

T1 - Conversor Termoelétrico

Grupo III - João Ferreira (78179) Henrique Rodrigues (78632) Rodrigo C. Carvalho (78646) Cristina Melício (78947)
MEFT - 2º Ano, 2º Semestre - Laboratório de Complementos de Eletromagnetismo e Termodinâmica

Sexta-Feira, 13 de Março de 2015

Resumo

CRISTINA ou HENRIQUE

1 Introdução

O conversor termoelétrico é um dispositivo que permite criar uma diferença de potencial a partir de uma diferença de temperaturas, e vice-versa.

Os fenómenos que estão na explicação desta experiência são o efeito de *Seeback*, de *Peltier* e de *Thomson*. O efeito de *Seeback*, consiste em impor uma diferença de temperaturas entre as placas condutoras nas extremidades da célula, ΔT , de modo a obter uma diferença de potencial, V , estando estas relacionadas pelo coeficiente de *Seeback*:

$$S_{A,B} = \frac{V}{\Delta T} \quad (1)$$

onde A e B correspondem aos materiais das extremidades. Já o efeito de *Peltier* consiste em impor uma diferença de potencial á célula de modo a produzir um gradiente de temperatura entre as placas, estando a densidade de fluxo de calor, J_Q , relacionado com a corrente por unidade de área, J , pelo coeficiente de *Peltier*:

$$\Pi_{A,B} = \frac{J_{Q_A} - J_{Q_B}}{J} \quad (2)$$

A relação que se estabelece entre estes dois efeitos é conhecida pela Segunda Relação de Kelvin e é dada por:

$$\Pi_{A,B} = TS_{A,B} \quad (3)$$

Considera-se ainda o efeito de *Thomson* se existir gradiente do coeficiente de Seeback, ou seja, se não depender linearmente com a temperatura. Sendo assim, o coeficiente de *Thomson* é dado por:

$$\tau = \frac{\dot{q}_{Thomson}}{\vec{J} \cdot \vec{\nabla} T} \quad (4)$$

A relação dada pelos três efeitos, Primeira Relação de Kelvin, corresponde a:

$$\frac{d\Pi_{A,B}}{dT} + \tau_A - \tau_B = S_{A,B} \quad (5)$$

Nesta experiência o conversor termoelétrico tem por base uma célula de *Peltier* em contacto com duas placas condutoras de metais diferentes.

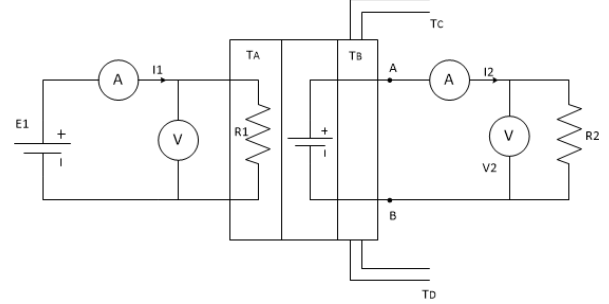
Na primeira parte o mecanismo, cujo esquema está representado na figura 1, é usado como máquina térmica, pelo que o seu rendimento é dado por:

$$\eta_1 = \frac{P_2}{P_1} \quad (6)$$

onde P_2 e P_1 são, respetivamente, a potência dissipada na resistência R_2 (ligada à célula) e a potência fornecida pela fonte quente E_1 , dadas pelas seguintes expressões:

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

$$P_2 = \frac{V_2^2}{R_{20}} \quad (8)$$



(Figura 1: Esquema da montagem da parte 1)

Para maximizar o rendimento determina-se a resistência de carga ótima, R_{20} para a qual a potência P_2 é máxima dada pela fórmula:

$$R_{20} = \frac{5I_{25} - 2I_{22}}{I_{22} - I_{25}} - 2R_a \quad (9)$$

onde R_a é a resistência interna do amperímetro obtida pela fórmula:

$$R_a = \frac{V_a}{I_2} \quad (10)$$

Uma vez que existem perdas de energia, nem toda a potência fornecida pela fonte quente chega à fonte fria ou é transformada pela célula em corrente, sendo necessário considerar também a potência retirada da fonte fria pelo fluido de arrefecimento, ou seja, P_3 que se obtém com seguinte equação:

$$P_3 = \dot{m}C(T_c - T_d) \quad (11)$$

(Onde $C = 4186 \text{ J kg}^{-1} \text{ K}^{-1}$ é a capacidade térmica mássica da água e \dot{m} é o caudal do fluido de arrefecimento dado por

$$\dot{m} = \frac{\rho V}{\Delta t} \quad (12)$$

sendo ρ a densidade da água)

