

Motor de Stirling

Laboratório de Complementos de Eletromagnetismo e Termodinâmica

MEFT 2013/2014

Débora Barreiros, 75693 — Pedro Cal, 75699 — Tiago Costa, 75970 — Nuno Rosa, 76018
Instituto Superior Técnico — Turma de sexta-feira — Grupo I
1 de Maio de 2014

Resumo

O objetivo deste trabalho experimental foi a análise de uma máquina térmica e de uma bomba de calor através de um motor de *Stirling*, averiguando, para cada caso, os balanços energéticos do sistema, pelo cálculo de potências. Para a bomba de calor, obteve-se uma eficiência de 1.1 ± 0.4 , que pode ser comparada à eficiência de *Carnot* calculada de 25 ± 2 . Por outro lado, para a máquina térmica, no primeiro ensaio, a intensidade mais baixa, obteve-se 0.021 ± 0.003 de rendimento, não contabilizando as perdas e 0.006 ± 0.003 contabilizando-as. O rendimento de *Carnot* calculado foi de 0.545 ± 0.001 . Para o segundo ensaio da máquina térmica foi obtido um rendimento sem perdas de 0.014 ± 0.002 , e contabilizando as perdas de 0.05 ± 0.01 . O rendimento de *Carnot* foi de 0.574 ± 0.001 . Todo o sistema foi analisado com vista a descobrir a razão pela qual os rendimentos e eficiências são tão baixos.

1. INTRODUÇÃO TEÓRICA

Neste trabalho é pretendida a simulação e o estudo de um ciclo termodinâmico realizado numa máquina de *Stirling*, esta máquina executa um ciclo semelhante a um Ciclo de *Stirling*. Será estudada a situação de máquina térmica e a situação de bomba de calor.

Um **Ciclo de *Stirling*** é um ciclo termodinâmico fechado em muito semelhante a um Ciclo de *Carnot*, que é o ciclo que representa maior eficiência para uma máquina térmica. Este ciclo é composto por quatro fases distintas: 1. **Expansão Isotérmica**; 2. **Arrefecimento Isocórico**; 3. **Compressão Isotérmica**; 4. **Aquecimento Isocórico**.

A máquina presente em laboratório é simples, sendo que apenas é composta uma resistência, um sistema de circulação de água, e entre eles um deslocador e um êmbolo que permitirão as compressões e expansões do sistema.

Numa **Máquina Térmica** o ciclo dá-se no sentido numerado anteriormente, o objetivo será retirar calor fornecido pela resistência (fonte quente) e transformá-lo em trabalho mecânico. No ponto 1, expansão isotérmica, o gás presente no sistema é aquecido, por uma fonte quente, e o sistema expande-se para que a temperatura se mantenha constante, ou seja, há transferência de calor da fonte quente para o gás, e o gás realiza trabalho movendo o pistão; no passo 2, arrefecimento isocórico, o sistema encontra-se no seu volume máximo e o gás encontra-se em contato com uma fonte fria, pelo que há transferência de calor do gás para a fonte fria e o gás arrefece não sendo realizado qualquer tipo de trabalho; no passo 3, compressão isotérmica, o gás presente no sistema é arrefecido, estando em contato com a fonte fria, e o sistema sofre uma diminuição de volume para que o gás mantenha uma temperatura constante; e, por último, no ponto 4, aquecimento isocórico, o sistema já se encontra com o seu volume mínimo e em contato direto com a fonte quente, pelo que há transferência de calor da fonte quente para o gás.

Para o Ciclo de *Carnot*, o máximo de eficiência que se pode obter numa máquina térmica é $\eta_{\text{Carnot}} = 1 - \frac{T_{FF}}{T_{FQ}}$, sendo T_{FF} a temperatura da fonte fria e T_{FQ} a temperatura da fonte quente. Para outro ciclo, como é o caso do ciclo experimentado em laboratório, o rendimento real da máquina térmica é dado por $\eta_{\text{real}} = \frac{P_W}{P_{FQ}}$ ou $\eta_{\text{real}} = \frac{P_W}{P_{FF} + P_{W_g}}$, onde P_{FF} é a potência da fonte fria, P_{FQ} é a potência da fonte quente, P_{W_g} a potência do trabalho recebido pelo gás e P_W a potência fornecida ao travão do motor (ver secção da montagem laboratorial).

