

Relatório de Física Experimental III
2004/2005

Engenharia Física Tecnológica

CONVERSOR TERMOELÉCTRICO

Célula de Peltier

Trabalho realizado por:
Ricardo Figueira, nº53755;
André Cunha, nº53757
Tiago Marques, nº53775

Grupo 1; 3ªfeira 16-20h

Lisboa, 28 de Abril de 2005

O objectivo deste trabalho reside no estudo de um conversor termoelétrico cujo funcionamento é baseado nos **efeitos de Seebeck e Peltier**. Para tal irá ser usada uma célula de Peltier cujo comportamento vai ser analisado em dois modos distintos de funcionamento: **bomba de calor e máquina térmica**.

Convém inicialmente começar por explicar os efeitos de Seebeck e Peltier bem como o terceiro fenómeno termoelétrico: **o efeito de Thomson**.

O **efeito de Seebeck** descreve o funcionamento da **célula de Peltier** como um **conversor termoelétrico**.

O **efeito de Seebeck**, descoberto acidentalmente por Thomas Seebeck em 1821, diz que quando um gradiente térmico ∇T é aplicado a um fio condutor, é acompanhada pelo aparecimento de um potencial ∇V ao longo do fio. De forma simplificada, este efeito pode ser explicado pelo seguinte, sendo a temperatura do fio heterogénea ao longo do fio condutor, sendo a temperatura nada mais que a energia cinética média das partículas e dado que num metal os electrões se podem deslocar livremente nas camadas condutoras e dada a tendência do sistema para restaurar o equilíbrio térmico, vai haver deslocamento de electrões ao longo do metal, criando assim uma diferença de potencial.

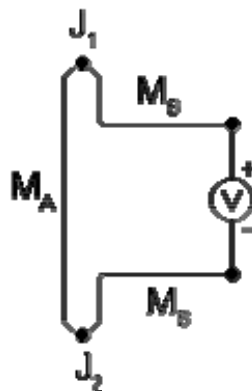
Nestas condições, a voltagem termoelétrica resultante é dada por:

$$V = \int_{T_m}^{T_u} S(T) dT,$$

em que S é o coeficiente de Seebeck.

$$S = \frac{dV}{dT}.$$

No caso do conversor termoelétrico usado, a célula de Peltier, embora mais complexa (sendo constituída por vários circuitos de configuração análoga a esta colocados em série), o funcionamento é similar ao circuito da figura seguinte, em que se têm dois metais distintos M_A e M_B , duas junções J_1 e J_2 a temperaturas T_1 e T_2 distintas.



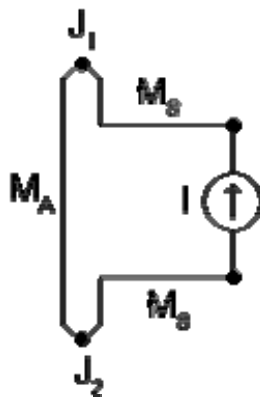
Impõe-se em J_2 uma temperatura T_2 e em J_1 uma temperatura diferente T_1 . Analogamente ao descrito anteriormente vai ser gerado um potencial V ao longo do fio. Visto que os dois metais são distintos, vão ter diferentes coeficientes de Seebeck e portanto não vão receber e ceder electrões com a mesma razão nas junções. Desta forma uma das junções vai acumular electrões enquanto outra vai carecer, o que vai gerar um desequilíbrio electrónico formando um dipólo electromagnético constituído pelas duas junções, formando assim uma diferença de potencial e corrente eléctrica no circuito.

Nestas condições a voltagem do circuito ao longo do circuito é dada por

$$V = \int_T^{T+\Delta T} \left[\frac{dV_{AB}}{dT} - (\mu_B - \mu_A) \right] dT,$$

em que μ_A e μ_B são os coeficientes de Thomson.

O efeito de Peltier, observado 13 anos após o anterior, é o efeito inverso ao de Seebeck e basicamente diz que ao aplicar-se uma corrente I num circuito semelhante ao da figura anterior, obtém-se nas junções J_1 e J_2 dois pólos térmicos, isto é, uma das junções aquece enquanto a outra arrefece.



Para explicar este efeito basta ver que é contrário ao efeito de Seebeck. A impor-se uma corrente I no circuito da figura vai-se provocar um deslocamento de electrões ao longo do mesmo. Pela natureza distinta dos metais usados, sabe-se que vão ter coeficientes de Peltier

$$\Pi = T \cdot S$$

distintos (notar que o coeficiente de Peltier depende do coeficiente de Seebeck). Desta forma, visto que os electrões que geram a corrente são munidos de diferentes energias cinéticas, e tendo em conta a acumulação e carência de electrões promovida nas junções tal como foi descrito no efeito de Seebeck, vai ser criado um dipólo térmico formado pelas duas junções.

A razão das trocas de calor nas junções é dado por

$$Q = \Pi_{AB} \cdot I = (\Pi_A - \Pi_B) \cdot I.$$

Com os dois efeitos atrás descritos, através da relação entre os coeficientes de Peltier e Seebeck temos o terceiro efeito que unifica os dois efeitos: o efeito de Thomson.

Este efeito, baptizado a partir de William Thomson, 1º Barão Kelvin, descreve o comportamento térmico de um condutor submetido a passagem de corrente e gradiente térmico.

De forma mais prática, no primeiro caso, no funcionamento como máquina térmica, irá impor-se temperaturas distintas nas junções utilizando uma resistência durante o procedimento experimental para a fonte quente e como fonte fria irá usar-se um pequeno dissipador em que se tem um fluxo de água constante que aumenta consideravelmente as capacidades dissipativas.

No segundo caso, para se obter uma bomba de calor o circuito está ligado a uma fonte de tensão que vai permitir a imposição de uma corrente, condição necessária para transformar a célula de Peltier numa bomba de calor.