Considerando uma potência dissipada dada por:

$$P_{diss} = P_1 - P_2 - P_3 \quad (13)$$

tem-se a primeira correção ao rendimento:

$$\eta_2 = \frac{P_2}{P_1 - P_{diss}} = \frac{P_2}{P_2 + P_3} \quad (14)$$

Para a última correção ao rendimento considera-se ainda que uma parte da potência passa da fonte quente para a fonte fria por condução através da célula fotovoltaica, obtendo a fórmula:

$$\eta_3 = \frac{P_2}{P_2 + P_3 - P_{3cond}} \quad (15)$$

De forma a calcular a potência dissipada por condução considera-se uma resistência térmica entre a fonte fria T_A e a quente T_B , cuja fórmula é:

$$R_T = \frac{T_A - T_B}{P_{3cond}} \quad (16)$$

Para avaliar o desempenho da máquina tem-se como referência o rendimento do motor reversível operando entre as temperaturas das fontes.

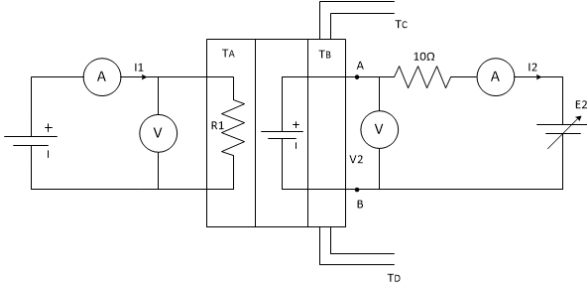
$$\eta_{Carnot} = 1 - \frac{T_B}{T_A} \quad (17)$$

Na segunda parte da experiência, com base no efeito de *Peltier*, o conversor, representado na figura 2, é utilizado como bomba de calor, sendo a eficiência determinada pela expressão:

$$\varepsilon = \frac{P_3}{P_2} \quad (18)$$

em que P_2 é a potência cedida pela fonte de tensão E_2 e é dada pela expressão:

$$P_2 = V_2 I_2 \quad (19)$$



(Figura 2: Esquema da montagem da parte 2)

A eficiência de referência é a da máquina de Carnot, cuja temperatura da fonte quente é T_A , e da fonte fria T_B , dada pela expressão:

$$\varepsilon_c = \frac{T_B}{T_B - T_A} \quad (20)$$

2 Dados Experimentais

Conversor termoeletrico como máquina térmica

Em primeiro lugar, pretendia-se determinar a resistência de carga ótima. Escolheu-se um valor de 5Ω para a resistência R_2 , e um valor de $10V$ para E_1 . Observou-se a evolução da temperatura nos quatro canais, e aguardou-se até à sua estabilização.

Devido à susceptibilidade de variação de caudal, foi-se calculando o seu valor sempre que se retiravam outros valores, através da expressão (12). Com um cronómetro mediu-se o tempo, e com uma proveta graduada mediu-se o volume de água.

Atingido o equilíbrio, registou-se as quatro temperaturas, as tensões V_1 e V_2 e as correntes I_1 e I_2 . Repetiu-se o processo para uma resistência $R_2 = 2\Omega$. Obtiveram-se os seguintes resultados:

	$R_2 = 5\Omega$	$R_2 = 2\Omega$
T_a ($^{\circ}C$)	40.89 ± 0.09	40.99 ± 0.09
T_b ($^{\circ}C$)	26.62 ± 0.04	27.07 ± 0.06
T_c ($^{\circ}C$)	20.25 ± 0.05	20.68 ± 0.06
T_d ($^{\circ}C$)	19.37 ± 0.03	19.65 ± 0.02
V_1 (V)	10.07 ± 0.01	10.7 ± 0.01
V_2 (V)	0.333 ± 0.001	0.261 ± 0.001
I_1 (mA)	501 ± 1	501 ± 1
I_2 (mA)	59.8 ± 0.5	73.3 ± 0.5
V_{amp} (V)	0.014 ± 0.002	0.016 ± 0.02
R_{amp} (Ω)	0.22 ± 0.04	0.22 ± 0.03
\dot{m} (g/s)	0.982 ± 0.004	0.976 ± 0.003

Tabela 1: Parâmetros necessários ao cálculo da resistência de carga ótima)

O valor de R_{amp} foi calculado a partir de:

$$R_{amp} = \frac{V_{amp}}{I_2} \quad (21)$$

De seguida, foi possível obter a resistência de carga ótima através da expressão (9):

R_o (Ω)	11.1 ± 1.2
--------------------	----------------

Como este valor excedia o valor máximo de 10Ω permitido pela resistência variável R_2 , utilizou-se $R_2 = 10\Omega$.