Para calcular tais grandezas e determinar a potência perdida no processo, basta aplicar o que é conhecido sobre o ciclo (a

potência que entra e a que sai do sistema). Podemos então definir para uma máquina térmica que a potência de perdas (P_{perdas}) é dada por: $P_{\text{perdas}} = P_{FQ} - (P_{FF} + P_{W_g})$. Também é possível contabilizar a potência do atrito fazendo $P_{\text{atrito}} = P_{W_g} - P_W$.

Numa **Bomba de Calor**, o trabalho mecânico é fornecido pelo exterior, e o objetivo é transferir o calor de uma fonte fria para uma fonte quente. Nesta bomba de calor o ciclo dá-se exatamente no sentido contrário da máquina térmica (começa no item 4 em direção ao item 1 e repete-se num ciclo).

Para um Ciclo de *Carnot* como bomba de calor, isto é, o máximo de eficiência que se pode obter numa máquina térmica é $\eta_{\text{Carnot}} = \frac{T_{FQ}}{T_{FQ} - T_{FF}}$. Para outro ciclo, como é o caso do ciclo experimentado em laboratório, o rendimento real da máquina térmica é dada por $\eta_{\text{real}} = \frac{P_{FQ}}{P_{W_g}}$.

Na bomba de calor, de modo a calcular a potência perdida no processo, procede-se de maneira semelhante à máquina térmica fazendo $P_{\text{perdas}} = P_{FF} - (P_{FQ} + P_{W_g})$.

2. MONTAGEM DA EXPERIÊNCIA

A experiência do motor de *Stirling* envolve duas partes distintas, uma na qual este é colocado em funcionamento reproduzindo uma bomba de calor, enquanto que na segunda parte funciona como uma máquina térmica. De uma forma geral a montagem experimental consiste numa resistência térmica e num êmbolo no interior do cilindro de vidro. O pistão é colocado em movimento através de uma roda lateral o que faz alterar a disposição do ar no interior do cilindro e deste modo por sucessivas compressões e expansões do ar é possível verificar alterações da temperatura. Existe ainda um fluxo de água na base do cilindro, junto do pistão por forma a verificar a relação entre a potência fornecida e a potência extraída do mesmo. De facto ao longo da experiência é medido o caudal da água por forma a determinar a potência extraída. Existem diversas temperaturas a serem medidas ao longo da experiência com recurso a termopares, um na entrada da água, outro à saída e ainda um junto da resistência térmica no topo do cilindro. Mede-se ainda a pressão no interior do cilindro bem como a variação da posição do pistão, permitindo efectuar deste modo um diagrama PS (Pressão/Posição do êmbolo). A potência que entra no sistema (através da resistência elétrica) é dada sempre por $P = V \cdot I$ quer se trate da fonte quente ou da fonte fria, sendo V a tensão e I a corrente aos seus terminais. A potência associada à zona do êmbolo (circulação de água) é dada por $P = \phi_{\text{água}} \cdot c_{\text{água}} \cdot (T_s - T_e)$, em que $\phi_{\text{água}}$ é o fluxo

da água, $c_{\text{água}}$ é a capacidade térmica mássica da água e T_e e T_s , as temperaturas de entrada e saída da água. Do mesmo modo a partir da análise do diagrama PS podemos determinar o trabalho do gás dado por $W_g = \frac{2\pi r^2 A}{T}$, em que r é o raio do êmbolo, A é a área calculada no gráfico PS (vem em hPa.cm) e T é o período de um ciclo (na ordem das centenas de ms).

2.1. Bomba de calor

Quando o motor de *Stirling* é colocado a trabalhar sob a forma de uma bomba de calor a montagem efectuada encontra-se ilustrada na figura 1. A roda lateral neste caso é colocada em movimento através de uma correia circular colocada em movimento com recurso a uma fonte de tensão contínua. Nesta montagem é escolhida uma corrente específica e aguarda-se que a temperatura na resistência térmica esteja estável. Quando a temperatura estabiliza, o mais próximo possível da temperatura ambiente sem afectar a qualidade dos dados obtidos, regista-se, com recurso a um software presente no computador, primeiro a pressão e o deslocamento do êmbolo e depois as temperaturas na resistência e na entrada e saída da água. Sabendo que a fonte fria se encontra na zona da resistência, que a fonte quente se situa na zona inferior do cilindro e tomando as expressões acima indicadas, podemos determinar as perdas e avaliar a eficiência do motor tomando o quociente entre a P_{FQ} e o trabalho do gás W .

