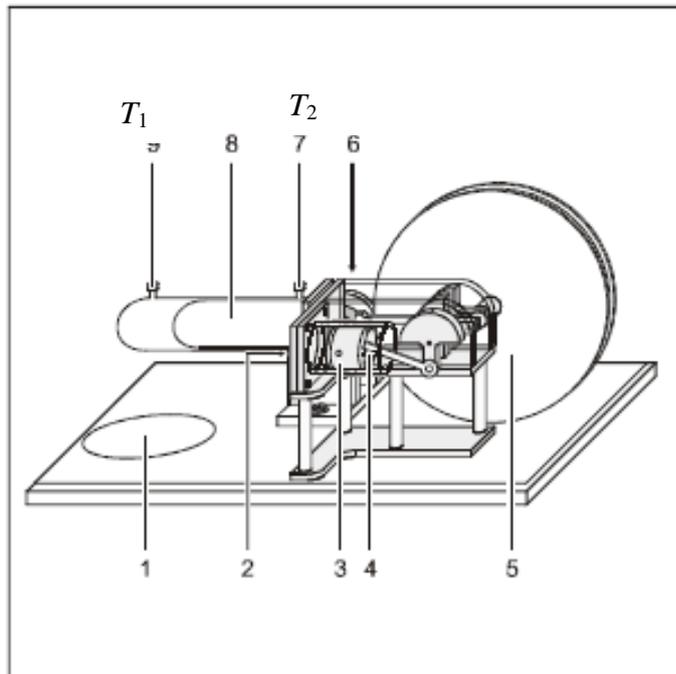


A máquina cíclica de Stirling

TEORIA

A máquina de Stirling (Fig. 1) é uma máquina cíclica a ar quente, com a qual vamos investigar experimentalmente o ciclo de Stirling, e demonstrar o funcionamento de uma máquina térmica, de uma máquina frigorífica, e de uma bomba de calor.



Legenda:

- 1- Suporte para lamparina
- 2- Ligação para sensor de pressão
- 3- Pistão que realiza o trabalho mecânico
- 4- Parafuso para ligação ao sensor de deslocamento
- 5- Volante
- 6- Motor ou gerador eléctrico
- 7- Termopar 2 (reservatório, à temperatura T_2)
- 8- Pistão de deslocamento
- 9- Termopar 1 (fonte de calor, à temperatura T_1)

Fig. 1. Máquina de Stirling.

Quando a máquina de Stirling é utilizada como motor térmico, uma lamparina de álcool colocada em (1) é usada como fonte de energia. Neste caso $T_1 > T_2$ e, para uma diferença de temperatura relativamente pequena, o volante começa a rodar no sentido anti-horário (máquina de Stirling vista tal como indicado na Fig. 1). Se à máquina de Stirling for acoplado um gerador eléctrico teremos produção de electricidade utilizável no exterior.

Quando, em lugar da diferença de temperatura, a fonte de energia é um motor eléctrico acoplado ao volante, a máquina de Stirling pode ser usada como bomba de calor ($T_1 > T_2$), ou como uma máquina frigorífica ($T_1 < T_2$), dependendo do sentido de rotação do volante.

A máquina de Stirling é constituída por dois pistões: um pistão (3) que converte o ar comprimido em trabalho mecânico, e um pistão de deslocamento (8) que se desloca dentro de um cilindro com as duas extremidades às temperaturas T_1 (fonte quente, no caso de utilização como motor térmico) e T_2 (reservatório 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 a meio do seu deslocamento). O pistão de deslocamento desloca ciclicamente o ar aquecido da extremidade à temperatura T_1 para a extremidade à temperatura T_2 , ou o ar frio da extremidade à temperatura T_2 para a extremidade à temperatura T_1 , onde é de novo aquecido. Este pistão funciona como um regenerador de calor.

O esquema da Fig. 2 ilustra o funcionamento dos dois cilindros durante um ciclo, para a máquina a trabalhar como motor térmico com o volante a rodar no sentido horário, visto do lado do volante.

A partir dos processos a seguir descritos podemos traçar o diagrama “pressão-volume”, p - V , correspondente (ver Fig. 3).