Pretendia-se agora analisar o rendimento do conversor, bem como a sua variação em função da temperatura da fonte quente.

Para diferentes valores de E_1 , registou-se o caudal e, após o equilíbrio, as temperaturas, tensões, e correntes indicadas. Obtiveram-se os seguintes resultados:

E_1 (V)	7.00 ± 0.01	10.07 ± 0.01	13.01 ± 0.01	15.99 ± 0.01
T_a ($^{\circ}C$)	31.99 ± 0.04	42.51 ± 0.08	59.02 ± 0.02	76.9 ± 0.1
T_b ($^{\circ}C$)	24.40 ± 0.02	27.53 ± 0.06	34.75 ± 0.04	40.48 ± 0.05
T_c ($^{\circ}C$)	21.02 ± 0.03	21.17 ± 0.02	24.34 ± 0.05	26.1 ± 0.1
T_d ($^{\circ}C$)	20.34 ± 0.02	20.07 ± 0.02	21.51 ± 0.02	20.6 ± 0.5
V_2 (mV)	236 ± 1	437 ± 1	714 ± 1	1054 ± 1
I_1 (mA)	350 ± 1	501 ± 1	647 ± 1	793 ± 1
I_2 (mA)	20.7 ± 0.2	41.6 ± 0.2	68.5 ± 0.2	101.3 ± 0.2
\dot{m} (g/s)	0.72 ± 0.02	0.85 ± 0.02	0.68 ± 0.02	0.67 ± 0.02
P_1 (W)	2.45 ± 0.01	5.05 ± 0.02	8.42 ± 0.02	12.68 ± 0.02
P_2 (mW)	4.3 ± 0.3	17 ± 1	47 ± 3	103 ± 6
P_3 (W)	1.5 ± 0.2	3.9 ± 0.2	4.6 ± 0.2	7.6 ± 0.3

(Tabela 2: Parâmetros necessários ao cálculo do rendimento)

A partir das expressões (13), (6), (14) e (17), respetivamente, calculou-se a potência dissipada, o rendimento da máquina térmica η_1 , o rendimento descontando as perdas na fonte quente η_2 e o rendimento de carnot η_c .

Obteve-se os seguintes resultados:

E_1 (V)	P_{diss} (W)	η_1 (%)	η_2 (%)	η_c (%)
7.00	0.9 ± 0.2	0.17 ± 0.02	0.28 ± 0.05	2.5 ± 0.2
10.07	1.1 ± 0.2	0.34 ± 0.03	0.44 ± 0.05	4.8 ± 0.1
13.01	3.8 ± 0.3	0.56 ± 0.04	1.0 ± 0.1	7.34 ± 0.09
15.99	4.9 ± 0.3	0.81 ± 0.05	1.3 ± 0.1	10.43 ± 0.06

(Tabela 3: Rendimentos e potência dissipada calculados a partir dos valores da tabela 3)

Por forma a calcular P_{3cond} - a partir da expressão (11) - abriu-se o circuito da resistência R_2 anulando a corrente I_2 e de seguida ajustou-se a tensão E_1 por forma a obter uma diferença entre T_a e T_b igual à registada na tabela 2. Efetuou-se este processo para os valores correspondentes a $E_1 = 7.00V$ e $E_1 = 15.99V$. Obteve-se os seguintes resultados:

