

# Ciclos térmicos – máquina de Stirling

## Introdução:

A máquina de Stirling (Fig. 1) é uma máquina cíclica a ar quente, que utilizaremos para investigar experimentalmente o ciclo de Stirling, e demonstrar princípios de funcionamento que se aplicam à máquinas térmicas, refrigeradores e bombas de calor.

A máquina de Stirling é utilizada neste experimento com um sistema de aquecimento elétrico em sua base. Um cilindro de alumínio é utilizado para acumular calor e funcionar como reservatório térmico. De acordo com a representação da figura 1 temos uma diferença de temperatura entre duas partes da máquina, uma com temperatura maior (chamada de quente, ou  $T_Q$ ) e outra com temperatura menor (chamada de fria ou  $T_F$ ).

Em geral o propósito de uma máquina de Stirling é transformar calor em movimento (giro de um volante), que pode ser atrelado a uma polia, ou transformar calor em energia elétrica, acoplando-se a máquina a um gerador elétrico.

A máquina de Stirling é constituída por dois pistões: um pistão ( $P_t$  e  $P_d$ ) que converte o ar comprimido em trabalho mecânico, e um pistão de deslocamento ( $P_d$ ) que se desloca dentro de um cilindro com as duas extremidades à temperaturas  $T_Q$  (fonte quente, no caso de utilização como motor térmico) e  $T_F$  (reservatório frio à temperatura ambiente, no caso de utilização como máquina térmica). Os dois pistões estão mecanicamente ligados por um sistema de excêntricos e bielas, de modo que se deslocam em quadratura de fase (quando um pistão atinge uma extremidade, o outro encontra-se na metade de seu deslocamento). O pistão de deslocamento desloca ciclicamente o ar aquecido da extremidade à temperatura  $T_Q$  para a extremidade à temperatura  $T_F$ , ou o ar frio da extremidade à temperatura  $T_F$  para a extremidade à temperatura  $T_Q$ , onde é de novo aquecido. Este pistão funciona como um regenerador de calor.

O esquema da Fig.1 ilustra o funcionamento dos dois cilindros durante um ciclo, para a máquina trabalhar como motor térmico com o volante girando no sentido horário. A partir dos processos a seguir descritos podemos traçar o diagrama “pressão-volume”,  $p-V$ , correspondente (ver Fig. 2).

O primeiro esquema (I) da fig.1 mostra o momento em que o pistão de deslocamento inicia seu movimento ascendente, após ter estado em contato com o reservatório quente. Neste movimento o ar entre os dois pistões é arrefecido a um volume essencialmente constante, levando a um aumento da pressão na câmara B. No processo (II), o pistão de deslocamento ainda empurra o ar da extremidade quente para a extremidade fria (compressão isotérmica), culminando na condição de pressão máxima e volume mínimo do sistema. Nesta condição inicia-se a terceira parte do ciclo (III), em que a pressão diminui por um processo quase isocórico (volume quase constante). Por fim, ocorre o processo (IV), com uma expansão isotérmica do ar na câmara B, com conseqüente redução da pressão e aumento do volume  $V_B$ .

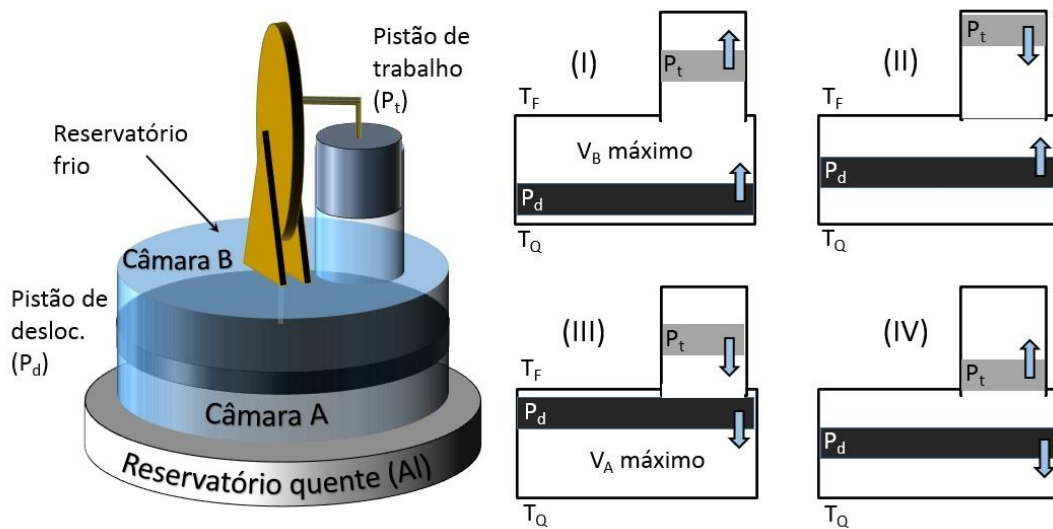


Figura 1 – Representação da máquina de Stirling utilizada neste experimento e seus ciclos de funcionamento.

