$0,96 \pm 0,02$	$1,06 \pm 0,08$	$5,3 \pm 1,2$	$46,30 \pm 0,01$

Tabela 6: Tabela resumo de rendimentos.

3.4 Bomba de Calor

Após a modificação da montagem, por forma a o circuito funcionar como bomba de calor, sendo a fonte fria a resistência e a água a fonte quente, obteve-se:

$I_2 = 0,5A$			
$T_a(^{\circ}C)$	$T_b(^{\circ}C)$	$T_c(^{\circ}C)$	$T_d(^{\circ}C)$
$22,699 \pm 0,001$	$29,999 \pm 0,001$	$23,582 \pm 0,001$	$21,620 \pm 0,001$
$V_1(V)$	$I_1(A)$	$V_2(V)$	$I_2(A)$
$7,26 \pm 0,01$	$0,362 \pm 0,001$	$2,341 \pm 0,001$	$0,498 \pm 0,001$
$\phi(g/s^{-1})$	$P_1(W)$	$P_2(W)$	$P_3(W)$
$(6,7 \pm 0,4) \times 10^4$	$2,63 \pm 0,01$	$0,414 \pm 0,004$	$2,7 \pm 0,2$
$\epsilon(\%)$	$\epsilon_{Carnot}(\%)$		
$2,3 \pm 0,1$	$4,11 \pm 0,01$		
$I_2 = 0,3A$			
$T_a(^{\circ}C)$	$T_b(^{\circ}C)$	$T_c(^{\circ}C)$	$T_d(^{\circ}C)$
$23,514 \pm 0,001$	$27,254 \pm 0,001$	$23,254 \pm 0,001$	$22,729 \pm 0,001$
$V_1(V)$	$I_1(A)$	$V_2(V)$	$I_2(A)$
$6,20 \pm 0,01$	$0,309 \pm 0,001$	$1,377 \pm 0,001$	$0,301 \pm 0,001$
$\phi(g/s^{-1})$	$P_1(W)$	$P_2(W)$	$P_3(W)$
$(6,6 \pm 0,4) \times 10^4$	$1,92 \pm 0,01$	$1,17 \pm 0,01$	$1,4 \pm 0,1$
$\epsilon(\%)$	$\epsilon_{Carnot}(\%)$		
$3,5 \pm 0,2$	$7,29 \pm 0,01$		

Tabela 7: Valores retirados para o cálculo da eficiência da bomba de calor.

$I_2 (A)$	$\epsilon (\%)$	$\epsilon_{Carnot} (\%)$
0,5	$2,3 \pm 0,1$	$4,11 \pm 0,01$
0,3	$3,5 \pm 0,2$	$7,29 \pm 0,01$

Tabela 8: Tabela resume de eficiências.

Por análise de resultados, é possível observar que para menores intensidades maior é a eficiência da bomba, sendo os valores obtidos concordantes ($\epsilon_{carnot} > \epsilon$).

4 Conclusão e Crítica

O primeiro passo desta experiência consistia em retirar as medições dos sensores de temperatura. Sendo que como a célula estava inactiva desde o dia anterior, as temperaturas lidas nos sensores deveriam ser iguais. Como tal não se verificou, foi necessário fazer uma correcção a todas as temperaturas medidas nos sensores de forma a obter resultados mais correctos.

Seguidamente, prosseguiu-se à obtenção da resistência óptima (R_{2o}). Este valor corresponde ao valor de resistência que, quando utilizado no circuito, produz um rendimento máximo. Contudo, existem restrições no laboratório que impediram de prosseguir com a experiência utilizando o valor encontrado pelo grupo ($(6,9 \pm 0,1)\Omega$), já que a resistência variável presente na montagem apenas permitia variações com passo unitário. Desta forma, foi necessário arredondar o valor calculado para o valor unitário mais próximo (7 Ω).

Com esse novo valor, prosseguiu-se para a obtenção de rendimentos para diferentes tensões aplicadas à célula de Peltier. Como se pode verificar pelos resultados obtidos, as temperaturas tornam-se mais díspares com o aumento da tensão aplicada. Assim, expectavelmente, os valores de potência calculados aumentam concordantemente com a tensão. Por análise da construção do rendimento de Carnot, constata-se que quanto maior for a disparidade das temperaturas, maior será o rendimento e, como já referido anteriormente, a diferença de temperaturas aumenta com a tensão. Assim, podemos deduzir que o rendimento ideal será tanto maior quanto maior for a tensão aplicada.