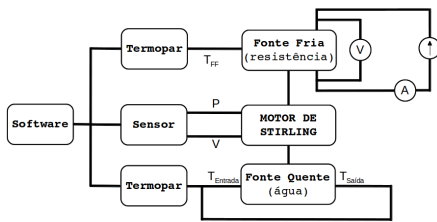


Figura 1. Diagrama de blocos da montagem do motor de *Stirling* como bomba de calor

2.2. Máquina térmica

A montagem da máquina térmica pode ser observada na figura 2. Trata-se de uma montagem bastante semelhante à anterior sendo que neste caso a roda é colocada em movimento sem recurso à correia de transmissão e quando este se torna estável é limitado com recurso a um travão de madeira. A trave gera então uma tensão mecânica que é transformada em tensão eléctrica. Neste caso as fontes quente e fria trocam de lugar pelo que a resistência térmica neste caso constitui a nossa fonte quente e fornece novamente calor à fonte fria. Procede-se exatamente do mesmo modo que no caso anterior. Esta montagem foi efectuada para duas intensidades distintas por forma a analisar o modo como varia a potência perdida e a eficiência do ciclo. Com isto pode ser calculada a potência de atrito natural do motor através da expressão $P_W = \frac{2\pi r F}{T}$, em que r é o raio da trave e F é a força sentida pela mesma. Deste modo podemos calcular a eficiência pelo quociente entre o trabalho do motor e a potência da fonte quente.

2.3. Calibração do dinamómetro

Por forma a determinar P_W era necessário saber qual era o valor da tensão mecânica, sendo que os únicos valores que

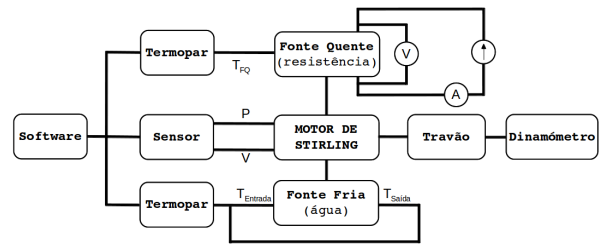


Figura 2. Diagrama de blocos da montagem do motor de *Stirling* como máquina térmica

possuíamos eram de tensão eléctrica. Assim, recorrendo a um conjunto de massas determinadas, efectuou-se um ajuste que relacionasse a tensão gerada por estas massas com a tensão eléctrica no voltímetro e deste modo saber a tensão gerada pela barra.

3. RESULTADOS EXPERIMENTAIS

3.1. Bomba de Calor

Nesta primeira parte da experiência procedeu-se à recolha dos dados provenientes do programa de computador que disponibiliza valores de temperatura dos vários pontos do sistema, a área do gráfico PS obtido, e o período de cada ciclo ocorrido.

A temperatura da fonte fria estava a uma temperatura de 10.8 ± 0.4 °C e a temperatura da fonte quente estava a 22.8 ± 0.4 °C. O gráfico PS (pressão/deslocamento do êmbolo) obtido está na figura 3. A área do gráfico correspondente ao diagrama PS foi de -602 ± 1 hPa.cm, o que equivale a uma energia retirada do gás por unidade de tempo de -3.80 ± 0.02 W.

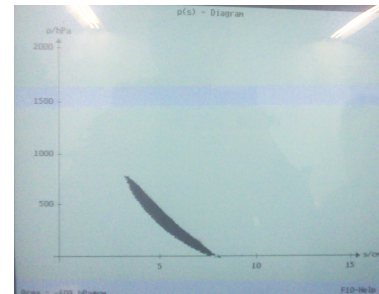


Figura 3. Gráfico obtido no laboratório para o ciclo de *Stirling* para o sistema da bomba de calor

As potências calculadas a partir do tratamento dos dados estão representadas na tabela I.