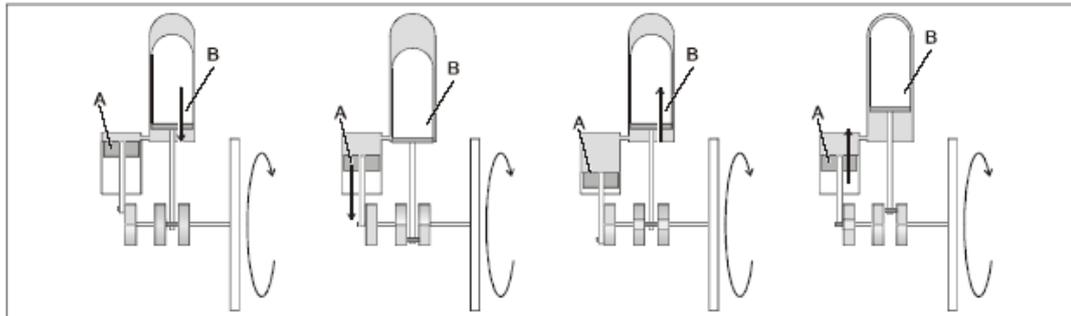


Fig. 2. A: pistão que realiza trabalho externo. B: pistão de deslocamento da massa de ar.

O primeiro esquema na Fig. 2 representa a situação onde o pistão de deslocamento se move da extremidade quente para a extremidade fria, empurrando o ar frio da extremidade fria para a extremidade quente. Durante este processo o pistão que realiza trabalho mecânico encontra-se próximo da posição de volume mínimo; o ar no cilindro junto desse pistão é aquecido e a pressão aumenta (ramo “a” do diagrama p - V , representado na Fig. 3). Segue-se a expansão (isotérmica) do ar quente no pistão mecânico (segundo esquema na Fig. 2, e ramo “b” no diagrama p - V), durante o qual o pistão de deslocamento permanece na extremidade fria (o ar do pistão de deslocamento foi empurrado para a extremidade quente e está a aquecer, trocando calor com a fonte quente à temperatura T_1). O terceiro esquema na Fig. 2 corresponde ao pistão mecânico na posição de volume máximo (e o pistão de deslocamento a meio caminho da extremidade quente). Nesta transformação, o ar no cilindro junto do pistão mecânico é arrefecido a volume essencialmente constante, levando a um decréscimo de pressão – processo isocórico (ramo “c” do diagrama p - V). O pistão de deslocamento está a empurrar o ar da extremidade quente para a extremidade fria. O último ramo do ciclo consiste na compressão isotérmica do ar no cilindro mecânico (quarto esquema da Fig. 2, e ramo “d” do digrama p - V), ao mesmo tempo que o pistão de deslocamento se encontra na extremidade quente (o ar do pistão de deslocamento foi empurrado para a extremidade fria e está a arrefecer - troca de calor com o reservatório à temperatura T_2).

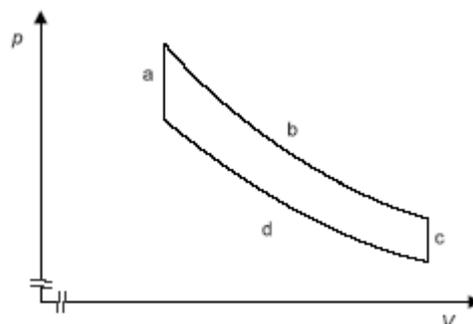


Fig. 3. Diagrama p - V do ciclo teórico de Stirling.

Para calcular o rendimento teórico, η_{Stirling} , dum motor de Stirling deve utilizar-se a definição geral

$$\eta = \frac{W}{Q_q}, \quad (1)$$

onde W é o trabalho mecânico fornecido pelo motor e Q_q a energia térmica retirada da fonte quente, em cada ciclo. Com o auxílio da Fig. 3, e assumindo que as isotérmicas são descritas reversivelmente, obtém-se:

$$\eta_{\text{Stirling}} = \frac{R(T_1 - T_2) \ln\left(\frac{V_2}{V_1}\right)}{C_V(T_1 - T_2) + RT_1 \ln\left(\frac{V_2}{V_1}\right)}. \quad (2)$$

Nesta equação, V_2 e V_1 são os volumes máximo e mínimo do ciclo, e C_V representa o calor específico molar a volume constante. Para o cálculo pode utilizar-se por exemplo os valores típicos $V_1 = 25$ ml, $V_2 = 35$ ml, $T_1 = 180$ °C, $T_2 = 35$ °C, $C_V(\text{ar}) = 21$ J K⁻¹ mol⁻¹, $R = 8,314$ J K⁻¹ mol⁻¹.

