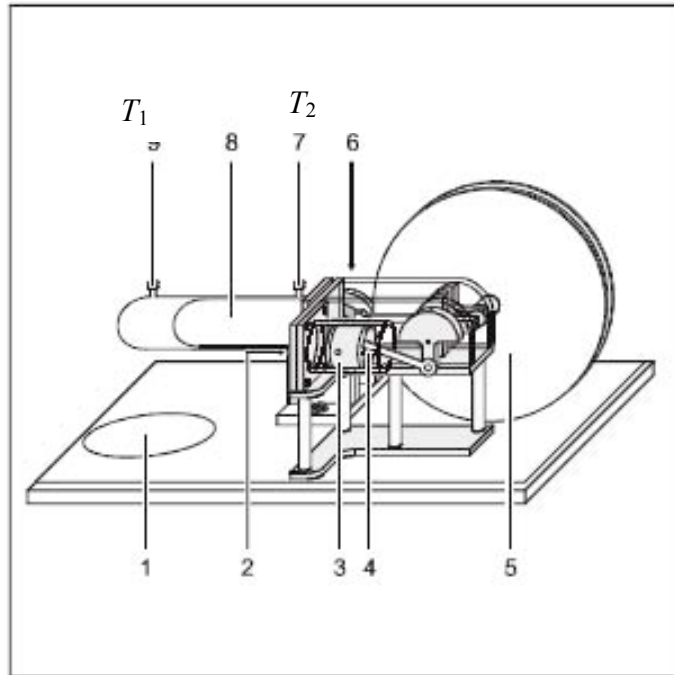


A máquina cíclica de Stirling

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 ciclo “pressão-volume”, pV , correspondente (ver Fig. 3).

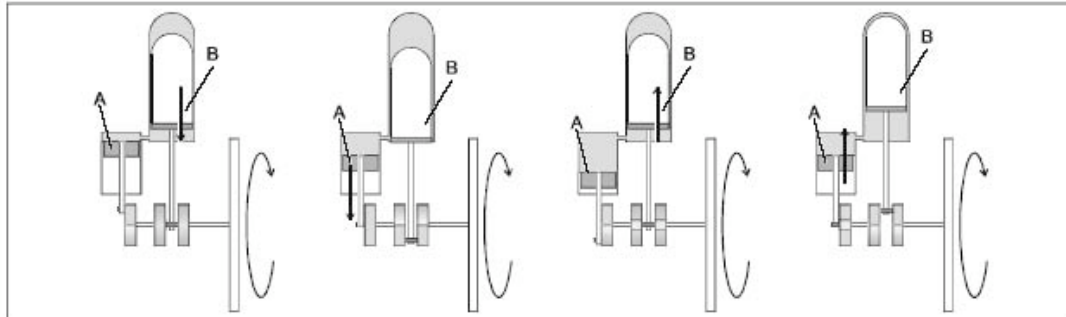


Fig. 2. A: pistão que realiza trabalho externo. B: pistão de deslocamento da massa de ar.

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 ciclo “pressão-volume”, pV , representado na Fig. 3). Segue-se a expansão (isotérmica) do ar quente no pistão mecânico (segundo esquema na Fig. 2, e ramo “b” no ciclo pV), 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 ciclo pV). 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 ciclo pV), 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).

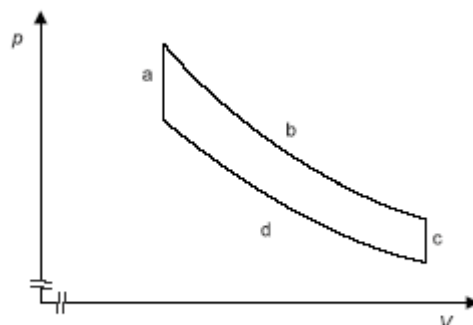


Fig. 3. Diagrama pV do ciclo teórico de Stirling.

MÉTODO EXPERIMENTAL

Experiência 1:

Utilização da máquina de Stirling como máquina frigorífica e como bomba de calor.

Equipamento

- 1- Máquina de Stirling
- 2- Fonte de alimentação DC (± 30 V)
- 3- Dois termopares tipo K
- 4- Monitor de temperatura (T_1 e T_2)

a) Máquina frigorífica

1- Alimente o motor eléctrico da máquina de Stirling com uma tensão de 6 a 12 V com incrementos de 2 V ou melhor. Escolha a polaridade de modo a que o motor rode no sentido **horário** (dê uma ajuda ao volante para arrancar o movimento).

