



Universidade Estadual de Maringá – Centro de Ciências Exatas

Departamento de Física

Máquinas Térmicas

Relatório de Física Experimental II

Acadêmicos:

1. Giovanna Nogueira, RA 112479 – Física, turma F
2. Nathalia Castanho Max, RA 112451 – Física, turma F
3. Vitor Hugo Ferrari, RA 112481 – Física, Turma F

Maringá, 31 de Janeiro de 2020

Máquinas Térmicas

Relatório de Física Experimental II

Introdução

As máquinas térmicas são dispositivos capazes de converter energia térmica em energia mecânica, sendo utilizadas principalmente como meios de transporte e nas indústrias. Podemos citar com o exemplo os veículos automotores, a máquina a vapor e a turbina a vapor. É impossível imaginar nossa vida sem esses dispositivos, que a cada dia estão mais aprimorados.

O primeiro dispositivo que utilizava esse mesmo princípio de funcionamento foi a máquina de Heron de Alexandria, no século I D.C. Este propôs um dispositivo constituído de uma esfera de metal com 2 furos, nestes furos havia um tubo encurvado, por onde o vapor escapava e o fazia girar, denominada Eolípila.

Quinze séculos após, novos trabalhos utilizando vapor d'água surgiram, e agora para uso no auxílio de serviços. Um deles, um digestor de calor, foi inventado em 1679 por Denis Papin, médico e físico francês, atualmente conhecido por panela de pressão. Este era constituído de um tubo com uma tampa apropriada que confinava vapor de água, até que o ponto de ebulição da água aumentava consideravelmente devido ao aumento da pressão interna do tubo.

Ele também construiu em 1689 uma bomba centrífuga, cujo qual o objetivo era elevar a água de um canal entre duas cidades alemãs: Kassel e Karlshaven, utilizando uma máquina a vapor. Em 1698, Thomas Savery criou uma máquina que era usada para retirar água das minas.

Resumo

Com o intuito de estudar a Segunda Lei da Termodinâmica e o funcionamento de máquinas térmicas, utilizou-se um sistema composto por uma fonte de tensão DC para alimentação da fonte quente de uma máquina térmica contendo um dispositivo Peltier, pela qual circulava água proveniente do derretimento de gelo contido em um frasco de isopor (fonte fria). A partir da corrente elétrica que surge devido à diferença de temperatura no Peltier, há geração de potência, e, com isto, foi possível calcular a eficiência da máquina térmica. Ademais, por meio da diferença de temperatura entre as fontes quente e fria, encontrou-se o rendimento de Carnot para a máquina e, com isto, pôde-se comparar os rendimentos real e ideal.

Posteriormente, por volta de 1712, essa máquina de Savery foi aperfeiçoada por Thomas Newcomen e passou a ser utilizada também para elevar cargas.

No entanto, as máquinas térmicas obtiveram destaque de fato apenas no século 18, quando James Watt, em maio de 1765, ao inventar o condensador – um dispositivo isolado para resfriar o vapor d'água – e adaptá-lo à máquina de Newcomen. Em 1769, Watt patenteou sua invenção e começou a comercializá-la. Além disso, continuou o seu aperfeiçoamento. Por exemplo, em 1782, ele simplesmente abandonou o uso da pressão atmosférica para baixar os pistões, e passou, então, a utilizar o próprio vapor para realizar essa tarefa.

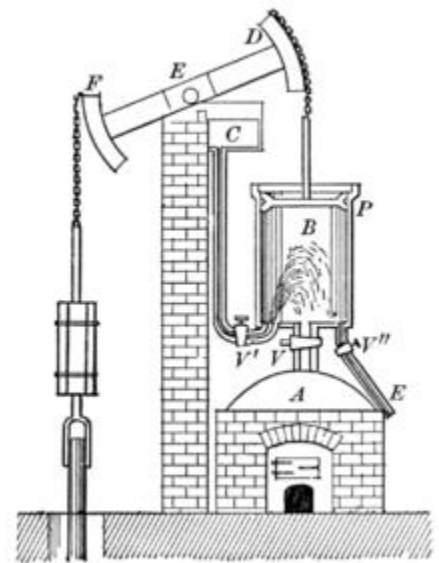


Figura 1 - Máquina de Newcomen

Desse modo, o vapor entrava alternativamente nas duas extremidades do pistão, e este, portanto, tanto empurrava quanto aspirava o vapor. Em vista disso, esse seu novo invento ficou conhecido como máquina de ação dupla. Logo depois, em 1783, Watt introduziu a definição de cavalo-vapor (CV), ao usar um robusto cavalo e mostrar que ele poderia elevar à altura aproximada de 1,20 m, um peso de 68 kg em um segundo. Hoje essa unidade de potência, no sistema internacional, recebe o nome de watt, em sua homenagem.