	$E_1 = 7.00V$	$E_1 = 15.99V$
T_a ($^{\circ}C$)	34.02 ± 0.05	77.56 ± 0.06
T_b ($^{\circ}C$)	26.36 ± 0.03	41.08 ± 0.02
T_c ($^{\circ}C$)	22.69 ± 0.07	24.18 ± 0.04
T_d ($^{\circ}C$)	22.32 ± 0.03	22.47 ± 0.06
V_1' (V)	6.74 ± 0.01	15.22 ± 0.01
I_1 (A)	0.336 ± 0.001	0.755 ± 0.001
\dot{m} (g/s)	0.62 ± 0.02	0.59 ± 0.02
P_1 (W)	2.27 ± 0.02	11.49 ± 0.03
P_{3cond} (W)	0.96 ± 0.03	4.2 ± 0.3

(Tabela 4: Parâmetros necessários ao cálculo da resistência térmica R_T e de η_3)

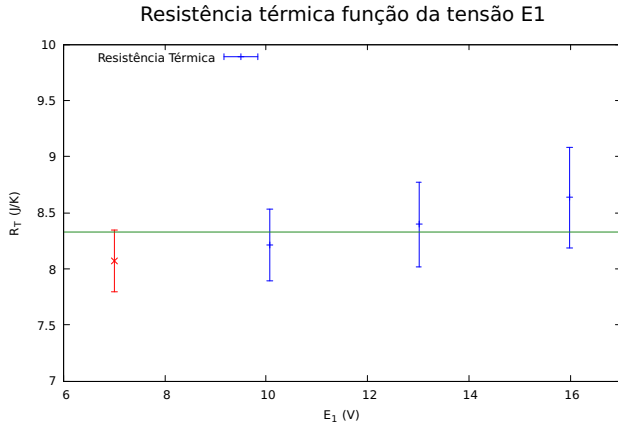
Com estes valores, foi possível utilizar a expressão (16) para calcular a resistência térmica e a expressão (15) para calcular o rendimento sujeito à segunda correção, para $E_1 = 7.00V$ e $E_1 = 15.99V$. De seguida, interpolou-se o valor da resistência térmica para $E_1 = 10.07V$ e $E_1 = 13.01V$ e calculou-se o valor de P_{3cond} correspondentes que permitiu chegar a η_3 . Obteve-se os seguintes resultados:

E_1 (V)	R_T (J/K)	P_{3cond} (W)	η_3 (%)
7.00	8.1 ± 0.3	0.96 ± 0.03	0.7 ± 0.3
10.07	8.2 ± 0.4	1.84 ± 0.08	0.8 ± 0.2
13.01	8.4 ± 0.4	2.9 ± 0.2	2.7 ± 0.7
15.99	8.6 ± 0.5	4.2 ± 0.3	2.9 ± 0.6

(Tabela 5: Valores da resistência térmica, da potência P_{3cond} e do rendimento η_3 calculados a partir dos valores da tabela 4)

No seguinte gráfico apresentam-se os diferentes valores da resistência térmica, aos quais se ajustou pelo método dos mínimos quadrados uma reta da forma:

$$R_t = a \quad (22)$$



(Gráfico 1: Valores da resistência térmica para diferentes tensões E_1 e ajuste da equação (22). A vermelho indica-se o ponto (7.00V, 8.1J))

Tendo-se obtido o seguinte resultado:

$$a \text{ (J/K)} = 8.3 \pm 0.1$$

Conversor termoelectrico como bomba de calor

Efetuararam-se as alterações necessárias a obter a montagem representada na figura 2. De seguida, ajustou-se E_1 e E_2 por forma a colocar $I_2 = 0.5A$ e fazer com que a temperatura T_a estabilizasse próximo dos $20^\circ C$. Atingido o equilíbrio, registaram-se as grandezas envolvidas, e repetiu-se o processo para $I = 0.3A$. Obteve-se os seguintes resultados:

I_2 (mA)	503.5±0.2	298.6±0.2
T_a (°C)	18.606±0.004	16.9325±0.0005
T_b (°C)	28.03±0.03	24.418±0.002
T_c (°C)	23.48±0.02	22.87±0.03
T_d (°C)	22.589±0.006	22.651±0.007
E_1 (V)	6.160±0.001	3.451±0.001
E_2 (A)	7.660±0.001	4.609±0.001
I_1 (A)	0.307±0.001	0.172±0.001
\dot{m} (g/s)	0.63±0.02	0.74±0.02
P_1 (W)	1.891±0.007	0.594±0.004
P_2 (W)	1.211±0.001	0.4440±0.0006
P_3 (W)	2.325±0.006	0.986±0.007

(Tabela 6: Parâmetros necessários ao cálculo da eficiência da bomba de calor)

A partir destes valores, utilizaram-se as expressões (18) e (20) para calcular a eficiência da bomba de calor e a eficiência ideal:

I_2 (mA)	ε	ε_c	P_{perdas} (W)
503.5	1.92±0.01	31.96±0.01	±.
298.6	2.22±0.02	39.75±0.01	±.