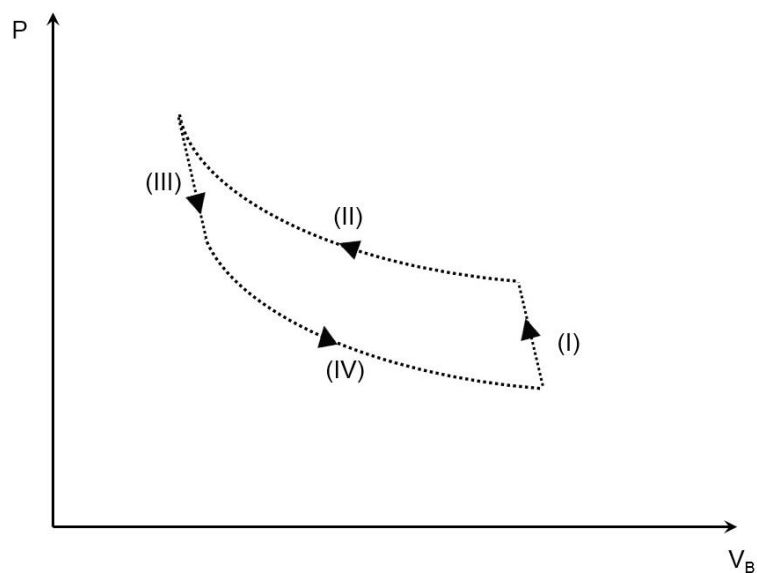


Figura 2 – Ciclo de funcionamento da máquina de Stirling, de acordo com as condições da figura I.

Neste experimento iremos comparar o rendimento  $\eta$  da máquina estudada com o rendimento de uma máquina que executa o ciclo de Carnot. Para este caso ideal espera-se

$$\eta_{Carnot} = 1 - \frac{T_F}{T_Q} \quad (1)$$

## Parte Experimental:

### Objetivo:

- Determinar o rendimento térmico real de uma máquina de Stirling.
- Comparar o rendimento obtido com o rendimento de um ciclo de Carnot e uma máquina de Stirling teórica.

### Material:

Fonte de calor (aquecedor elétrico de bancada), máquina de Stirling, termopar com multímetro.

### Procedimento:

A máquina de Stirling já se encontra afixada no topo do aquecedor elétrico.

**ATENÇÃO: O sobreaquecimento da máquina derrete seu pistão interno de EVA (plástico) e impede seu funcionamento. Ligue o aquecedor elétrico na rampa 5 do seletor e deixe-o agir sobre a máquina por 5 minutos exatos. Após este tempo desligue o aquecedor e apenas então inicie suas medidas.**

- Após realizar os 5 minutos de aquecimento toque suavemente o volante, fazendo-o girar no sentido indicado na máquina.

- Meça com o termopar a temperatura da base inferior ( $T_Q$ , Fig. 1) e da chapa superior ( $T_F$ , Fig.1).

- Conte o tempo necessário para que o volante faça 30 voltas. Para isso use a raia do volante pintada de preto e o cronômetro do computador (ícone na área de trabalho).

Com os dados adquiridos vamos avaliar o rendimento da máquina de duas maneiras diferentes:

### Previsão teórica:

Com os dados adquiridos vamos avaliar o rendimento da máquina de duas maneiras diferentes:

Assumindo que as isotérmicas são descritas reversivelmente e utilizando a expressão geral para o cálculo do rendimento  $\eta = W/Q_Q$ , onde  $W$  é o trabalho mecânico fornecido pelo motor e  $Q_Q$  a energia térmica retirada da fonte quente, em cada ciclo, obtém-se:

$$\eta_{Stirling} = \frac{R(T_Q - T_F) \ln\left(\frac{V_{m\acute{a}x}}{V_{m\acute{i}n}}\right)}{C_v(T_Q - T_F) + RT_Q \ln\left(\frac{V_{m\acute{a}x}}{V_{m\acute{i}n}}\right)}. \quad (2)$$