Um ano depois, em 1784, Watt inventou o regulador centrífugo que, automaticamente, controlava a produção de calor de suas máquinas. Por fim, em 1790, Watt completou a invenção da hoje máquina a vapor de Watt incorporando a ela um medidor de pressão. Foi em 1904 que as máquinas a vapor passaram a ser utilizadas para locomoção. A locomotiva a vapor, construída por Richard Trevithick, era capaz de transportar 450 pessoas a uma velocidade de 24 km/h, velocidade bem menor que a que estamos acostumados atualmente.

Depois da locomotiva, vieram os carros, o primeiro foi produzido em 1885, pelo Engenheiro Alemão Karl Benz, e possuía motor a gasolina. As máquinas térmicas foram fundamentais para o

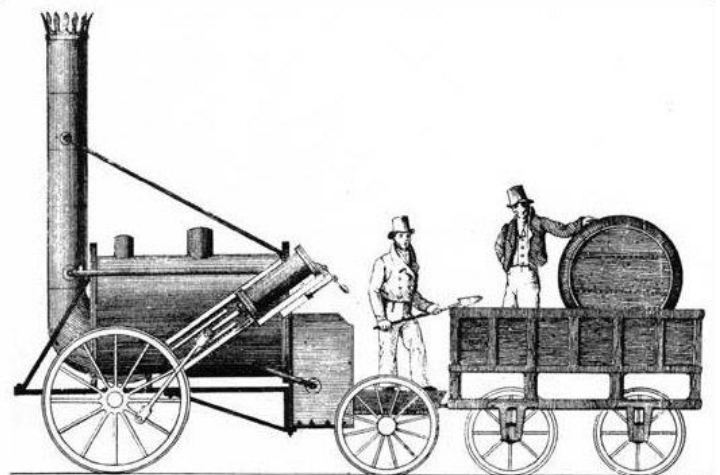


Figura 2 - Locomotiva de Richard Trevithick

desenvolvimento tecnológico da humanidade, a começar pela Revolução Industrial, os meios de transporte e a produção de energia. Atualmente é impossível imaginar nossas vidas sem esses dispositivos, que, a cada dia, estão sendo mais aprimorados, contribuindo, assim, para a nossa qualidade de vida. Foi realizado um experimento para determinar o rendimento de determinada máquina térmica.

Fundamentação teórica

Revisão da primeira Lei da Termodinâmica

Um sistema termodinâmico consiste, para gases, em um número $N \sim 10^{24}$ de partículas de gás contido em um recipiente. Um gás pode ganhar ou perder energia sob a forma de calor durante uma transformação ou conforme ele recebe ou realiza trabalho sobre o meio externo. Tendo isso em vista, enuncia-se a Primeira Lei da Termodinâmica – “as energias inicial Q_0 e final Q_f de um sistema devem ser iguais e, ao receber-se uma quantidade de calor Q , o sistema pode realizar um trabalho W e/ou variar sua energia interna U , a qual é a energia interna de suas moléculas.

$$\Delta Q = W + \Delta U$$

As grandezas trabalho W e quantidade de calor Q são características dos processos termodinâmicos realizados no sistema e são definidas da seguinte forma:

- I. Representa o trabalho realizado por ou sobre um sistema;
- II. Representa o calor fornecido a um sistema.

A descrição macroscópica de um estado termodinâmico envolve três parâmetros: a pressão (P), relacionada à transferência de momento durante as colisões das partículas com as paredes do recipiente; o volume (V), sendo o espaço ocupado por um gás definido pelo próprio recipiente; e a temperatura (T). De forma resumida, em um sistema termodinâmico ideal, podem ocorrer os seguintes processos de trocas de energia.

- $Q > 0$ - Calor recebido pelo gás;
- $Q < 0$ - Calor cedido pelo gás;
- $\Delta U > 0$ - A temperatura do sistema aumenta;
- $\Delta U < 0$ - A temperatura do sistema diminui;
- $W > 0$ - Trabalho realizado pelo gás (expansão);
- $W < 0$ - Trabalho recebido pelo gás (compressão).

e as seguintes transformações;

- $Q = 0$ - Adiabática, ou seja, não há troca de calor – elas ocorrem de forma extremamente rápida;
- $\Delta U = 0$ - Isotérmica, ou seja, não há troca de calor;
- $W = 0$ - Isovolumétrica, ou seja, não há variação de volume;
- $P = 0$ - Isobárica, ou seja, a pressão é nula e o sistema varia sua energia interna e realiza ou tem trabalho realizado sobre ele.