Como tal irá ser estudado o rendimento no primeiro caso sendo este inferior ao de Carnot para uma máquina térmica respeitando assim a segunda lei da termodinâmica.

E no segundo caso irá calcular-se a eficiência do sistema e subsequente comparação com a eficiência ideal de uma máquina de Carnot.

No procedimento experimental, estas questões de índole mais prática irão ser abordadas com mais profundidade.

Procedimento Experimental

Nesta primeira actividade, foi-se estudar o funcionamento do conversor termoelétrico em questão como máquina térmica.

a) Antes de dar início ao procedimento propriamente dito, colocou-se gelo no depósito de água de forma a baixar a temperatura desta. Esta água constitui o fluido de arrefecimento que vai refrigerar a célula de Peltier. Colocou-se o fluido a circular ligando-se a bomba de água e de seguida, mediu-se o tempo necessário para que fossem bombeados 100 ml de água, por forma a calcular o caudal. Os valores foram registados na Tabela 1. Nesta tabela também constam os valores obtidos numa medição idêntica realizada no final desta experiência. Desta forma, tentou-se atenuar os efeitos da variação do caudal nas grandezas determinadas.

O circuito foi montado conforme esquematizado na Figura 1, utilizando uma resistência de 5Ω em R_2 . De seguida, regulou-se a fonte E_1 por forma a obter 10 V em V_1 e aguardou-se que o sistema atingisse o equilíbrio térmico. Fizeram-se as medições dos quatro valores de temperatura (T_a , T_b , T_c e T_d) e dos valores de tensão e corrente medidos nos multímetros (V_1 , I_1 e V_2 , I_2). Repetiu-se o processo para uma resistência R_2 de 2Ω , tendo-se registado todos os valores na Tabela 2.

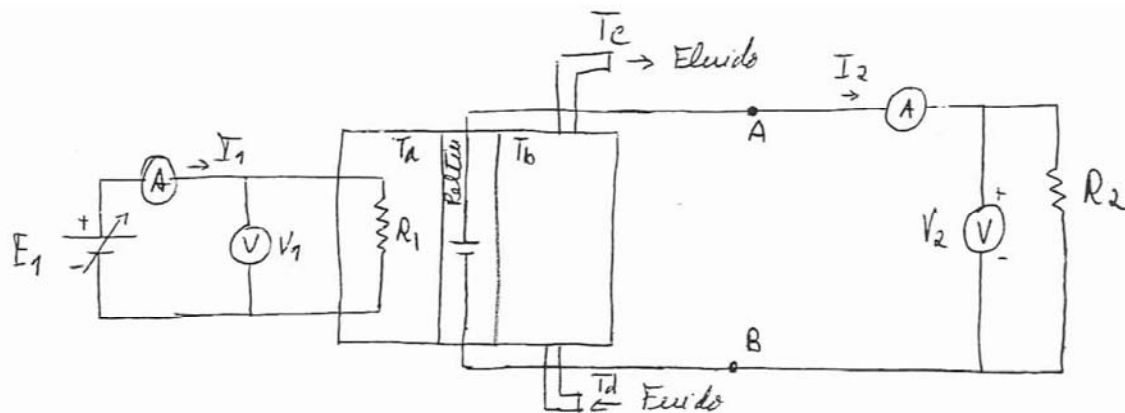


Figura 1: Esquema de montagem da primeira actividade

b) Calculou-se o valor de carga óptima, como descrito mais à frente e, com base neste valor, regulou-se R_2 para um valor tão próximo quanto possível do determinado teoricamente e em seguida regulou-se a fonte E_1 para 7 V medidos em V_1 . Este valor é aproximadamente o mesmo que E_1 , uma vez que a queda de tensão aos terminais do amperímetro é muito pequena. Aguardou-se que fosse atingido o equilíbrio térmico e registaram-se todos os valores de temperatura, tensão e corrente. Repetiu-se o processo para os 10 V, 13 V e 16 V regulados em E_1 . Com base neste valores preencheu-se a Tabela 3.

c) Procedeu-se então à anulação da resistência de carga R_2 interrompendo o circuito. Em seguida, ajustou-se a fonte de tensão E_1 para obter em T_a uma temperatura igual à medida na alínea anterior quando E_1 estava regulada para 7 V. Novamente, após estabilizados os valores, registaram-se todas as grandezas envolvidas e repetiu-se o processo para um valor de T_a equivalente ao medido quando E_1 fornecia 16 V. Os dados medidos foram introduzidos na Tabela 4.

Análise de Resultados

a) Com base nos valores recolhidos na Tabela 2, foi possível determinar o valor da resistência interna do amperímetro e assim levá-la em conta nos cálculos, uma vez que os efeitos desta não são desprezáveis. Foi possível determinar assim, a resistência interna do amperímetro nos dois ensaios realizados (Tabela 5). Tomou-se a resistência do amperímetro como sendo a média dos dois valores e usou-se o erro máximo:

$$R_{Amp} = \frac{V_{ab} - V_2}{I_2};$$

$$\varepsilon_{R_{Amp}} = \left| \frac{1}{I_2} \right| \cdot \varepsilon_{V_{ab}} + \left| -\frac{1}{I_2} \right| \cdot \varepsilon_{V_2} + \left| \frac{V_2 - V_{ab}}{I_2^2} \right| \cdot \varepsilon_{I_2}.$$