(Tabela 7: Valores das eficiências da bomba de calor e ideal e valor da potência de perdas)

3 Discussão dos Resultados

Em primeiro lugar procedeu-se à verificação das temperaturas medidas para os diversos sensores a serem utilizados posteriormente ao longo da experiência. Uma vez que estes se encontravam em equilíbrio térmico, esperava-se que as temperaturas que indicavam fossem idênticas. Contudo, tal não se verificou - por conseguinte, procedeu-se à determinação da média dos valores obtidos e calculou-se o desvio em relação a esse valor para as temperaturas medidas por cada um dos sensores, tendo o valor obtido para cada um dos sensores sido adicionado ao valor medido por esse mesmo sensor no decurso da experiência por forma a garantir a fiabilidade dos resultados obtidos.

Relativamente à utilização do conversor termoelectrico enquanto máquina térmica, procedeu-se primeiramente à determinação da resistência de carga óptima, para a qual se obteve um valor $R_{20} = (11.1 \pm 1.2)\Omega$. Uma vez que o valor máximo de resistência que podia ser atingido era 10Ω , o resto da experiência foi realizado tento tal em conta. Procedeu-se então à determinação do valor do rendimento da máquina térmica para diferentes valores de tensão aplicada na célula de Peltier.

A primeira constatação obtida mediante a análise dos resultados obtidos consiste no facto de se ter verificado que um aumento de tensão implicaria um aumento da diferença de temperaturas entre a fonte quente e a fonte fria. Além disto, modelando

o funcionamento do conversor termoelectrico como sendo ideal, constata-se que o rendimento de Carnot aumenta consequentemente em função do aumento da tensão. Todavia, visto este sistema possuir um funcionamento real e, por conseguinte, serem-lhe inerentes perdas energéticas que deveremos considerar, foi efectuada a análise do rendimento η_1 considerando como potência fornecida P_1 , isto é, a potência da fonte quente, e como potência útil P_2 , isto é, a potência fornecida ao circuito pela célula de Peltier. O valor deste rendimento foi inferior ao de qualquer outro considerado ao longo do trabalho, indiciando a validade da análise efectuada, tendo sido ainda bastante inferior ao de Carnot, sendo que contudo o seu quociente diminui com o progressivo aumento da temperatura (para $U = 3V$ e $U=16V$, o valor $\frac{\eta_C}{\eta_1}$ é de 14.5 e 12.9 respectivamente). Todavia, considerou-se ainda o caso de um rendimento para o qual seriam desprezadas perdas energéticas para o exterior, o que corresponderia a isolar o sistema (exequível, embora tais não fossem as condições proporcionadas no laboratório ao longo do decorrer da experiência). O rendimento η_2 resultante verifica ser simultaneamente superior a η_1 e inferior a η_C para quaisquer valores de tensão, como seria de esperar.

É de notar que ao realizar a experiência o fluxo de água que actuava enquanto fonte fria se manteve constante para um valor todavia baixo. Tal resultou de material residual biológico que revestia o interior do tubo e que levava a uma diminuição do caudal, por um lado, e potenciava a formação de bolhas de ar por outro. Para evitar isto foi necessário ir continuamente modificando a posição do tubo, e manipular uma vez a própria célula, induzindo erros difíceis de controlar, visto as variações do caudal modificarem o contexto de execução da experiência. Para minimizar estes erros, mediu-se o fluxo durante um intervalo de tempo para o qual se mediram simultaneamente as temperaturas no início e no fim, permitindo fazer a média e ter em conta quaisquer flutuações inerentes, reduzindo por conseguinte o erro associado. De facto, este procedimento foi efectuado para todas as medições de temperatura efectuadas ao longo da experiência.