Máquina Térmica

Uma máquina térmica é um sistema termodinâmico cuja função é converter energia térmica em energia mecânica e, para isso, utiliza substância operante (como um gás ou um líquido) para retirar calor de uma fonte quente (caldeira, por exemplo) e usá-lo para realizar trabalho mecânico, liberando para uma fonte fria (o ambiente, por exemplo) o que sobrou desse calor absorvido, em um processo cíclico (o sistema volta ao estado inicial depois de realizadas as transformações).

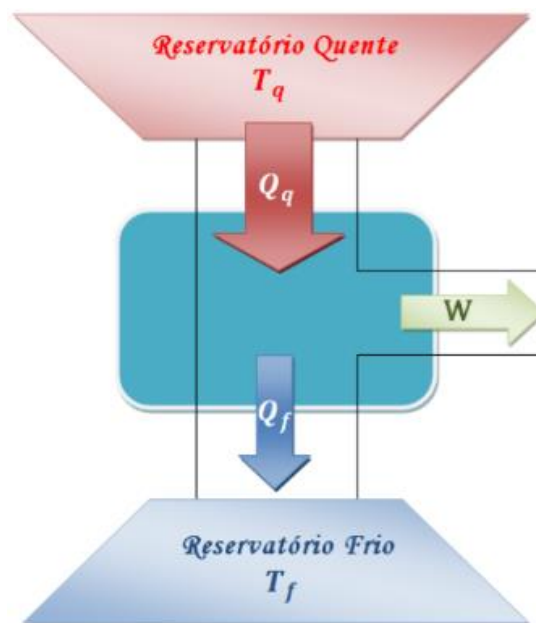


Figura 3 - Desenho esquemático do funcionamento de uma máquina térmica

Como o processo é cíclico, a variação de energia interna ΔU é nula e, pela Primeira Lei da Termodinâmica, tem-se que:

$$W = Q_q - Q_f$$

$$Q_q = W + Q_f$$

Onde W é o trabalho realizado, Q_d é o calor recebido da fonte quente e Q_f é o calor fornecido à fonte fria.

Uma vez que Q_f é a energia “não aproveitada” na produção de trabalho, a eficiência (ou rendimento) η de uma máquina térmica, ou seja, o quanto a máquina realizou de trabalho em comparação ao que teve de retirar de calor da fonte quente, é, por definição:

$$\eta = \frac{W}{Q_d} \rightarrow \eta = 1 - \frac{Q_f}{Q_d} \rightarrow \eta = 1 - \frac{Q_f}{Q_q}$$

O rendimento de uma máquina térmica é dado por:

$$\eta = \frac{W}{Q_q} = \left| 1 - \frac{Q_f}{Q_q} \right| \times 100\%$$

O principal conceito envolvido é segunda Lei da termodinâmica: “*Não é possível transformar completamente calor em trabalho, sem a ocorrência de outra mudança*”. O rendimento de Carnot (limite teórico de uma máquina térmica) é dado por:

$$\eta = \left| \frac{T_q - T_f}{T_q} \right| \times 100\%$$

Ciclo de Carnot

Até 1824 acreditava-se que as máquinas térmicas construídas poderiam submeter-se a um funcionamento perfeito, ou seja, pensava-se que elas podiam atingir o rendimento de 100%, ou algo próximo a esse valor. Em outras palavras, os cientistas da época acreditavam que podiam fazer uso de toda energia térmica fornecida a essas máquinas – ou seja, acreditavam que poderiam transformar toda essa energia em trabalho.

O engenheiro Sadi Carnot foi o responsável, na época, por fazer demonstrações nas quais era impossível obter 100% de rendimento. Sadi propôs que uma máquina térmica teórica, ideal, funcionaria percorrendo um ciclo particular, hoje designado Ciclo de Carnot. Em sua demonstração, Carnot conceituou dois postulados, que foram propostos antes mesmo de enunciada a primeira lei da termodinâmica.

- **1º Postulado de Carnot:** Nenhuma máquina operando entre duas temperaturas fixadas pode ter rendimento maior que a máquina ideal de Carnot, operando entre essas mesmas temperaturas.

- **2º Postulado de Carnot:** Ao operar entre duas temperaturas, a máquina ideal de Carnot tem o mesmo rendimento, qualquer que seja o fluido operante, e é completamente reversível, sem adição de energia.

De acordo com os postulados enunciados por Carnot, podemos ver a garantia de que o rendimento de uma máquina térmica é função das temperaturas das fontes quente e fria. Entretanto, fixando-se as temperaturas dessas fontes, a máquina teórica de Carnot é aquela que consegue ter o maior rendimento.

$$\left| 1 - \frac{Q_f}{Q_q} \right|$$

O ciclo de Carnot é um ciclo idealizado, reversível, no qual o fluido operante é um gás perfeito, que corresponde a duas transformações isotérmicas e duas adiabáticas, intercaladas.