Procedeu-se então ao cálculo da resistência de carga óptima (Tabela 6), conforme indicado no protocolo experimental:

$$R_{2\acute{o}ptimo} = \frac{5 \cdot I_{25} - 2 \cdot I_{22}}{I_{22} - I_{25}} - 2 \cdot R_{Amp};$$

$$\varepsilon_{R_{2\acute{o}ptimo}} = \left| \frac{3 \cdot I_{25}}{(I_{22} - I_{25})^2} \right| \cdot \varepsilon_{I_{22}} + \left| \frac{3 \cdot I_{22}}{(I_{22} - I_{25})^2} \right| \cdot \varepsilon_{I_{25}} + \cdot 2 \cdot \varepsilon_{R_{Amp}}.$$

b) Partindo dos valores registados na Tabela 3, foi possível calcular a potência fornecida à fonte quente (Tabela 7) para cada umas tensões impostas em E_1 :

$$P_{FQ} = V_1 \cdot I_1;$$

$$\varepsilon_{P_{FQ}} = |I_1| \cdot \varepsilon_{V_1} + |V_1| \cdot \varepsilon_{I_1}.$$

Tal acontece, pois R_1 encontra-se em contacto com a fonte quente e o trabalho eléctrico que esta produz irá aquecer a fonte. Isto supondo que toda potência da carga R_1 irá actuar na fonte quente aumentando a sua temperatura.

Em seguida, calcularam-se as potências extraídas aos terminais do conversor termoelétrico (Tabela 8). A célula de Peltier irá realizar trabalho elétrico que é recebido pela resistência R_2 . No entanto, a existência de um amperímetro em série para a medição de I_2 , altera significativamente a resistência total do circuito. Isto pois a R_{Amp} é considerável quando comparada com R_2 :

$$P_{Conv} = V_{ab} \cdot I_2 = (R_{Amp} + R_2) \cdot I_2^2;$$

$$\varepsilon_{P_{Conv}} = \left| I_2^2 \right| \cdot \varepsilon_{R_2} + \left| I_2^2 \right| \cdot \varepsilon_{R_{Amp}} + \left| 2 \cdot I_2 \cdot (R_2 + R_{Amp}) \right| \cdot \varepsilon_{I_2}.$$

Usaram-se as resistências para o cálculo da potência e não a tensão V_{ab} , uma vez que não se mediu o seu valor (a grandeza medida no multímetro foi V_2).

Era ainda necessário determinar a potência dissipada na fonte fria, para a qual era preciso o conhecimento prévio do caudal do fluido de refrigeração (Tabela 1). É importante referir que não se mediu a massa da água como indicada na fórmula e na tabela, mas sim o volume desta em ml . No entanto, como a massa volúmica da água é de aproximadamente 1 g.cm^{-3} , é fácil determinar a sua massa.

$$C = \frac{mH_2O}{t_{caudal}};$$

$$\varepsilon_C = \left| \frac{1}{t_{caudal}} \right| \cdot \varepsilon_{mH_2O} + \left| \frac{mH_2O}{t_{caudal}^2} \right| \varepsilon_{tcaudal}.$$

Assim, com base no caudal e na variação da temperatura do fluido de refrigeração ao atravessar a célula, determinou-se a potência dissipada no processo de refrigeração (Tabela 9) segundo a relação abaixo, na qual c representa a capacidade calorífica da água (1 cal/g°).

$$P_{FF} = \frac{dQ}{dt} = C \cdot c \cdot \Delta T;$$

$$\varepsilon_{P_{FF}} = \left| \Delta T \cdot c \right| \cdot \varepsilon_C + \left| C \cdot c \right| \cdot \varepsilon_{\Delta T}.$$

Esta fórmula é válida, uma vez que a fonte fria se encontra em contacto com a água de circulação e vai ser responsável pelo aquecimento desta através da rejeição de calor.

Se estivessemos perante uma ausência total de perdas, a potência da fonte quente seria igual à soma da potência rejeitada para a fonte fria e com a potência realizada pelo conversor. No entanto, tal não acontece, sendo por isso possível estimar as perdas do sistema:

$$P_{Perdas} = P_{FQ} - P_{FF} - P_{Conv};$$

$$\varepsilon_{P_{Perdas}} = \varepsilon_{P_{FQ}} + \varepsilon_{P_{FF}} + \varepsilon_{P_{Conv}} .$$

Uma vez calculadas todas as potências envolvidas, foi possível determinar o rendimento real do conversor (η_1), numa abordagem bastante simplista do problema, isto é, considerando apenas a potência fornecida pela fonte quente e a potência extraída do conversor:

$$\eta_1 = \frac{P_{Conv}}{P_{FQ}} ;$$

$$\varepsilon_{\eta_1} = \left| \frac{1}{P_{FQ}} \right| \cdot \varepsilon_{P_{Conv}} + \left| \frac{P_{Conv}}{P_{FQ}^2} \right| \cdot \varepsilon_{P_{FQ}} .$$

Esta abordagem pressupõe um funcionamento ideal do conversor, isto é, assume que a potência da fonte quente é simplesmente repartida pelo aquecimento da fonte fria ou para criar a diferença de potencial aos terminais do conversor. Por outras palavras, não entra em consideração com as perdas calculadas anteriormente.