Potências	Valores Obtidos (W)	D. Precisão
P_{FF}	8.790 ± 0.005	0.07%
P_{FQ}	4 ± 2	38.6%
P_{W_g}	-3.79 ± 0.02	0.6%
P_{Perdas}	8 ± 2	19.0%

Tabela I. Potências calculadas

Os balanços energéticos relativos à bomba de calor foram feitos, mais uma vez, de acordo com as fórmulas da introdução teórica. Os valores de eficiência deste sistema foram registados na tabela II.

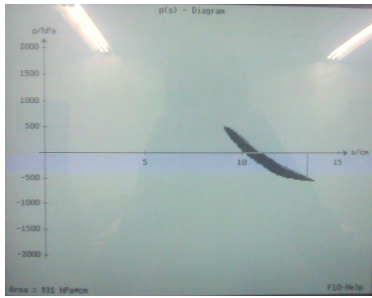
Eficiência	Valores Obtidos	D. Precisão
ε_{Carnot}	25 ± 2	6.5%
ε_{real}	1.1 ± 0.4	39.2%

Tabela II. Eficiências relativas ao sistema

3.2. Primeiro ensaio para a Máquina Térmica

Nesta segunda parte da experiência procedeu-se, mais uma vez, à recolha dos dados provenientes do programa de computador que disponibiliza valores de temperatura dos vários pontos do sistema, a área do gráfico PS obtido, e o período de cada ciclo ocorrido.

A temperatura da fonte fria estava a uma temperatura de 39.7 ± 0.4 °C e a temperatura da fonte quente estava a 415 ± 2 °C. O gráfico PS (pressão/deslocamento do êmbolo) obtido está na figura 4. A área do gráfico correspondente ao diagrama PS foi de 931 ± 1 hPa.cm, o que equivale a uma energia retirada do gás por unidade de tempo de 6.61 ± 0.04 W.

Figura 4. Gráfico obtido no laboratório para o ciclo de *Stirling* para primeiro ensaio da máquina térmica

As potências calculadas a partir do tratamento dos dados estão representadas na tabela III.

Potências	Valores Obtidos (W)	D. Precisão
P_{FQ}	132.1 ± 0.3	0.3%
P_{FF}	32 ± 2	6.8%
P_{Wg}	6.61 ± 0.04	0.6%
P_{perdas}	94 ± 3	2.7%
P_W	0.8 ± 0.4	49.7%
P_{atrito}	5.8 ± 0.4	7.7%

Tabela III. Potências calculadas

Os balanços energéticos relativos à máquina térmica foram feitos de acordo com as fórmulas da introdução teórica. Os valores de rendimento foram registados na tabela IV.

Eficiência	Valores Obtidos	D. Precisão
η_{Carnot}	0.545 ± 0.001	0.2%
$\eta_{real} (P_f = P_{FQ})$	0.006 ± 0.003	49.9%
$\eta_{real} (P_f = P_{FF} + P_{Wg})$	0.021 ± 0.003	13.8%

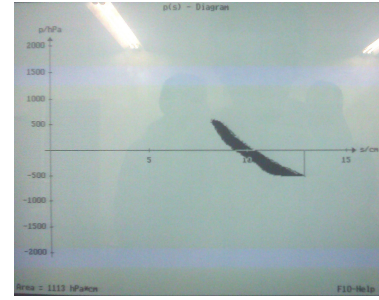
Tabela IV. Rendimentos relativos ao sistema com $0 < \eta < 1$

3.3. Segundo ensaio para a Máquina Térmica

Repetiram-se as medições feitas no primeiro ensaio, mas para uma tensão aplicada à fonte quente maior.

A temperatura da fonte fria estava a uma temperatura de 43.3 ± 0.4 °C e a temperatura da fonte quente estava a 469 ± 2

°C. O gráfico PS (pressão/deslocamento do êmbolo) obtido está na figura 5. A área do gráfico correspondente ao diagrama PS foi de 1113 ± 1 hPa.cm, o que equivale a uma energia retirada do gás por unidade de tempo de 8.24 ± 0.03 W.

Figura 5. Gráfico obtido no laboratório para o ciclo de *Stirling* para segundo ensaio da máquina térmica

As potências calculadas a partir do tratamento dos dados estão representadas na tabela V.