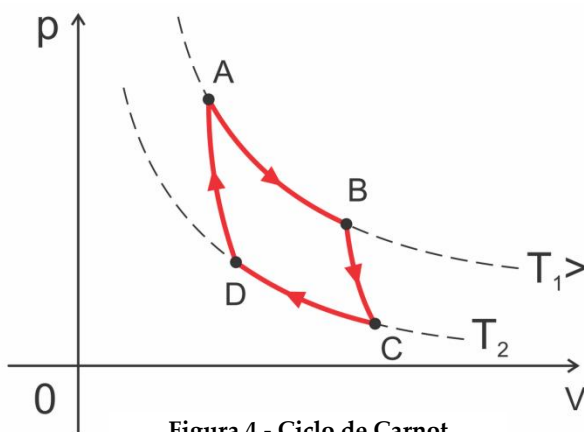


Figura 4 - Ciclo de Carnot

Na expansão isotérmica BC, a energia interna se mantém constante e, portanto, o calor é igual ao trabalho realizado pelo gás:

$$Q_{\text{quente}} = W_{ab} = n \cdot R \cdot T_{\text{quente}} \cdot \ln \frac{V_b}{V_a}$$

$$Q_{\text{frio}} = W_{cd} = n \cdot R \cdot T_{\text{frio}} \cdot \ln \frac{V_c}{V_d}$$

Note que V_d é menor que V_c , logo, Q_{frio} é negativo, durante a compressão isotérmica há rejeição de calor pelo sistema. O quociente entre os valores acima fornece:

$$\frac{Q_{\text{frio}}}{Q_{\text{quente}}} = \frac{n \cdot R \cdot T_{\text{frio}} \cdot \ln V_c/V_d}{n \cdot R \cdot T_{\text{quente}} \cdot \ln V_b/V_a}$$

Para os processos adiabáticos encontramos que:

$$T_{\text{quente}} \cdot V_b^{\gamma-1} = T_{\text{frio}} \cdot V_c^{\gamma-1}$$

$$T_{quente} \cdot V_a^{\gamma-1} = T_{frio} \cdot V_d^{\gamma-1}$$

Ao dividir uma pela outra temos,

$$\frac{V_c}{V_d} = \frac{V_b}{V_a}$$

Valendo a relação:

$$\frac{|Q_{frio}|}{|Q_{quente}|} = \frac{T_{frio}}{T_{quente}}$$

Substituindo na equação do rendimento de uma máquina térmica, obtemos, para a máquina de Carnot:

$$\eta = 1 - \frac{T_{frio}}{T_{quente}}$$

Máquina de Carnot e Máquina Real

Buscando compreender qual seria o máximo rendimento que se poderia obter de um motor térmico operando entre uma fonte quente e uma fria, Nicolas Carnot (1796 -1832) propôs uma máquina térmica reversível teórica de rendimento total que funcionaria segundo um ciclo de rendimento máximo, o Ciclo de Carnot, representado na figura 3, a seguir;

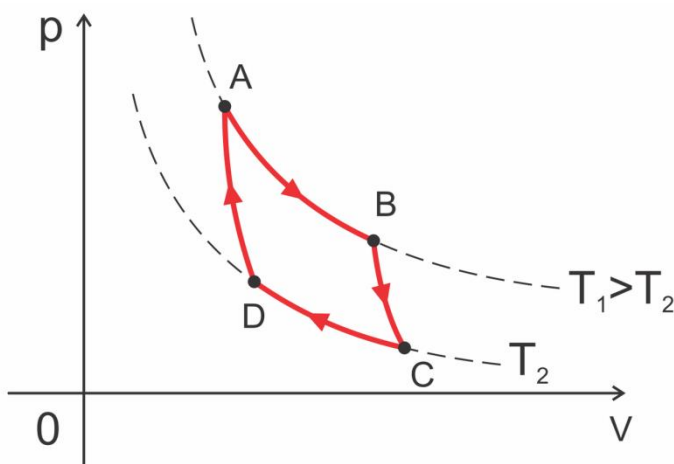


Figura 5 - Ciclo de Carnot

O ciclo é composto por quatro processos:

A → B : Expansão isotérmica reversível;
 $\Delta U = 0, W > 0 \rightarrow Q > 0$;

B → C: Expansão adiabática reversível;
 $Q = 0, W > 0 \rightarrow \Delta U < 0$;

C → D : Compressão isotérmica reversível;
 $\Delta U = 0; W < 0 \rightarrow Q < 0$;

D → A: Compressão adiabática reversível;
 $Q = 0, W < 0 \rightarrow \Delta U > 0$.