Naturalmente, se tomarmos a potência da fonte quente como a soma das duas outras potências acima referidas, obtém-se um rendimento mais favorável, isto é:

$$\eta_2 = \frac{P_{Conv}}{P_{Conv} + P_{FF}} ,$$

$$\varepsilon_{\eta_2} = \left| \frac{P_{FF}}{(P_{FF} + P_{Conv})^2} \right| \cdot \varepsilon_{P_{Conv}} + \left| \frac{P_{Conv}}{(P_{FF} + P_{Conv})^2} \right| \cdot \varepsilon_{P_{FF}} .$$

No entanto, qualquer um destes rendimentos, fica muito abaixo do rendimento teórico para uma máquina funcionando num ciclo reversível, em todas as condições de funcionamento:

$$\eta_{t\acute{e}orico} = 1 - \frac{T_b}{T_a} ,$$

$$\varepsilon_{\eta_{t\acute{e}orico}} = \left| \frac{1}{T_a} \right| \cdot \varepsilon_{T_b} + \left| \frac{T_b}{T_a^2} \right| \cdot \varepsilon_{T_a} .$$

As perdas e os vários rendimentos obtidos encontram-se na Tabela 10.

c) O facto de η_1 ser diferente de η_2 é uma evidência clara de que P_{FQ} é diferente da soma de P_{FF} com P_{Conv} e, uma vez que η_2 ainda se encontra bastante abaixo do rendimento ideal de Carnot, conclui-se imediatamente que existe dissipação de energia não contabilizada. A diferença de potencial medida nas zonas de junção dos diferentes metais, gerada pela diferença de temperatura a que estão

submetidos, permite a troca de calor através da condução de calor (e não exclusivamente através do efeito de Peltier, como seria de esperar num conversor ideal), uma vez que existe contacto físico entre a fonte quente e fria.

Ora, por forma a medirmos esta dissipação de energia não desejada, basta anular a corrente I_2 . Desta forma, anulamos o efeito de Peltier e garantimos que a transferência de calor se deve única e exclusivamente aos processos condutivos. Assim, uma vez garantido que as temperaturas na fonte quente são iguais às medidas anteriormente, é possível calcular a potência dissipada desta forma (P'_{FF}) (Tabela 11):

$$P'_{FF} = \frac{dQ}{dt} = C \cdot c \cdot \Delta T ;$$

$$\varepsilon_{P'_{FF}} = |\Delta T \cdot c| \cdot \varepsilon_C + |C \cdot c| \cdot \varepsilon_{\Delta T} .$$

Desta forma, é possível obter uma nova estimativa de rendimento desprezando a potência transmitida para a fonte fria por fenómenos condutivos. Este valor, supostamente estará mais próximo do previsto teóricamente (Tabela 12):

$$\eta_3 = \frac{P_{Conv}}{P_{Conv} + P_{FF} - P'_{FF}} ;$$

$$\varepsilon_{\eta_3} = \left| \frac{P_{FF} - P'_{FF}}{(P_{FF} + P_{Conv} - P'_{FF})^2} \right| \cdot \varepsilon_{P_{Conv}} + \left| \frac{P_{Conv}}{(P_{FF} + P_{Conv} - P'_{FF})^2} \right| \cdot (\varepsilon_{P_{FF}} + \varepsilon_{P'_{FF}}) .$$

Finalmente, foi possível estimar a resistência térmica entre as duas fontes para ambos os ensaios (Tabela 13):

$$R_{Térmica} = \frac{T_a - T_b}{P'_{FF}} ;$$

$$\varepsilon_{R_{Térmica}} = \left| \frac{T_a - T_b}{P'_{FF}{}^2} \right| \cdot \varepsilon_{P'_{FF}} + \left| \frac{1}{P'_{FF}} \right| \cdot (\varepsilon_{T_a} + \varepsilon_{T_b}) .$$

O valor considerado foi a média dos dois ensaios e tomou-se o erro máximo.

Procedimento Experimental

Após o estudo do conversor como máquina térmica, foi-se estudar o seu funcionamento como bomba de calor.

Substituiu-se a carga R_2 por uma fonte de tensão E_2 , em série com uma resistência de $10\ \Omega$, tal como indicado na Figura 2. A polaridade de E_2 deve assegurar que vai ser cedida uma potência à célula de Peltier, continuando esta a fluir no mesmo sentido que na actividade anterior.

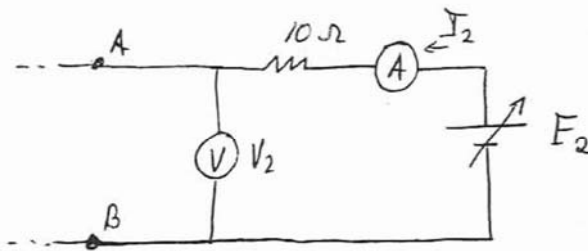


Figura 2: Injecção de corrente na célula de Peltier

Regulando E_2 de forma a que I_2 seja $0,5A$, verificou-se que a temperatura T_a começou a descer gradualmente. De seguida, aplicou-se E_1 à resistência R_1 , de forma a estabilizar T_a em cerca de $23^\circ C$. Quando foi atingido o equilíbrio térmico, registaram-se todas as grandezas envolvidas e repetiu-se o processo para um I_2 de $0,3A$ (Tabela 14).

Análise de Resultados

Calculou-se a potência de arrefecimento (Tabela 15), responsável por manter T_a constante, da mesma forma que se tinha calculado a potência da fonte quente na actividade anterior e a potência dissipada para a fonte fria também idênticamente ao caso anterior (Tabela 16). A potência fornecida à célula de Peltier por intermédio de E_2 pode ser facilmente calculada (Tabela 17):

$$P_{Fornecida} = V_2 \cdot I_2 ;$$

$$\mathcal{E}_{P_{Fornecida}} = |I_2| \cdot \mathcal{E}_{V_2} + |V_2| \cdot \mathcal{E}_{I_2} .$$

A eficiência é obtida, achando a razão entre estas duas quantidades.

$$eff = \frac{P_{FF}}{P_{Fornecida}} ;$$

$$\varepsilon_{eff} = \left| \frac{P_{FF}}{P_{Fornecida}} \right|^2 \cdot \varepsilon_{PFornecida} + \left| \frac{1}{P_{Fornecida}} \right| \cdot \varepsilon_{P_{FF}} \cdot$$

A eficiência teórica de um ciclo reversível (Tabela 18) é dada por:

$$eff = \frac{Tb}{Tb - Ta} ;$$

$$\varepsilon_{eff} = \left| \frac{Tb}{(Tb - Ta)^2} \right| \cdot \varepsilon_{Ta} + \left| \frac{Tb}{(Tb - Ta)^2} \right| \cdot \varepsilon_{PTb} \cdot$$

A primeira parte da presente experiência tinha como objectivo o estudo do funcionamento da célula de Peltier como máquina térmica.