Potências	Valores Obtidos (W)	D. Precisão
P_{FQ}	171 ± 1	0.7%
P_{FF}	37 ± 2	6.2%
P_{Wg}	8.24 ± 0.03	0.4%
P_{perdas}	126 ± 3	2.7%
P_W	2.4 ± 0.3	11.1%
P_{atrito}	5.9 ± 0.3	4.9%

Tabela V. Potências calculadas

Os balanços energéticos relativos à máquina térmica foram feitos de acordo com as fórmulas da introdução teórica. Os valores de rendimento foram registados na tabela VI.

Eficiência	Valores Obtidos	D. Precisão
η_{Carnot}	0.574 ± 0.001	0.2%
$\eta_{real} (P_f = P_{FQ})$	0.014 ± 0.002	11.8%
$\eta_{real} (P_f = P_{FF} + P_{Wg})$	0.05 ± 0.01	24.7%

Tabela VI. Rendimentos relativos ao sistema com $0 < \eta < 1$

3.4. Calibração do Dinamómetro

O gráfico que mostra os pares força/tensão obtidos para o conjunto de massas do laboratório, e a respetiva reta de ajuste (do tipo $F(U) = mU + b$, em que m é o declive da reta e b é a sua ordenada na origem) é o correspondente à figura 6.

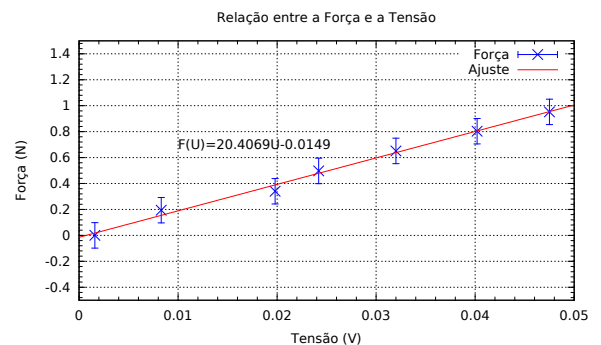


Figura 6. Ajuste dos pares força/tensão a uma reta

Os parâmetros de ajuste obtidos para os pontos experimentais estão na tabela VII.

Parâmetro de ajuste	Valores Obtidos	D. Precisão
$m(NV^{-1})$	20.4 ± 0.8	3.7%
$b(N)$	-0.01 ± 0.02	149.5%

Tabela VII. Parâmetros de ajuste da relação linear entre a força e a tensão

4. ANÁLISE, CRÍTICAS E CONCLUSÃO

Os resultados obtidos para os balanços energéticos tanto da bomba de calor como da máquina térmica foram coerentes com o esperado.

Para a bomba de calor verificou-se que o trabalho realizado pelo gás sobre o exterior foi negativo, o que significa que o gás recebe trabalho do exterior, neste caso proveniente do motor elétrico, tal como seria de esperar tendo em conta o funcionamento de uma bomba de calor, referido na introdução teórica.

O diagrama PS da figura 3 mostra que o sistema não se comporta como o ciclo de *Stirling* teórico, não tendo as duas curvas isocóricas e as duas curvas isotérmicas. Verifica-se que a pressão e o volume variam de forma muito menos definida.

Analizando os valores da tabela I, conclui-se que existiram perdas uma vez que a soma do módulo da potência da fonte fria com o módulo do trabalho recebido pelo sistema por unidade de tempo é superior à potência que se verificou ser recebida pela fonte quente.

Pela tabela II é possível concluir ainda que a eficiência desta máquina foi muito inferior à eficiência de uma máquina reversível de *Carnot*, principalmente devido à elevada percentagem de perdas.

Relativamente à segunda parte da experiência, analisando a máquina térmica para uma intensidade de corrente mais baixa, correspondente a uma temperatura na resistência inferior, chegamos à conclusão que o ciclo sofrido pelo gás também não corresponde ao previsto teoricamente por *Stirling*. Tal pode ser visto no gráfico da figura 4 cuja variação de pressão e volume ao longo do tempo também não é bem definida. Ainda assim, conseguimos verificar que o integral do gráfico obtido é positivo, e por isso chega-se à conclusão que o gás realiza trabalho sobre o exterior, o que é verdade tendo em conta que se trata de uma máquina térmica.