Como, em uma máquina operando de acordo com o Ciclo de Carnot, sendo T_q a temperatura da fonte quente e T_f a temperatura da fonte fria, a relação a seguir é válida

$$\frac{Q_f}{Q_q} = \frac{T_f}{T_q}$$

O rendimento η_{carnot} da máquina de Carnot, segundo a equação $\eta = 1 - \frac{Q_f}{Q_q}$, é calculado por:

$$\eta_{carnot} = 1 - \frac{T_f}{T_q} = \frac{\Delta T}{T_q}$$

A partir de suas demonstrações, Carnot enunciou dois postulados:

- I. “Nenhuma máquina térmica que opere entre uma dada fonte quente e uma dada fonte fria pode ter rendimento superior ao de uma máquina de Carnot”.
- II. “Todas as máquinas de Carnot que operem entre essas duas fontes terão o mesmo rendimento”.

Tendo em vista o Primeiro Postulado de Carnot, o rendimento de uma máquina real, ou seja, que não funciona de acordo com o Ciclo de Carnot, é calculado de forma distinta. Em uma máquina cujo funcionamento decorre do Efeito Peltier, o rendimento η_{real} é descrito como o quociente entre a potência elétrica do dispositivo Peltier devido ao trabalho realizado P_W e a potência fornecida ao reservatório quente P_q .

$$\eta_{real} = \frac{P_W}{P_q}$$

Sendo que P_W é dado por:

$$P_W = \frac{(V_W)^2}{R}$$

Onde V_W é a tensão referente ao trabalho W realizado e R é a resistência do equipamento escolhida.

Por sua vez, P_q é dada por:

$$P_q = V_q \times I_q$$

Onde V_q e I_q são, respectivamente, a tensão e a corrente fornecidas ao lado quente.

Dessa forma, obtém-se a expressão para o cálculo do rendimento η_{real} da máquina usada no experimento:

$$\eta_{real} = \frac{V_W^2}{R} \cdot \frac{1}{V_q \cdot I_q}$$

Segunda Lei da Termodinâmica

O conceito envolvido pelo estudo de máquinas térmicas é a Segunda Lei da Termodinâmica. A partir dos postulados de Carnot e analisando a equação $\eta = W_e/Q_e$, entende-se que, para que uma máquina possua 100% de eficiência, a quantidade de calor Q_f fornecida à fonte fria deve ser nula, ou seja, a temperatura T_f também deve ser nula. No entanto, como, atualmente, é impossível que um sistema atinja o zero absoluto, o rendimento de uma máquina térmica nunca será 100%.

Daí, surge o enunciado de Kelvin para a Segunda Lei da Termodinâmica: *“Nenhuma máquina térmica, operando em ciclos, converte todo o calor recebido em trabalho.”*

Dispositivo de Peltier

O dispositivo que será utilizado para o estudo do rendimento de uma máquina térmica é um conversor termoelétrico chamado dispositivo Peltier. Esse dispositivo (descoberto em 1834 por Jean Charles Athanase Peltier) constitui-se de uma junção de metais diferentes. Quando circula uma corrente elétrica através dessa junção há uma liberação de calor. Quando o sentido da corrente é invertido há uma absorção de calor. No entanto, o processo inverso também ocorre, ou seja, quando os dois lados do dispositivo são mantidos a diferentes temperaturas surge uma corrente elétrica. Esse efeito oposto é denominado de efeito Seebeck e foi descoberto pelo físico russo-germânico Thomas Johann Seebeck 13 anos antes do efeito Peltier. Atualmente, utilizam-se junções pn para obtenção do efeito Seebeck.

O efeito Seebeck será utilizado para simular uma máquina térmica; um lado do dispositivo de Peltier é mantido a baixa temperatura (constante), a través do bombeamento de água gelada e o outro lado, a alta temperatura (constante), através de um resistor colocado em seu interior e conectado a uma fonte de tensão DC. As temperaturas são medidas com termopares adequadamente conectados ao dispositivo. O dispositivo Peltier (sistema termodinâmico) extrai calor da fonte quente (resistência elétrica) realiza trabalho (através da queda de tensão num resistor de carga) e transfere calor para a fonte fria

(mistura de água com gelo). O rendimento de uma máquina térmica pode ser obtido experimentalmente e comparado com o valor máximo do rendimento teórico. Quando usado como refrigerador o calor é transferido da fonte fria para quente.

Máquina Térmica Via Dispositivo de Peltier

Na máquina térmica alternativa (dispositivo de Peltier) o rendimento é dado por:

$$e = \frac{P_W}{P_q}$$

Onde

$$P_W = \frac{V_W^2}{R_W}$$

É potência elétrica dissipada no resistor de carga e:

$$P_q = V_q \cdot I_q$$

É a potência elétrica fornecida pelo resistor correspondente à fonte quente.

A equação $Q_q = W + Q_f$ é idêntica a $P_q = P_W + P_f$.