Contudo, o rendimento de Carnot é uma idealização inalcançável, pelo que o valor obtido não traduz o rendimento obtido pela máquina. Para tal, foi calculado o rendimento η_1 . Este rendimento considera como potência fornecida P_1 e potência útil P_2 . Desta forma, não são considerados quaisquer tipos de correcções de forma a idealizar partes da montagem, sendo o mais concreto dos rendimentos e, como tal, o de menor valor. Como se pode verificar, os valores obtidos para este rendimento são, para todas as tensões medidas, menores do que 1%, embora pudesse ultrapassar este valor para valores de tensão superiores aos estudados. Contudo, em comparação com o rendimento de Carnot verifica-se que é um valor extremamente mais baixo do que o ideal, embora a razão entre os dois diminua com o aumento de tensão.

Como explicado em secções anteriores, parte de P_1 é dissipada para a água (P_3) e para o exterior. Ora, para calcular um rendimento η_2 que despreza a potência dissipada para o exterior, considera-se a potência útil a potência fornecida à resistência R_2 mas considera-se a potência fornecida a soma da potência útil P_2 e da potência dissipada para a água P_3 , ao invés de P_1 . Isto já é uma idealização que despreza a potência dissipada para o exterior pelo que, obviamente, irá resultar num valor superior a η_1 . Como se pode constatar pelos resultados obtidos, esta situação verificou-se e, embora tenha produzido um aumento de 50% para a tensão de 7V e de 10% para 16V, continua a ser um rendimento muito baixo, ultrapassando por pouco a unidade percentual para a situações de 16V, que produz o maior rendimento.

Atendendo a que a potência dissipada para a fonte fria (P_3), não é inteiramente devido à célula de Peltier, mas que inclui também uma contribuição devido a condução, podemos afirmar que $P_3 = P_{Peltier} + P_{conducao}$. Desta forma, calculando a potência de condução, é possível calcular um outro rendimento η_3 que para além de desprezar as perdas directas para o exterior como η_2 , despreza também a potência de condução. Para tal, obteve-se a resistência térmica ao anular no circuito a componente da célula de Peltier. Com este valor, foi-nos possível calcular a potência de condução para cada uma das tensões e corrigir, então, o rendimento. Os valores para a resistência térmica obtidos não diferiam muito (sendo que teoricamente deveriam ser idênticos) pelo que utilizou-se a média dos valores obtidos. Assim, foi obtido um rendimento superior aos η_1 e η_2 , inferior ao de Carnot para todas as situações, excepto para a tensão de 7V -caso onde se observou um valor superior ao de Carnot. Isto demonstra, que este método não é muito fidedigno, especialmente para valores de tensão baixos, onde a potência de Peltier é mais baixa. A razão pela qual este método não é fiável deve-se ao facto da potência P_3 ser constituída maioritariamente pela potência de condução. Assim, qualquer erro no cálculo da potência de condução irá produzir um erro muito maior em cálculos consequentes, como se pode verificar pelo erro dos rendimentos obtidos (em particular, o erro do rendimento para a situação da tensão a 7V).

Por último, foi imposto ao sistema que funcionasse como bomba de calor e não uma máquina térmica. Desta forma, calcularam-se duas eficiências: a de Carnot (correspondente a uma máquina reversível) e a real (sem idealizações). Por análise dos resultados obtidos, pode-se observar que a eficiência real é, expectavelmente, menor do que a de Carnot. Contudo, pode-se observar que a disparidade entre os valores real e de Carnot era muito menos acentuada do que o verificado no caso dos rendimentos calculados na situação da máquina térmica. Assim, pode-se afirmar que esta montagem funciona melhor enquanto uma bomba de calor do que máquina térmica. Pode-se, também, verificar que ambas as eficiências diminuem com o aumento da intensidade de corrente fornecida à montagem. Isto deve-se ao facto da diferença de temperatura ser superior para intensidades maiores, o que resulta numa diminuição da eficiência.

O cálculo do caudal, necessário para a obtenção da potência P_3 , obrigou a perturbar a montagem, que era extremamente sensível a alterações. Embora fosse esperado que o caudal fosse constante para toda a experiência, tal não se verificou e foi necessário medir o caudal em todas as situações. Contudo, isto significa que o caudal era variável e que os valores que se obtiveram podem não ser os que realmente se verificaram durante a experiência. Isto introduz um erro que pode, em parte, ser responsável pelo resultado do rendimento η_3 na máquina térmica a 7V ser superior ao rendimento de Carnot. Este erro afecta quase todas as etapas desta experiência de uma forma que não pode ser contabilizada ou corrigida. Adicionalmente, a sensibilidade da fonte de alimentação e o tempo necessário ao sistema para estabilizar (sair do regime transitório) foram outros factores de erro. Além disso, um melhor isolamento da montagem resultaria não só numa diminuição dos factores de erro, mas também num aumento dos valores de rendimento e eficiência obtidos.

5 Referências

- FIGUEIRINHAS, João. "Protocolos dos trabalhos práticos de Laboratório de Complementos de Electromagnetismo e Termodinâmica", 2014 IST
- WIKIPEDIA, "Efeito Peltier", http://pt.wikipedia.org/wiki/Efeito_Peltier (Março 2014).