É interessante comparar este resultado com o rendimento duma máquina ideal que executa o ciclo de Carnot entre as mesmas temperaturas:

$$\eta_{\text{Carnot}} = 1 - \frac{T_2}{T_1}. \quad (3)$$

MÉTODO EXPERIMENTAL

Equipamento

- 1- Máquina de Stirling
- 2- Fonte de alimentação DC (± 30 V)
- 3- Dois termopares
- 4- Monitor de temperatura (T_1 e T_2)
- 5- Lamparina de álcool
- 6- Multímetro
- 7- Resistências de $1\text{ k}\Omega$ e $10\text{ k}\Omega$

Procedimento preliminar

Verifique que os dois termopares leem a (mesma) temperatura ambiente. Estime uma possível incerteza sistemática na medição da temperatura.

Experiência 1:

Utilização da máquina de Stirling como máquina frigorífica.

1- Monte a experiência tal como é indicado na Fig. 4. Alimente o motor eléctrico da máquina de Stirling com uma tensão U entre 6 e 10 V com incrementos de 1 V. Escolha a polaridade de modo a que o motor rode no sentido *horário* (dê uma ajuda ao volante para arrancar o movimento).

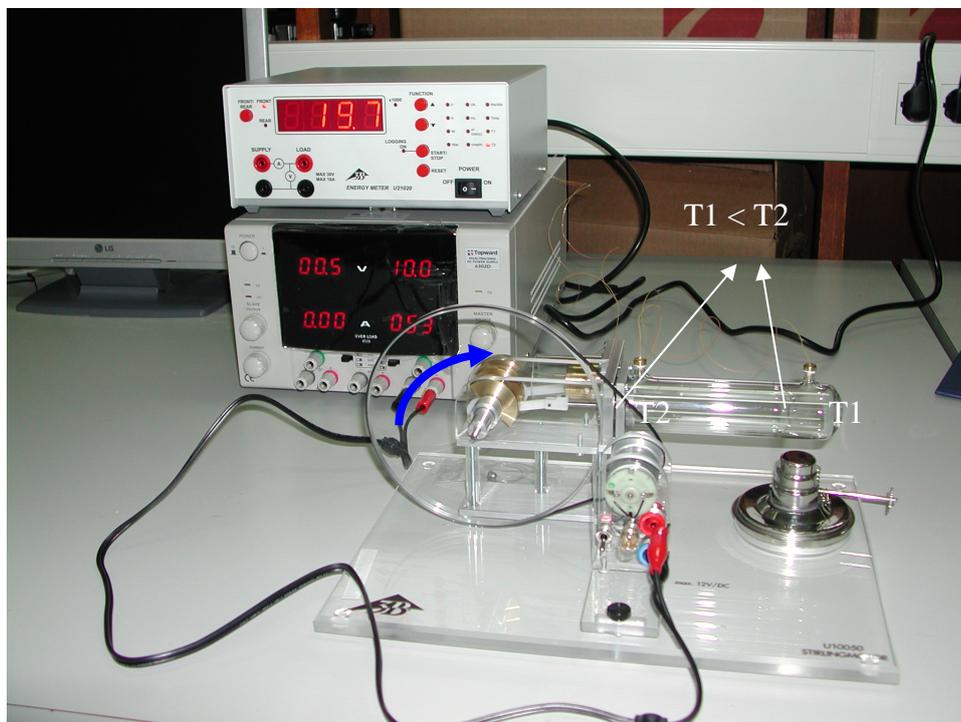


Fig. 4. Foto da experiência do frigorífico

2- Aguarde que se estabeleça um regime estacionário (temperaturas T_1 e T_2 estáveis). Preencha a tabela que se encontra no relatório, medindo as temperaturas T_1 e T_2 .

3- Em papel milimétrico, faça o gráfico de T_1 e T_2 em função de U .

Experiência 2: Utilização da máquina de Stirling como motor térmico.