Conversão da Temperatura

A temperatura dos reservatórios quente e frio será fornecida através de um termopar conectado no interior da máquina térmica. Este valor será primeiramente aferido em Ohms, e posteriormente convertido em °C e a temperatura dos reservatórios quente e frio será fornecida através de um termopar conectado no interior da máquina térmica. Este valor será primeiramente aferido em Ohms, e posteriormente convertido em °C e por fim em Kelvin (K). Para converter de $K\Omega$ para °C utilizaremos a tabela a seguir. Quando não tiver o valor apresentado, utilizem a seguinte equação para converter.

$$T(^{\circ}C) = T_a(^{\circ}C) + \delta T(^{\circ}C)$$

Onde:

$$\delta T(^{\circ}C) = (T_a(k\Omega) - T_b(k\Omega)) \cdot \left(\frac{1(^{\circ}C)}{T_a(k\Omega) - T_b(k\Omega)} \right) = \left(\frac{T_a(k\Omega) - T_b(k\Omega)}{T_a(k\Omega) - T_b(k\Omega)} \right)$$

Nas duas equações anteriores denota-se por T_b o valor posterior a T_a em $k\Omega$ na ordem crescente na tabela, apresentada à seguir, e T a temperatura que se quer descobrir o valor.

$K\Omega$	$^{\circ}\text{C}$	$K\Omega$	$^{\circ}\text{C}$	$K\Omega$	$^{\circ}\text{C}$	$K\Omega$	$^{\circ}\text{C}$	$K\Omega$	$^{\circ}\text{C}$
461	-5	146	17	53.2	39	21.7	61	9.76	83
436	-4	139	18	51.0	40	20.9	62	9.43	84
413	-3	133	19	48.9	41	20.1	63	9.12	85
391	-2	126	20	46.8	42	19.3	64	8.81	86
370	-1	120	21	44.9	43	18.6	65	8.52	87
351	0	115	22	43.0	44	17.9	66	8.24	88
332	1	109	23	41.2	45	17.3	67	7.96	89
315	2	104	24	39.6	46	16.6	68	7.70	90
298	3	100	25	37.9	47	16.0	69	7.45	91
283	4	95.4	26	36.4	48	15.5	70	7.21	92
269	5	91.1	27	34.9	49	14.9	71	6.98	93
255	6	87.0	28	33.5	50	14.4	72	6.75	94
242	7	83.1	29	32.2	51	13.8	73	6.53	95
230	8	79.4	30	30.9	52	13.4	74	6.33	96
218	9	75.9	31	29.7	53	12.9	75	6.12	97
207	10	72.5	32	28.5	54	12.4	76	5.93	98
197	11	69.3	33	27.4	55	12.0	77	5.74	99
187	12	66.3	34	26.4	56	11.6	78	5.56	100
178	13	63.4	35	25.3	57	11.2	79	5.39	101
169	14	60.7	36	24.4	58	10.8	80	5.22	102
161	15	58.1	37	23.4	59	10.4	81	5.06	103
153	16	55.6	38	22.5	60	10.1	82	4.91	104

Tabela 1 - Tabela de conversão retirada do manual da Pasco.

Procedimento e dados experimentais

Materiais Utilizados

- 1 Máquina Térmica da Pasco;
- 2 Multímetros;
- 1 Fonte DC;
- Cabos de Conexão;
- 1 Seringa Grande;
- Gelo Picado;
- Água;
- Frasco de Isopor Conectado a Máquina Térmica;