Logo no princípio da actividade calculou-se a resistência interna do amperímetro. Foi obtido o valor de $1,19 \pm 0,547 \Omega$, o que evidencia uma elevada imprecisão (desvio à precisão de 46,0%). Esta imprecisão na determinação da grandeza ficou-se a dever a um cancelamento substractivo que ocorre quando se calcula a fórmula de erro, cancelamento este que resulta do facto de V_{AB} e V_2 serem muito parecidos. De seguida, estimou-se a resistência de carga óptima, obtendo-se o valor de $3,18 \pm 1,19 \Omega$. Novamente, teve-se uma elevada imprecisão (desvio de 37,4%) que se deve, sobretudo, à imprecisão do cálculo de R_{Amp} . Destes dois valores pode-se reparar que estaríamos a cometer um erro experimental considerável se desprezássemos a resistência interna do amperímetro uma vez que esta representa 37,4% do valor óptimo da carga R_2 . É ainda importante referir que o valor de carga óptimo usado no resto da actividade foi de $3,2 \Omega$ e não $3,18 \Omega$, dada a precisão do instrumento de leitura. No entanto, este valor encontra-se perfeitamente dentro do margem de valores cobertos pelo erro estimado. A grande imprecisão na determinação da resistência óptima, tem consequências importantes no resto da experiência uma vez que o valor utilizado pode estar bastante afastado do valor óptimo real.

Observou-se que com o aumento de E_1 , que se traduz num aumento de V_1 , todas as potências em questão (P_{FF} , P_{FQ} , P_{Conv}) também aumentaram o que não poderia deixar de acontecer. Os erros das potências da fonte quente são muito baixos (desvios à precisão menores que 0,5%) uma vez que esta grandeza é determinada dos valores de V_1 e I_1 , que apresentam erros muito pequenos. Já a potência do conversor, apresenta um erro superior (desvios entre 12,6% e 14%). Tal facto, fica-se a dever ao elevado erro da resistência interna do amperímetro, que entra no cálculo de P_{Conv} . Por último, a P_{FF} apresenta desvios à precisão bastante variados (entre 34,78% e 6%). O que contribuiu para esta diversificação de valores é o erro relativo da diferença de temperatura $T_c - T_d$ que é muito elevado para valores baixos desta (o erro relativo máximo ocorre quando a tensão fornecida por E_1 é 7V).

Ao comparar os valores das potências, é imediatamente visível, a presença de perdas uma vez que não se verifica a igualdade:

$$P_{FQ} = P_{FF} + P_{Conv}$$

As perdas foram tanto maiores como mais altas eram as temperaturas da fonte quente, o que seria de esperar, uma vez que ao trabalharmos com energias mais altas, a quantidade desta que é perdida também será maior. Obtiveram-se perdas entre 48,8% (quando $E_1=7v$) e 27,4% ($E_1=16V$) da potência da fonte quente. Assim, concluí-se que apesar da quantidade de energia perdida aumentar, a percentagem em relação à energia total diminui significativamente para temperaturas mais elevadas.

Em relação aos rendimentos obtidos, verificou-se que com o aumento de temperatura estes, sem excepção, subiram todos. Deste resultado pode-se, então, concluir que o conversor funciona de modo mais eficaz a temperaturas mais elevadas. Tal facto, está de acordo com os resultados teóricos como pode ser observado da comparação dos rendimentos teóricos. Os rendimentos teóricos são calculados, supondo que todas as transformações são reversíveis e que não ocorrem perdas de energia (Ciclo de Carnot). Estes últimos rendimentos irão, então, majorar os rendimentos experimentais.

Quando comparados, os sucessivos rendimentos experimentais, verificou-se que estes se aproximaram dos rendimentos teóricos à medida que eram tomadas em consideração as várias perdas, nunca os atingindo. Para todos os valores de temperatura constatou-se que $\eta_2 > \eta_1$, como não poderia deixar de ser. No entanto, este segundo valor de rendimento ainda se encontra bastante afastado do rendimento teórico máximo. Tal ficou-se a dever ao facto de nem todo o calor recebido na fonte fria provir de efeitos termoeléctricos do ciclo em questão, mas também de condução entre fontes. Assim, estimou-se um terceiro rendimento que já entrava em consideração com estas trocas de calor. Este terceiro rendimento já é bastante mais próximo do teórico sendo 51,8% deste para o valor da temperatura da fonte quente mais baixo e 94,5% para o valor de temperatura mais elevado.

É importante destacar a elevadíssima imprecisão com que se estimaram os valores de η_3 . Tal ficou-se a dever aos erros elevados de P_{FF} e P'_{FF} que por sua vez devem-se aos erros da diferença de temperaturas entre $T_c - T_d$. Os erros desta diferença de temperaturas são muito elevados quando comparados com o seu valor o que contribui para a elevada imprecisão da medição. Esta imprecisão poderia ser atenuada se o instrumento de medida em questão (termómetro) tivesse mais algarismos significativos.

Estimou-se ainda o valor da resistência térmica entre as fontes, com base no calor que foi trocado entre estas por fenómenos condutivos obtendo-se um valor de $5,546 \pm 3,716$ K/W (o que representa um desvio à precisão de 67,0%). A elevada imprecisão desta grandeza tem a mesma origem que na determinação de η_3 .

Na segunda actividade procurou-se estudar a célula de Peltier em questão como bomba de calor em dois ensaios distintos.