Na expressão acima  $V_{máx}$  e  $V_{min}$  são respectivamente os volumes máximo e mínimo do ciclo e  $C_v$  é o calor específico molar do ar a volume constante. Para o cálculo utilizaremos os valores de  $V_{máx} = 25 \text{ ml}$ ,  $V_{min} = 10 \text{ ml}$ ,  $C_v = 21 \text{ J K}^{-1} \text{ mol}^{-1}$ ,  $R = 8,314 \text{ J K}^{-1} \text{ mol}^{-1}$  e  $T_F$  e  $T_Q$  são obtidos experimentalmente.

### Comparação via trabalho mecânico:

A eficiência real da máquina de Stirling utilizada pode ser encontrada usando a seguinte relação:

$$\eta = \frac{W}{Q_Q} \quad (3)$$

Onde  $W$  é o trabalho mecânico fornecido pelo motor e  $Q_Q$  a energia térmica retirada da fonte quente. Neste caso, podemos admitir que o trabalho mecânico fornecido pela fonte de calor será integralmente transformada em energia cinética de rotação do volante.

Sabendo que a massa do volante é de  $m_v = (60 \pm 1) \text{ g}$  e seu raio  $r = (45,0 \pm 0,5) \text{ mm}$ , pode-se calcular seu momento de inércia, dado por

$$I = m_v r_v^2$$

É necessário neste caso calcular a velocidade angular do volante, utilizando o período médio medido para uma rotação do mesmo.

$$\omega = \frac{2\pi}{T}$$

Em seguida podemos calcular a energia cinética de rotação do volante, que será equivalente ao trabalho mecânico fornecido pela fonte de calor pela relação

$$W = \frac{I \omega^2}{2} \quad (4)$$

Para se calcular a quantidade de calor fornecida pela fonte quente deve-se conhecer a taxa de perda de calor pelo reservatório térmico. Esta perda foi medida para a massa de alumínio utilizada, e a tabela abaixo relaciona a faixa de temperatura da medida em  $T_Q$  com a perda de calor:

| Faixa de temperatura (°C) | Taxa de resfriamento (°C/s) - $\theta_{resf}$ |
|---------------------------|---|
| 90 a 99                   | 0,029   |
| 80 a 89                   | 0,026   |
| 70 a 79                   | 0,021   |
| 60 a 69                   | 0,017   |
| 50 a 59                   | 0,011   |
| 40 a 49                   | 0,007   |

Com isso, pode-se calcular o calor cedido durante o tempo de medida com a seguinte expressão:

$$Q = m_{al} c_{al} \Delta T$$

Sendo que  $\Delta T$ , a mudança da temperatura durante a medida, é equivalente a  $\Delta t \theta_{ref}$ , sendo  $\Delta t$  o tempo de medida.

$$Q = m_{al} c_{al} \Delta t \theta_{ref} \quad (5)$$

Em que a massa do cilindro de alumínio é  $m_{al} = (185 \pm 5) \text{ g}$  e o calor específico do alumínio é  $c_{al} = (0,90 \pm 0,01) \text{ J/g } ^\circ\text{C}$

Juntando-se as equações (4) e (5) obtemos a seguinte relação para o rendimento da máquina de Stirling:

$$\eta = \frac{I \omega^2}{2Q_Q}$$
$$\eta = \frac{m_v r_v^2 4\pi^2 f^2}{2m_{al} c_{al} \Delta t \theta_{ref}} \quad (6)$$

## QUESTÕES:

- Compare os valores de rendimento obtidos usando-se a eq. (1) e a equação para a máquina de Stirling.
- Compare agora o valor esperado para a máquina de Stirling (equação 2) com o valor calculado pelo trabalho mecânico medido (equação 6).
- Explique as diferenças entre os três valores encontrados e descreva possíveis razões para a perda de rendimento no sistema real.

## Referências:

[https://fenix.tecnico.ulisboa.pt/downloadFile/1407993358881355/Trabalho%20.%20Laboratorio%20TEM\\_Stirling\\_guia.pdf](https://fenix.tecnico.ulisboa.pt/downloadFile/1407993358881355/Trabalho%20.%20Laboratorio%20TEM_Stirling_guia.pdf)