Descrição do Equipamento

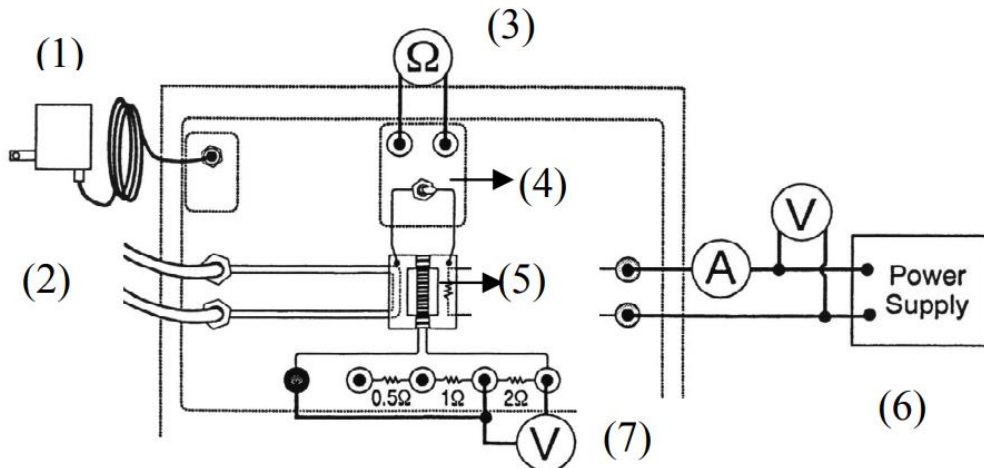


Figura 6 - Desenho Esquemático

A Figura 6 ilustra a montagem experimental de uma máquina térmica (dispositivo Peltier) embasada no efeito Seebeck. (1) O terminal conector para uma tomada 110V, que aciona o motor interno do circulador de água; (2) Mangueiras de circulação de água da fonte fria (frasco de isopor com água e gelo); (3) Terminal para a ligação de um multímetro na escala de leitura de resistência Ω (ohm) onde se fará a leitura da temperatura da fonte fria e quente; (4) Chave seletora para fazer a leitura das temperaturas da fonte quente e fria: quando voltada para o lado da fonte de alimentação, a leitura no multímetro será a temperatura do reservatório quente (T_q) e quando viramos a chave para o lado do frasco de isopor, a leitura será da fonte fria (T_f); (5) Dispositivo Peltier; (6) Fonte de alimentação (fonte quente), conectada se necessário a um amperímetro em série e a um voltímetro em paralelo ao terminal da máquina; (7) Multímetro na escala de leitura de tensão conectado ao resistor de carga, onde se fará a leitura da tensão de trabalho realizado pela máquina térmica, o intervalo escolhido em 2Ω .

Procedimento Experimental

- 1- Coloque no recipiente termicamente isolado (frasco de isopor) um pouco de água (o suficiente para cobrir a entrada do tubo inferior), e verifique se a água está circulando, caso não esteja, retire o tubo do frasco, encaixe a seringa na sua extremidade e retire a água do tubo, até que o tudo fique livre de “sujeiras” e a água fique circulando livremente;
- 2- Acrescente gelo até a borda e tampe o recipiente;



- 3- Conecte os cabos ligando o ohmímetro (multímetro na escala de Ω) nos terminais do termistor ((3) na Figura 6).
- 4- Conecte os cabos da fonte DC aos terminais da máquina térmica, caso este não apresente os leitores de voltagem e amperagem, conecte também o voltímetro e o amperímetro nos terminais do bloco aquecedor, de acordo com (6) na Figura 6;
- 5- Conecte o resistor de carga de 2Ω (ohm) como mostrado detalhadamente em (7) na figura 6, utilize o cabo de 3 pontas, onde duas pontas será conectada no resistor de cargas e a ponta simples será conectado no multímetro no COM, Posteriormente com um cabo simples coloque na última conexão no intervalo de 2Ω e a outra extremidade deste cabo conecte ao multímetro (na escala de voltímetro) que fornecerá o valor de V_W . A escolha do resistor de carga de 2Ω é arbitrária. Quaisquer das resistências de carga podem ser usadas;
- 6- Zere todos os botões de ajuste e ligue a fonte de alimentação DC. Ajustar a tensão para 11,0V;
- 7- Espere o sistema atingir o equilíbrio tal que as temperaturas quente e fria sejam constantes. Isto pode levar 5 a 10 minutos e pode depender das temperaturas iniciais. Se desejar esfriar o lado quente, a voltagem pode ser diminuída momentaneamente. Lembre-se que a resistência de termistor abaixa com os aumentos de temperatura;
- 8- Leia os valores das “resistências de temperatura” do lado quente e o lado frio, para isto basta girar a chave seletora para a leitura desejada, e faça a leitura no multímetro em Ohm. Registre as leituras na Tabela 1;
- 9- Registre a voltagem (V_q) do resistor de aquecimento, a corrente (I_q) e a voltagem do resistor de carga (V_W) na Tabela 1;
- 10- Abaixar a tensão do resistor de aquecimento de aproximadamente 2V, para isso varie o valor na fonte de alimentação DC. Valores sugeridos para V_q : (11,0V, 9,0V, 7,0V, 5,0V, e 3,0V);
- 11- Repita os passos de 7 até 10 para cinco temperaturas quentes diferentes.

Resultados

A tabela abaixo possui as medidas obtidas experimentalmente sobre a máquina térmica, quando houve a estabilização das resistências no termistor da fonte quente e da fonte fria; que foram obtidos através do aparato experimental da Pasco, as quais apresentam (V_q) em Volts – tensão, (I_q) em Ampère – corrente, P_q , V_w e P_w em Volts – tensão.

$V_q(V)$	$I_q(A)$	$P_q(V)$	$V_w(V)$	$P_w(V)$
11	0,248	2,728	0,95	0,45
9	0,204	1,836	0,74	0,27
7	0,158	1,106	0,44	0,097
5	0,114	0,57	0,24	0,03
3	0,070	0,21	0,11	$6,05 \times 10^{-3}$

Tabela 2 - Máquina Térmica

Considerando $R_w = 2\Omega$, dado fornecido pelo manual de laboratório, e utilizando as seguintes equações:

$$P_q = V_q \cdot I_q \quad \text{e} \quad P_w = V_w^2 / R_w$$

Já apresentadas anteriormente na fundamentação teórica, chegamos aos seguintes resultados para os termos apresentados na tabela 2.