Verificou-se que a potência de arrefecimento era tanto maior como a corrente injectada na célula, como seria de esperar, uma vez que se está a realizar maior trabalho eléctrico sobre a bomba. Os seus erros são muito baixos, dado que esta grandeza depende apenas de V_1 e I_1 , que por sua vez são medidos com bastante precisão. A potência da fonte fria também aumentou com o aumento do trabalho realizado sobre a célula sendo os seus erros mais significativos que no caso anterior. Tal deve-se a uma maior imprecisão com que são determinadas as diferenças de temperaturas que entram no cálculo desta grandeza.

Quando se considera o balanço energético total, verifica-se que, em ambos os ensaios, existem perdas energéticas, uma vez que não se verifica a seguinte relação:

$$P_{FF} = P_{FQ} + P_{Fornecida}$$

No entanto, as perdas energéticas não são tão grandes como na actividade anterior (no ensaio com uma maior corrente injectada representam 12,3 % da soma da potência da fonte quente com a potência eléctrica fornecida à célula e no outro ensaio 5,84%).

Constatou-se que a eficiência da bomba de calor foi superior no 2º ensaio, corrente injectada na célula menor, uma vez que a temperatura da fonte fria era mais baixa e portanto a diferença de temperaturas entre as fontes menor. Os erros das eficiências são significativos devido à imprecisão da determinação da diferença de temperaturas.

Em ambos os ensaios verificou-se que a eficiência era superior a 1 mas, bastante inferior à eficiência obtida quando considerado o ciclo reversível (cerca de 4,94% do valor desta quando a corrente injectada era 0,5 A e 3,30% quando $I = 0,3A$).

Conclusões

Este trabalho tinha como objectivos, o estudo de uma célula de Peltier como máquina térmica e como bomba de calor. O comportamento do conversor é em tudo semelhante ao de um motor vulgar, como por exemplo o motor de Stirling. Assim estudou-se o seu rendimento como máquina térmica e a sua eficiência como bomba de calor.

De uma maneira geral, pode dizer-se que os resultados obtidos estão dentro do esperado, não tendo ocorrido nenhum problema durante as medições.

Em relação ao funcionamento da célula como máquina térmica observou-se que esta apresenta rendimentos muito baixos. Mesmo os rendimentos teóricos mais optimistas, ciclo reversível, apresentam valores inferiores a 10%.

No entanto, como bomba de calor apresenta eficiências superiores a 1 (4,623 num ensaio e 8,927 noutra) o que justifica a sua utilização. Constatou-se que se não se fornecesse uma potência à fonte quente, a temperatura desta começava a descer rapidamente, atingindo-se mesmo temperaturas negativas.

Em ambos os casos, é importante referir que os rendimentos (ou eficiências) obtidos se encontram muito longe dos máximos teóricos. Tal fica-se a dever a perdas de energia, que ocorrem sobretudo sob a forma de calor uma vez que o conversor em questão elimina quase por completo as perdas por atrito. Além disso, as transformações que ocorrem são de carácter irreversível, conduzindo a um aumento da entropia.

Apesar dos resultados satisfatórios deverão ser tomadas em conta as seguintes fontes de erro:

- Os tempos de espera para se efectuarem as medições podem não ter sido suficientes para que se atingisse o equilíbrio térmico;
- Alguns valores de tensão lidos no multímetro oscilavam entre uma gama de valores;
- A própria precisão dos instrumentos, sobretudo a dos termómetros. Nestes últimos sempre que era considerada uma diferença de temperaturas tinha-se um erro na mesma ordem de grandeza que o próprio valor;
- Verificou-se que o caudal mudou entre o início da experiência e o final. Esta variação do caudal tem consequências na determinação dos calores dissipados para a fonte fria.

Bibliografia

- Aulas teóricas e protocolo do Professor Figueirinhas;
- Thermoelectrics : basic principles and new materials developments, G.S. Nolas, J. Sharp, H.J. Goldsmid
- www.wikipedia.org

m_{H_2O} (g)	ϵm_{H_2O} (g)	t_{caudal} (s)	$t_{caudal\ médio}$ (s)	ϵt_{caudal} (s)	C (g/s)	ϵC (g/s)
100,0	1,0	101,9	102,4	0,5	0,9770	0,01454
		101,3				
		103,5				
		102,7				

Tabela 1 - Cálculo do Caudal

R_2 (Ω)	T_a ($^{\circ}C$)	T_b ($^{\circ}C$)	T_c ($^{\circ}C$)	T_d ($^{\circ}C$)	$\epsilon_{T_{a-d}}$ ($^{\circ}C$)	V_{AB} (V)	$\epsilon_{V_{AB}}$ (V)	V_1 (V)	ϵ_{V_1} (V)	V_2 (V)	ϵ_{V_2} (V)	I_1 (mA)	ϵ_{I_1} (mA)	I_2 (mA)	ϵ_{I_2} (mA)
5	37,2	24,0	20,8	20,4	0,05	0,289	0,015	9,875	0,003	0,234	0,012	482	1	45,9	0,1
2	37,6	24,7	21,4	20,9	0,05	0,210	0,010	10,080	0,006	0,134	0,012	493	1	64,1	0,1

Tabela 2 - Registo das temperaturas, tensões e correntes para diferentes resistências de carga