Subsequentemente, procedeu-se à determinação de um novo rendimento denominado η_3 e que consistia em ignorar, além das perdas de energia para o exterior, as perdas de energia por condução. Tal conseguiu-se anulando-se no circuito a componente correspondente à célula de Peltier, calculando por conseguinte a resistência térmica inerente ao circuito e posteriormente a potência por condução. Assim, para os valores de tensão 7V e 13V obtiveram-se, respectivamente, os valores para a resistência térmica de $R_T = (8.1 \pm 0.3)KJ^{-1}$ e $R_T = 8.6 \pm 0.5KJ^{-1}$. Embora esta teoricamente seja constante, notamos um desvio experimental. Todavia, caso consideremos o valor médio destes valores $R_T = 8.4KJ^{-1}$ facilmente se verifica que ambos os valores se encontram englobados dentro do intervalo de incerteza experimental. De facto, após efectuar uma interpolação linear para os restantes valores, verifica-se que o declive da recta $R_T(\Delta T)$ será 0.02, o qual se aproxima demarcadamente de 0, o valor teórico expectável. Efectuando o procedimento descrito obtiveram-se os novos valores deste rendimento, tendo estes sido superiores aos anteriores mas inferiores ao de Carnot, corroborando a análise efectuada.

Por fim, utilizou-se a máquina analisada desta vez enquanto bomba de calor por oposição à máquina térmica até agora estudada. De facto, para esta montagem, foi possível determinar o valor do COP (coefficient of performance) para duas intensidades distintas de corrente através das diferenças de temperatura que lhes estavam associadas, tento o cuidado de no caso ideal considerar a temperatura em Kelvin visto não se tratar da sua diferença. Foi deste modo possível constatar que o valor do COP ideal era, tal como seria de esperar, demarcadamente superior em relação ao valor real, e que ambos aumentavam com a diminuição da diferença das temperaturas. De facto, verificou-se ainda que um aumento da intensidade de corrente leva a uma diminuição do valor do COP, o que é facilmente compreensível: um aumento da intensidade de corrente leva a uma aumento da tensão, o que por sua vez leva a um aumento da diferença de temperaturas, o que pelo previamente enunciado leva a uma diminuição do COP. Notamos no entanto uma menor disparidade, ainda que não sobremodo acentuada, entre os valores do COP ideais e teóricos e os valores dos rendimentos de Carnot e os experimentais previamente obtidos, sendo os ideais sempre superiores aos experimentais. Tal é lógico, porquanto no caso real existem sempre perdas de energia, nomeadamente por condução para o exterior (MAIS??? FALAR DE POTENCIAS DE PERDA)

4 Conclusões

Nesta experiência foi possível determinar o valor da resistência de carga óptima do circuito considerado, tendo-se obtido $R_{20} = (11.1 \pm 1.2)\Omega$. Obtiveram-se ainda valores para o rendimento do sistema em estudo enquanto máquina térmica para diferentes valores de tensão, tendo-se constatado que a um aumento de tensão correspondia um aumento do rendimento. Estes rendimentos foram quer ideais quer reais, tendo em conta as várias possíveis formas de perdas e ganhos de energia pelo sistema, desde efeitos de condução ao de Peltier. Para este fim determinou-se um valor para a resistência térmica do sistema anulando o circuito pertinente à célula de Peltier, tendo este sido $R_T = 8.4KJ^{-1}$. Por fim, estudou-se o conversor termoeléctrico enquanto bomba de calor, tendo-se concluído que a menores intensidades de corrente correspondiam maiores valores do COP, porquanto a tal estão associados menores valores da diferença de temperaturas consideradas.

É de notar que a esta experiência se encontram associados diversos erros, alguns dos quais quase inevitáveis: erros de sensores, resistências internas desprezadas dos fios e diversos componentes eléctricos, um caudal inconstante e cuja inconstância é exacerbada por material biológico preenchendo o interior dos tubos de circulação da água. Para reduzir estes problemas foram tomadas várias medidas: medir a temperatura que os sensores assinalavam antes de efectuar a experiência e introduzir um factor correctivo, medir o caudal novamente para cada parte da experiência, e calcular a temperatura como a média dos valores registados no início e no fim da medição do caudal. Todavia, e embora isto tenha diminuído significativamente os erros verificados, esta experiência revela-se de difícil execução no tocante a obtenção rigorosa de resultados, sendo que poderia ser melhorada através da melhoria do equipamento apresentado e, evidentemente, de um maior intervalo de tempo ao longo do qual efectuar as medições por forma a obter valores mais estáveis no equilíbrio - particularmente porque é precisamente na análise de situações de equilíbrio que reside o âmago de toda esta experiência.