A partir dos dados coletados experimentalmente que se apresentam da tabela 2, foi possível com o auxílio da tabela 1 (tabela de conversão da temperatura da Pasco), confeccionar a tabela 3 e 4, por meio das seguintes equações:

$$T(^{\circ}C) = T_a(^{\circ}C) + \delta T(^{\circ}C)$$

E

$$\delta T(^{\circ}C) = \left(\frac{T_a(k\Omega) - T(k\Omega)}{T_a(k\Omega) - T_b(k\Omega)} \right)$$

$V_q(V)$	$T_q(k\Omega)$	$T_q(^{\circ}C)$	$T_q(K)$
11	9	85,39	359,54
9	22	60,63	333,78
7	54	38,66	311,78
5	112	22,50	295,65
3	186	12,11	385,26

Tabela 3 - Temperatura da Fonte Quente

$V_q(V)$	$T_f(k\Omega)$	$T_f(^{\circ}C)$	$T_f(K)$
11	261	5,57	278,72
9	277	4,43	277,58
7	285	3,87	277,02
5	282	4,07	277,22
3	302	2,76	275,91

Tabela 4 - Temperatura da Fonte Fria

Calculamos a diferença de temperatura entre as fontes, o rendimento da máquina térmica simulada pelo dispositivo termoeletrico e o rendimento de uma máquina de Carnot operando nas mesmas temperaturas do experimento por meio da seguinte expressão respectivamente:

$$\Delta T = T_q - T_f.$$

$$\eta = \frac{P_W}{P_q}$$

$$\eta_C = 1 - \frac{T_f}{T_q}$$

Apresentamos os resultados na tabela a seguir.

$V_q(V)$	ΔT	η	η_c
11	80,82	0,165	0,225
9	56,20	0,147	0,168
7	34,79	0,087	0,112
5	18,43	0,053	0,062
3	9,35	0,028	0,033

Tabela 5 - Rendimento

Conclusão

Numa análise mais rigorosa, percebe-se que alguns fatores não podem ser desprezados na conclusão final da análise dos dados. Alguns desses fatores são: o erro humano na imprecisão da montagem experimental, na obtenção dos dados e até mesmo possíveis anomalias no aparato experimental.

Todavia, os dados obtidos neste experimento não extraviaram as tolerâncias admitidas. O resultado do notável trabalho realizado por todos os grandes cientistas que estudaram, desenvolveram e compuseram a termodinâmica ao longo da história puderam ser observados. O experimento mostrou um resultado muito satisfatório, pois, dentro dos erros admitidos, cumpriu as previsões teóricas esperadas.

O ciclo de Carnot é um ciclo idealizado, reversível, no qual o fluido operante é um gás perfeito, que corresponde a duas transformações isotérmicas e duas adiabáticas, intercaladas. O rendimento desse ciclo é o máximo ideal, sendo que uma máquina real sempre terá rendimento inferior ao rendimento de Carnot. De fato isso ocorre, ao analisarmos os dados da tabela 5 notamos que a variação do rendimento de Carnot ao decorrer de uma variação de temperatura é maior do que a variação do rendimento real ao decorrer da mesma variação de temperatura.

Quanto maior a diferença de temperatura, maior é o rendimento de Carnot, pois quanto maior a diferença de temperatura entre as fontes frias e quentes a energia transmitida é maior, gerando um maior trabalho e, conseqüentemente, um rendimento maior. Apesar do rendimento real não ter a mesma variação do rendimento de Carnot, ainda sim quanto maior a diferença de temperatura entre as fontes maior o rendimento.

É possível notar que a segunda lei da termodinâmica foi respeitada tendo em vista que ela diz: é impossível a construção de uma máquina que, operando em um ciclo



termodinâmico, converta toda a quantidade de calor recebido em trabalho. Parte do calor absorvido foi cedida para a fonte fria e a outra parte foi transformada em trabalho.

Referências Bibliográficas

H. M. Nussenzveig – Curso de Física Básica – vol2- Fluidos, Oscilações e Ondas, Calor - 5a edição – Editora Edgard Blücher LTDA – (1996);

Física geral II. / Mauricio Antonio de Melo; João Mura; Cesar C. Colucci. – Maringá : Eduem, 2009. 153. il. (Formação de professores em Física – EAD; v.5);

MUKAI, H., FERNANDES, P.R.G. Manual de Laboratório de Física II - DFI/UEM, 2008 a 2017.