V_{E1} (V)	T_a ($^{\circ}C$)	T_b ($^{\circ}C$)	T_c ($^{\circ}C$)	T_d ($^{\circ}C$)	$\epsilon_{T_{a-d}}$ ($^{\circ}C$)	V_1 (V)	ϵ_{V_1} (V)	V_2 (V)	ϵ_{V_2} (V)	I_1 (mA)	ϵ_{I_1} (mA)	I_2 (mA)	ϵ_{I_2} (mA)
7	27,4	20,5	18,4	18,1	0,05	6,994	0,011	0,085	0,002	343	1	30,4	0,1
10	36,2	23,0	19,2	18,4	0,05	10,033	0,008	0,164	0,004	489	1	58,5	0,1
13	47,9	26,2	20,0	18,6	0,05	13,012	0,009	0,267	0,001	634	1	96,4	0,1
16	62,3	29,7	20,7	18,5	0,05	16,016	0,012	0,397	0,003	780	1	139,3	0,1

Tabela 3 - Registo das temperaturas, tensões e correntes para diferentes tensões de funcionamento

T_a ($^{\circ}C$)	T_b ($^{\circ}C$)	T_c ($^{\circ}C$)	T_d ($^{\circ}C$)	$\epsilon_{T_{a-d}}$ ($^{\circ}C$)	V_1 (V)	ϵ_{V_1} (V)	V_2 (V)	ϵ_{V_2} (V)	I_1 (mA)	ϵ_{I_1} (mA)	I_2 (mA)	ϵ_{I_2} (mA)
26,4	20,7	18,9	18,7	0,05	6,16	0,03	0,238	0,002	300	1	0	0
62,3	28,7	21,0	19,0	0,05	14,60	0,01	1,240	0,001	729	1	0	0

Tabela 4 - Registo das temperaturas, tensões e correntes para diferentes temperaturas da fonte quente

R_2 (Ω)	V_{AB} (V)	$\epsilon_{V_{AB}}$ (V)	V_2 (V)	ϵ_{V_2} (V)	I_2 (mA)	ϵ_{I_2} (mA)	R_{Amp} (Ω)	$\epsilon_{R_{Amp}}$ (Ω)	$R_{Amp\ médio}$ (Ω)	$\epsilon_{R_{Amp\ médio}}$ (Ω)
5	0,289	0,014	0,234	0,011	45,9	0,1	1,20	0,547	1,19	0,547
2	0,210	0,009	0,134	0,013	64,1	0,1	1,19	0,345		

Tabela 5 - Cálculo da Resistência Interna Média do Amperímetro

$R_2 = 5 \Omega$		$R_2 = 2 \Omega$		$R_{\text{Amp médio}} (\Omega)$	$\epsilon_{R_{\text{Amp médio}}} (\Omega)$	$R_{\text{óptimo teórico}} (\Omega)$	$\epsilon_{R_{\text{óptimo teórico}}} (\Omega)$
I_2 (mA)	ϵ_{I_2} (mA)	I_2 (mA)	ϵ_{I_2} (mA)				
45,9	0,1	64,1	0,1	1,19	0,547	3,18	1,194

Tabela 6 - Cálculo da Resistência Ótima Teórica

V_{E1} (V)	V_1 (V)	ϵ_{V1} (V)	I_1 (mA)	ϵ_{I1} (mA)	P_{FQ} (W)	ϵ_{PFQ} (W)
7	6,994	0,011	343	1	2,399	0,011
10	10,033	0,008	489	1	4,9061	0,014
13	13,012	0,009	634	1	8,2496	0,019
16	16,016	0,012	780	1	12,492	0,025

Tabela 7 - Cálculo da potência fornecida à fonte quente por E_1

V_{E1} (V)	$R_{\text{Amp médio}} (\Omega)$	$\epsilon_{R_{\text{Amp médio}}} (\Omega)$	$R_2 (\Omega)$	$\epsilon_{R_2} (\Omega)$	I_2 (mA)	ϵ_{I_2} (mA)	$P_{\text{Conv}} (W)$	$\epsilon_{P_{\text{Conv}}} (W)$
7	1,19	0,547	3,2	0,05	30,4	0,1	0,00406	0,000579
10	1,19	0,547	3,2	0,05	58,5	0,1	0,0150	0,00210
13	1,19	0,547	3,2	0,05	96,4	0,1	0,0408	0,00564
16	1,19	0,547	3,2	0,05	139,3	0,1	0,08522	0,01171

Tabela 8 - Cálculo da potência fornecida pelo conversor termoelectrico

V_{E1} (V)	C (g/s)	ϵ_C (g/s)	T_c (°C)	T_d (°C)	ϵ_{T_c-d} (°C)	ΔT (C)	$\epsilon_{\Delta T}$ (C)	P_{FF} (cal/s)	$\epsilon_{P_{FF}}$ (cal/s)	P_{FF} (W)	$\epsilon_{P_{FF}}$ (W)
7	0,9770	0,01454	18,4	18,1	0,05	0,3	0,1	0,2931	0,1021	1,225	0,4266
10			19,2	18,4	0,05	0,8	0,1	0,7816	0,1093	3,267	0,4570
13			20,0	18,6	0,05	1,4	0,1	1,368	0,1181	5,718	0,4935
16			20,7	18,5	0,05	2,2	0,1	2,149	0,1297	8,985	0,5421

Tabela 9 - Cálculo da potência dissipada para a fonte fria

P_{FQ} (W)	ϵ_{PFQ} (W)	P_{Conv} (W)	$\epsilon_{P_{\text{Conv}}}$ (W)	P_{FF} (W)	$\epsilon_{P_{FF}}$ (W)	P_{perdas} (W)	$\epsilon_{P_{\text{perdas}}}$ (W)	T_a (°C)	T_b (°C)	ϵ_{T_a-d} (°C)	η_1 (%)	ϵ_{η_1} (%)	η_2 (%)	ϵ_{η_2} (%)	$\eta_{\text{teórico}}$ (%)	$\epsilon_{\eta_{\text{teórico}}}$ (%)
2,399	0,011	0,00406	0,000579	1,225	0,4266	1,16968	0,437985677	27,4	20,5	0,05	0,1692	0,0248816	0,3302	0,1615	2,30	0,319
4,9061	0,014	0,01503	0,00210	3,267	0,4570	1,62389	0,473076164	36,2	23,0	0,05	0,30636	0,04358061	0,4579	0,1273	4,27	0,226
8,2496	0,019	0,04081	0,00564	5,718	0,4935	2,49116	0,517863787	47,9	26,2	0,05	0,49474	0,06943016	0,7088	0,1579	6,76	0,161
12,492	0,025	0,08522	0,01171	8,985	0,5421	3,42240	0,579232033	62,3	29,7	0,05	0,68220	0,09513924	0,9396	0,1841	9,72	0,119