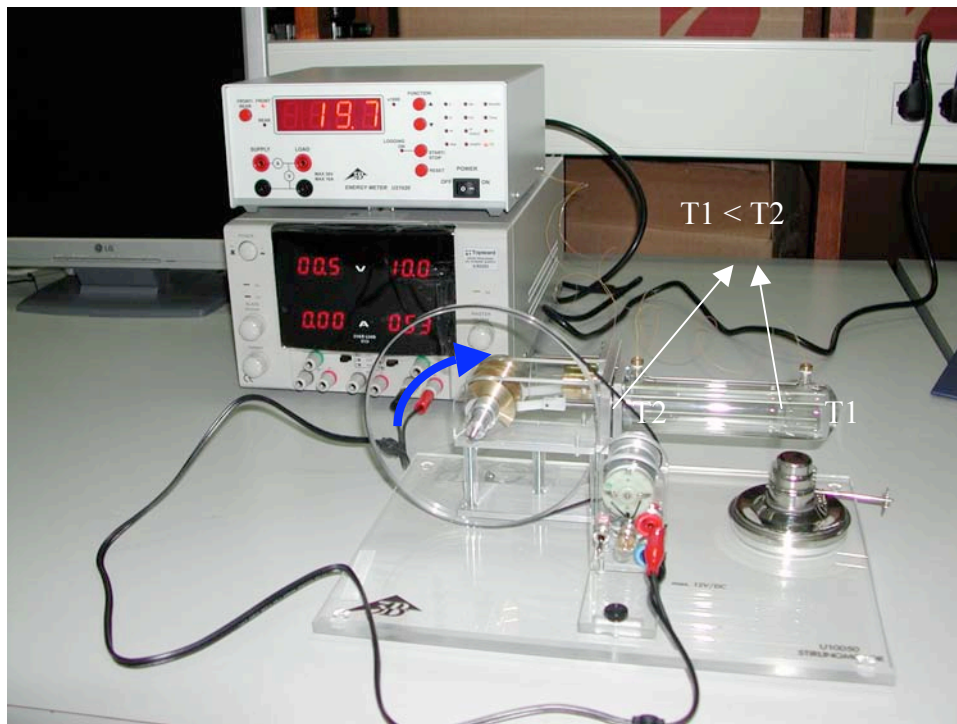


Fig. 4. Foto da experiência do frigorífico

2- Aguarde que se estabeleça um regime estacionário (temperaturas T_1 e T_2 estáveis). Preencha a tabela seguinte, medindo as temperaturas T_1 e T_2 .

Frigorífico	$V = 6$ V	$V = 8$ V	$V = 10$ V	$V = 12$ V
T_1 (°C)				
T_2 (°C)				

Faça o gráfico T_1 e T_2 em função de V e discuta os resultados obtidos.

b) Bomba de calor

- 1- Deixe que as temperaturas T_1 e T_2 regressem a valores próximos da temperatura ambiente.
- 2- Meça as temperaturas T_1 e T_2 .
- 3- Inverta a alimentação do motor eléctrico da máquina de Stirling. Varie a tensão de alimentação de 6 a 12 V com incrementos de 2 V ou melhor. O motor roda agora no sentido **anti-horário** (dê uma ajuda ao volante para arrancar o movimento).

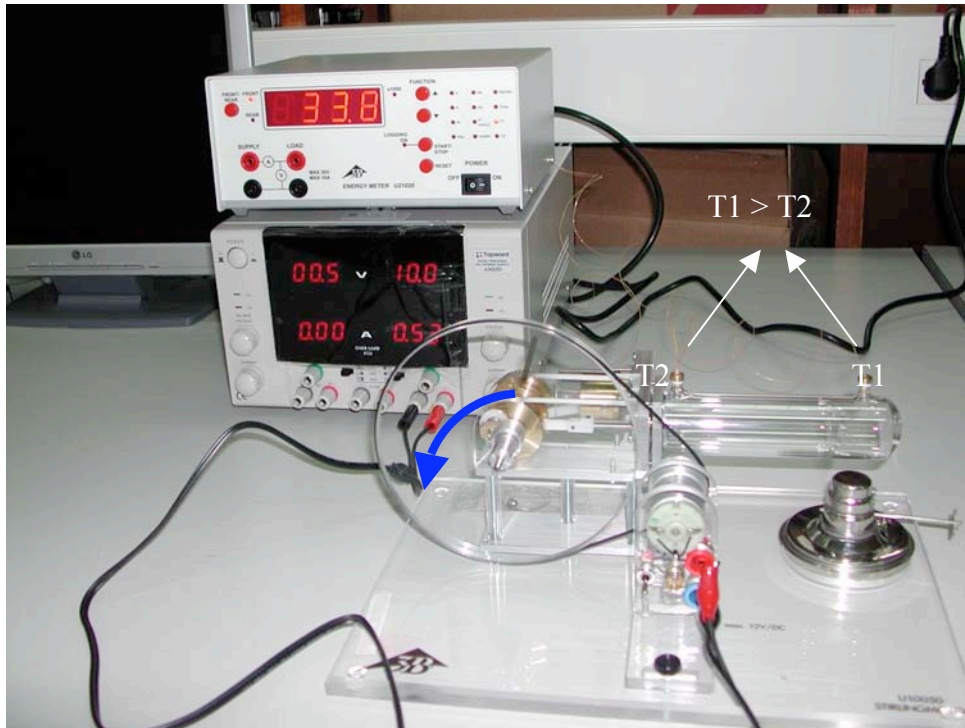


Fig. 5. Foto da experiência da bomba de calor

- 4- Aguarde que se estabeleça um regime estacionário (temperaturas T_1 e T_2 estáveis). Preencha a tabela seguinte, medindo as temperaturas T_1 e T_2 .