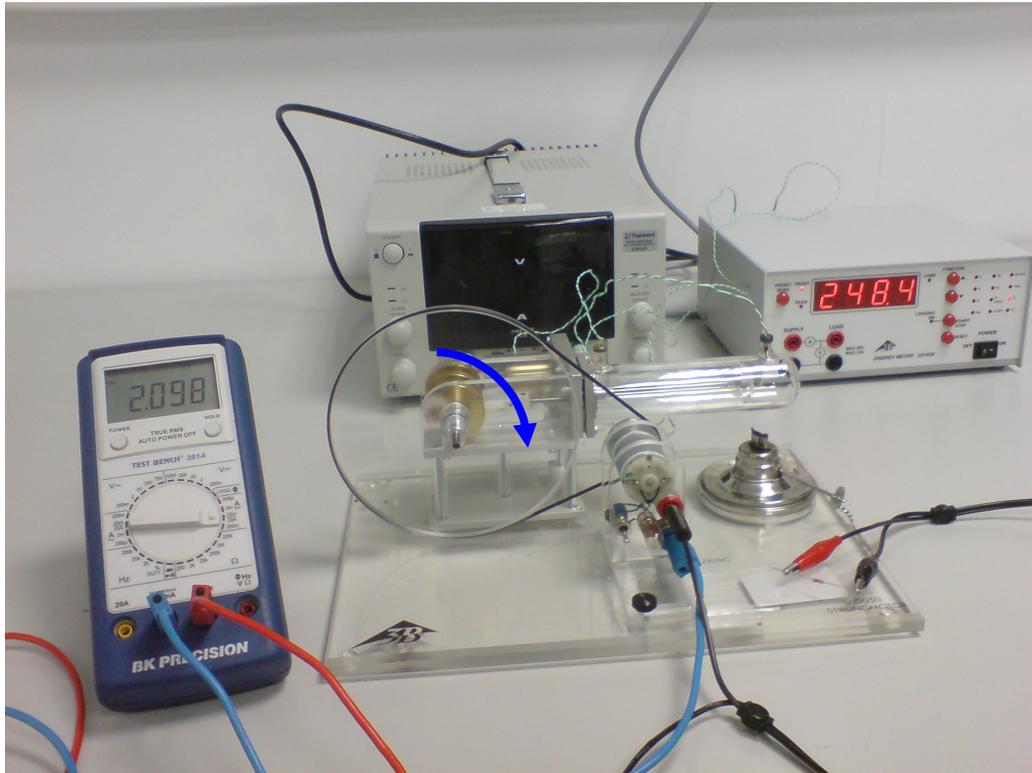


Fig. 5.
Montagem
experimental.

1- Monte a experiência tal como é indicado na Fig. 5. Ligue o monitor de temperatura (T_1 , T_2) e o multímetro. O multímetro deverá ser ligado em série com a resistência ôhmica (1 ou 10 k Ω) para medir a corrente gerada pelo motor. Como no início da primeira experiência, verifique novamente que os dois termopares leem a temperatura ambiente.

2- Acenda a lamparina. Espere até que a temperatura T_1 ultrapasse os 70 a 80 °C. A partir dessas temperaturas tente arrancar o motor rodando o volante à mão no sentido *horário* (quando está de frente para o volante, virado para o gerador elétrico). Depois do motor de Stirling arrancar, deixe atingir o regime estacionário (quando as temperaturas T_1 e T_2 estabilizam) e meça as duas temperaturas.

3- Ligue o interruptor para baixo. Meça a corrente que passa pela resistência e deixe estabilizar. Determine a potência elétrica da máquina térmica calculando a potência dissipada na resistência por efeito de Joule.

4- Utilizando uma régua e analisando o movimento da máquina estime aproximadamente o valor da variação relativa máxima V_2/V_1 do volume do sistema térmico (constituído pelo gás contido no sistema dos *dois* cilindros, aquele que contem o pistão que realiza o trabalho mecânico e aquele que contem o pistão de deslocamento: v. Fig. 2). Obtenha um valor aproximado do rendimento do motor de Stirling real (Eq. 2). Compare o resultado obtido com o rendimento de uma máquina de Carnot a operar entre duas fontes às mesmas temperaturas T_1 e T_2 .