Tabela 10 - Comparação e cálculo dos rendimentos para as várias potências

C (g/s)	ϵ_C (g/s)	T_c (°C)	T_d (°C)	ϵ_{Tc-d} (°C)	ΔT (°C)	$\epsilon_{\Delta T}$ (°C)	P'_{FF} (cal/s)	$\epsilon_{P'_{FF}}$ (cal/s)	P'_{FF} (W)	$\epsilon_{P'_{FF}}$ (W)
0,9770	0,0145	18,9	18,7	0,05	0,2	0,1	0,1954	0,1006	0,8168	0,4206
		21,0	19,0	0,05	2,0	0,1	1,954	0,1268	8,168	0,5300

Tabela 11 - Cálculo da energia dissipada para a fonte fria apenas por processos condutivos

P_{Conv} (W)	$\epsilon_{P_{Conv}}$ (W)	P_{FF} (W)	$\epsilon_{P'_{FF}}$ (W)	P'_{FF} (W)	$\epsilon_{P'_{FF}}$ (W)	η_3 (%)	ϵ_{η_3} (%)	$\eta_{teórico}$ (%)	$\epsilon_{\eta_{teórico}}$ (%)
0,00406	0,00058	1,225	0,427	0,8168	0,4206	0,9841	2,160	1,90	0,00338
0,08522	0,01171	8,985	0,542	8,168	0,5300	9,4480	12,405	10,0	0,00117

Tabela 12 - Cálculo e comparação do rendimento mais aproximado com o teórico

T_a (°C)	T_b (°C)	ϵ_{T_a-d} (°C)	P'_{FF} (W)	$\epsilon_{P'_{FF}}$ (W)	$R_{t\acute{e}rmica}$ (K/W)	$\epsilon_{R_{t\acute{e}rmica}}$ (K/W)	$R_{t\acute{e}rmica}$ médio (K/W)	$\epsilon_{R_{t\acute{e}rmica}}$ médio (K/W)
26,4	20,7	0,05	0,8168	0,4206	6,978	3,716	5,546	3,716
62,3	28,7	0,05	8,168	0,5300	4,114	0,279		

Tabela 13 - Cálculo da resistência térmica

T_a (°C)	T_b (°C)	T_c (°C)	T_d (°C)	ϵ_{T_a-d} (°C)	R_2 (Ω)	V_{Ez} (V)	ϵ_{VEz} (V)	V_1 (V)	ϵ_{V1} (V)	V_2 (V)	ϵ_{V2} (V)	I_1 (mA)	ϵ_{I1} (mA)	I_2 (mA)	ϵ_{I2} (mA)
23,1	26,3	20,4	19,2	0,05	10	7,20	0,005	9,631	0,004	2,12	0,01	470	1	500	0,5
23,1	24,2	20,0	19,4	0,05	10	4,26	0,005	7,959	0,004	1,22	0,01	390	1	300	0,5

Tabela 14 - Registo das temperaturas, tensões e correntes para diferentes tensões de alimentação da célula de Peltier

V_1 (V)	ϵ_{V1} (V)	I_1 (mA)	ϵ_{I1} (mA)	$P_{arrefecimento}$ (W)	$\epsilon_{Parrefecimento}$ (W)
9,631	0,004	470	1	4,527	0,01151
7,959	0,004	390	1	3,104	0,009519

Tabela 15 - Cálculo da potência de arrefecimento

V_1 (V)	C (g/s)	ϵC (g/s)	T_c (°C)	T_d (°C)	ϵ_{T_c-d} (°C)	ΔT (°C)	$\epsilon_{\Delta T}$ (°C)	P_{FF} (cal/s)	ϵ_{PFF} (cal/s)	P_{FF} (W)	ϵ_{PFF} (W)
9,631	0,9770	0,0145	20,4	19,2	0,05	1,2	0,1	1,172	0,1152	4,901	0,4814
7,959			20,1	19,3	0,05	0,8		0,7816	0,1093	3,2672	0,4570

Tabela 16 - Cálculo da potência dissipada para a fonte fria

V_2 (V)	ϵ_{V2} (V)	I_2 (mA)	ϵ_{I2} (mA)	$P_{fornecida}$ (W)	$\epsilon_{Pfornecida}$ (W)
2,12	0,01	500	0,5	1,06	0,00606
1,22	0,01	300	0,5	0,366	0,00361

Tabela 17 - Cálculo da potência fornecida à célula de Peltier

P_{FF} (W)	ϵ_{PFF} (W)	$P_{fornecida}$ (W)	$\epsilon_{Pfornecida}$ (W)	V_2 (V)	ϵ_{V2} (V)	I_2 (mA)	ϵ_{I2} (mA)	eff	ϵ_{eff}	eff _{teórica}	$\epsilon_{effteórica}$
4,901	0,481	1,06	0,00606	2,12	0,01	500	0,5	4,623	0,4805	93,58	2,91
3,2672	0,4570	0,366	0,00361	1,22	0,01	300	0,5	8,9268	1,3368	270,32	24,5

Tabela 18 - Cálculo da eficiência da célula e comparação com os valores teóricos