Pela tabela III é possível ver também que a potência libertada pela fonte quente é maior que todas as outras potências calculadas para o sistema. Teoricamente deveria ser igual à soma da potência que chega à fonte fria com a potência dissipada pelo gás, no entanto, verifica-se que tal não acontece. Surge então a necessidade de considerar uma potência de perdas de energia ao longo do processo.

A medição do trabalho do gás sobre o exterior foi feita recorrendo ao travão. A potência medida no dinamómetro foi significativamente inferior à potência calculada a partir do gráfico PS (cerca de 6W inferior). Acharmos que isto se deveu ao facto de se ter dissipado energia por atrito no movimento interno do motor. Por outro lado, o desvio à precisão da potência captada pelo dinamómetro foi bastante grande, devido às flutuações da força aplicada no travão, o que leva a crer que este

método de medir a força não é eficiente.

Assim, foi possível definir dois rendimentos reais para a máquina térmica, tal como se pode verificar na tabela IV. O rendimento considerando que a energia fornecida é a potência da fonte quente e a energia útil a potência que chega ao travão ($\eta_{real} [P_f = P_{FQ}]$), contabiliza todas as perdas do sistema, pelo que é muito reduzido. Se não se considerarem as perdas da fonte quente diretamente para o exterior, obtém-se um rendimento superior, em que a potência útil é a que chega ao travão e a potência fornecida é a que advém do trabalho do próprio gás e a que chega à fonte fria ($(\eta_{real} [P_f = P_{FF} + P_{Wg}])$).

Para as mesmas das temperaturas da fonte quente e fria, o rendimento de *Carnot* obtido para uma máquina reversível é, como seria de esperar, muito superior aos analisados no parágrafo anterior, pois considera um ciclo energético perfeito, sem qualquer tipo de perdas.

Para uma intensidade de corrente superior, a fonte quente adquiriu uma maior temperatura, o que originou uma maior diferença de temperaturas entre a fonte fria e a fonte quente. Este facto fez aumentar ligeiramente o trabalho do gás sobre o exterior, tal como é visível no gráfico PS da figura 5. A potência de perdas obtidas, mais uma vez pelo balanço entre a potência da fonte quente e a soma da potência recebida pela fonte fria com a potência fornecida pelo gás ao êmbolo, foi também significativa. A esta temperatura maior, a percentagem de energia dissipada foi semelhante à obtida no ensaio anterior. Pelos resultados da tabela V, verifica-se que houve uma diminuição geral nos desvios à precisão das potências, mas em particular no de P_W . Isto sugere que quanto maior a temperatura da fonte quente mais rigoroso é o valor obtido para o trabalho mecânico, e consequentemente melhor é o método para a obtenção deste trabalho.

Fazendo a análise dos rendimentos para este segundo ensaio, a partir da tabela VI, podemos verificar que os rendimentos, no geral, subiram. Isto pode dever-se à subida da diferença de temperaturas neste segundo ensaio.

Conclui-se assim que as perdas são uma percentagem significativa da potência da fonte quente. Isto deve-se ao facto de o sistema ter sido feito para ser observado e não para ser funcional, isto é, a fonte quente não estava devidamente isolada, pelo que havia um grande fluxo de calor entre a resistência e o meio exterior, o que também acontecia com o cilindro de vidro. Para além disto parte da energia mecânica fornecida pelo gás, também foi dissipada pelos vários elementos móveis da montagem.

Em relação à calibração do dinamómetro foi obtido um ajuste, visível no gráfico da figura 6 que mostra a relação entre a força e a tensão, essencial para o cálculo da potência extraída do sistema mecânico pelo travão. Conclui-se que a força e a tensão lida no dinamómetro têm uma relação linear de declive positivo e de desvio à precisão de 3.7% e em que o erro da ordenada na origem contém o erro, pressupondo a proporcionalidade direta entre ambas as grandezas, assumida para os cálculos.

Conclui-se então, que os baixos rendimentos (máquina térmica) e eficiências (bomba de calor) dos vários processos experimentados são explicados pelas perdas no sistema, já explicadas nos parágrafos anteriores.

[1] Guia experimental *Motor de Stirling*, Professor João Figueirinhas

[2] Apontamentos das aulas teóricas, Professor João Figueirinhas