Bomba de calor	$V = 6 \text{ V}$	$V = 8 \text{ V}$	$V = 10 \text{ V}$	$V = 12 \text{ V}$
T_1 (°C)				
T_2 (°C)				

Faça o gráfico T_1 e T_2 em função de V e discuta os resultados obtidos.

Experiência 1:**Utilização do motor de Stirling como máquina térmica, medida de T_1 e T_2 , e cálculo do trabalho mecânico extraído do sistema.****(A) EQUIPAMENTO:**

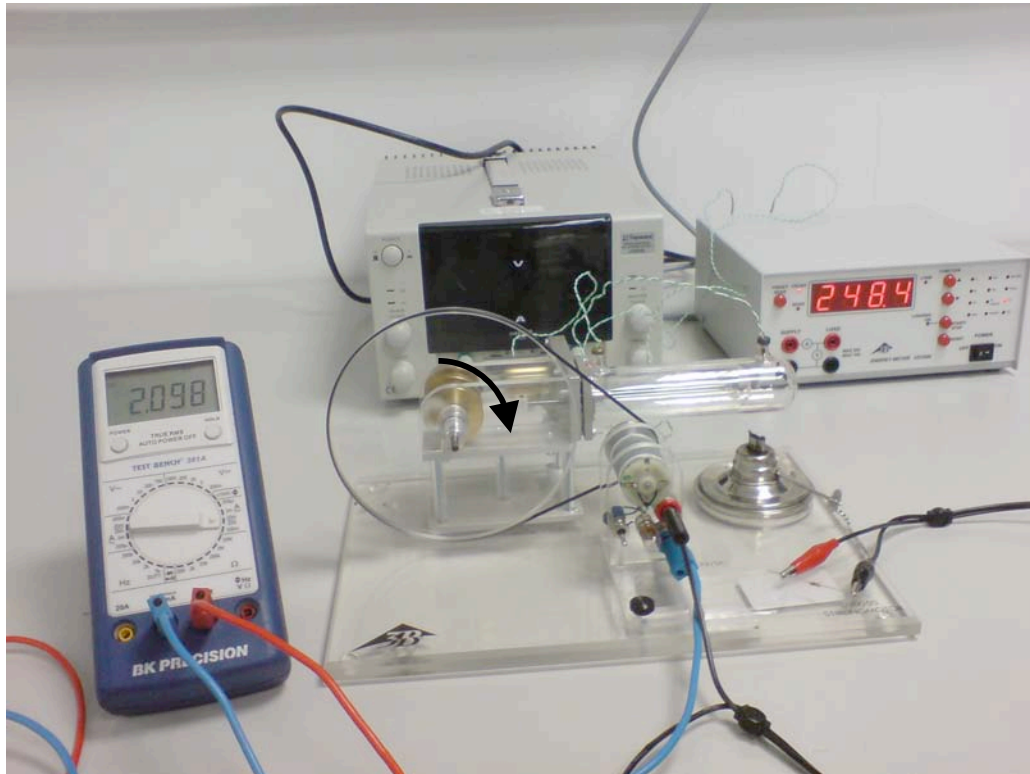
Motor de Stirling

Lamparina de álcool

Dois termopares tipo K (Omega Engineering)

Monitor de temperatura (T_1 e T_2)

Multímetro

Resistências de 1 k Ω e 10 k Ω **Fig. 6.**
Lay-out da experiência.**(B) PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL**

1-Monte a experiência tal como é indicado na Fig. 6. 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. Poderá também ser ligado em paralelo com a resistência ôhmica para medir a tensão gerada pelo motor. Verifique que os dois termopares lêem 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 e a pequena lâmpada). Depois do motor de Stirling arrancar, deixe atingir o regime estacionário (quanto as temperaturas T_1 e T_2 estabilizam).

3-Ligue o interruptor (ao lado da lâmpada) para baixo. Verifique qual é 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. Pode-se também estimar o

trabalho mecânico extraído através da potência dissipada. Finalmente tente ligar a lâmpada pondo o interruptor para cima e verificar se ela acende.

4- Calcule o rendimento de uma máquina de Carnot a operar entre duas fontes às temperaturas T_1 e T_2 . Compare o resultado obtido com o rendimento típico dum motor de Stirling real (cerca de 10-12%).

5- Ligue o interruptor da lâmpada e verifique se esta acende (a resistência interna da lâmpada deve rondar os 100Ω quando acesa).