



UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
CENTRO DE INOVAÇÃO - INOVA USP
Curso de Ciências Moleculares



Nota: 10/10

ALICE ALVES BOZZI
BRUNA RODRIGUES DA SILVA
LUIZA LUCCHETTI ODDI LOURENÇO
SOFIA FIGUEIREDO FORTI

RELATÓRIO Nº7 DE AULA PRÁTICA:
Máquinas térmicas

SÃO PAULO,
2025

ALICE ALVES BOZZI
BRUNA RODRIGUES DA SILVA
LUIZA LUCCHETTI ODDI LOURENÇO
SOFIA FIGUEIREDO FORTI

RELATÓRIO Nº7 DE AULA PRÁTICA:

Máquinas térmicas

Relatório referente à aula prática ministrada no dia 26/05/2025 na disciplina CCM0122 - Física II do Curso de Ciências Moleculares da Universidade de São Paulo, na modalidade de bacharelado, como requisito parcial avaliativo para aprovação semestral.

Orientador: Prof. Dr. Caetano Rodrigues Miranda

SÃO PAULO,
2025

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	4
2	OBJETIVOS.....	5
3	MATERIAIS E MÉTODOS.....	6
3.1	Pistão.....	6
3.2	Mudança de fase.....	6
3.3	Motor de Eron.....	7
3.4	Motor de Stirling.....	7
3.5	Máquina térmica.....	9
4	RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	9
4.1	Pistão.....	9
4.2	Mudança de fase.....	10
4.3	Motor de Eron.....	11
4.4	Motor de Stirling.....	12
4.5	Máquina térmica.....	14
5	CONCLUSÃO.....	14
6	REFERÊNCIAS.....	15

1 INTRODUÇÃO

A primeira lei da termodinâmica incorpora ao princípio geral da conservação de energia o reconhecimento de que o calor é, de fato, uma forma de energia. A caloria, que é uma unidade de medida da quantidade de calor, possui um equivalente mecânico. Esse fato reforça a compreensão de que o calor pode ser convertido em outras formas de energia, como o trabalho mecânico, consolidando seu caráter energético.

Um exemplo desses processos de conversão energética é a expansão de um fluido. Mantendo-se a pressão constante, um pequeno aumento de temperatura provoca uma expansão infinitesimal do fluido. Essa expansão representa um gasto de energia na forma de trabalho: diz-se que o gás realiza trabalho sobre o meio. Quando o fluido em questão é um gás, a variação de energia no sistema pode ser expressa pela fórmula:

$$\Delta U = \Delta Q - \Delta W$$

Equação 1: Primeira lei da Termodinâmica.

Nessa equação, U representa a energia interna do gás e é uma função de estado que depende exclusivamente da temperatura, Q é o calor recebido, e W é o trabalho realizado pelo gás. Diversos ciclos de transformação de calor podem ser caracterizados pela relação entre essas três grandezas. Alguns ciclos ocorrem sob condições específicas, como $\Delta Q = 0$ (processos adiabáticos) ou $\Delta W = 0$ (processos isocóricos), a depender do propósito da transformação e das propriedades dos reservatórios envolvidos, como serem adiabáticos ou isotérmicos.

A possibilidade de um processo de expansão ser reversível ou não está ligada a dois fatores: a lentidão com que ele ocorre, de forma que o sistema passe por uma sucessão de estados de equilíbrio térmico, e a ausência de atrito. Quando o atrito é desprezível, não há perda de energia; e, se o meio externo realizar o mesmo trabalho sobre o gás, este poderá recuperar a energia térmica que possuía inicialmente.

Historicamente, a geração de energia se dava através do movimento das águas, da tração animal, entre outros meios. Com a Revolução Industrial, no entanto, descobriu-se uma maneira mais eficiente de obtenção de energia: a utilização do calor gerado pela combustão de carvão e outros combustíveis para produzir vapor. Foi nesse contexto que surgiram as primeiras máquinas a vapor, que exploravam o movimento de gases para gerar energia prontamente utilizável.

A segunda lei da termodinâmica trata das diferentes formas de energia, em especial a energia térmica, e da possibilidade (ou não) de reversibilidade dos processos, como os realizados por máquinas térmicas. Seu enunciado por Kelvin afirma: “É impossível realizar um processo

térmico cujo único efeito seja remover calor de um reservatório térmico e produzir uma quantidade equivalente de trabalho.”

Nesse contexto, o termo “único efeito” indica que o sistema deve retornar ao seu estado inicial, ou seja, que o processo seja cíclico. A ideia de um processo cíclico está diretamente relacionada à noção de reversibilidade, sendo essa a base do conceito de entropia.

Máquinas térmicas são, portanto, dispositivos que transformam calor em outras formas de energia, como o trabalho mecânico. A equivalência entre diversas formas de energia é um dos pilares da Física moderna. Uma máquina térmica (motor térmico) produz trabalho a partir do calor por meio de ciclos. De acordo com a segunda lei da termodinâmica, para funcionar, esse tipo de máquina requer dois reservatórios térmicos a temperaturas distintas, $T_1 > T_2$: um atuando como fonte quente e outro como fonte fria. Onde a fonte quente fornece calor Q_1 e a fonte fria “recebe” calor Q_2 :

$$W = Q_1 - Q_2$$

Equação 2: Equação da eficiência.

Onde W é o trabalho realizado pelo motor em um ciclo. Pela segunda lei, na equação 2 deve valer: $Q_2 > 0$ e $W < Q_1$. Um exemplo teórico ideal desse tipo de processo é o ciclo de Carnot, que serve de modelo para a eficiência máxima possível de uma máquina térmica entre duas temperaturas fixas. Os experimentos a seguir irão ilustrar, na prática, diferentes ciclos térmicos mediados por máquinas, como o motor de Stirling, o motor de Heron e um pistão impulsionado por gás.

2 OBJETIVOS

O relatório apresentado tem como objetivo principal analisar qualitativamente e/ou quantitativamente os experimentos realizados. O experimento de mudança de fases objetivou investigar e avaliar o aumento volumétrico observado dentro de um balão de vidro ao enchê-lo com água de forma não convencional, utilizando o fenômeno da mudança de fase da água. Os demais experimentos dedicaram-se à análise comparativa de motores térmicos e de seu modo de funcionamento, explorando diferentes ciclos termodinâmicos e as vantagens e desvantagens de cada um deles.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

3.1 Pistão

O aparato experimental do pistão consiste em um tubo, um pistão e um disco acoplado ao pistão, como mostra a figura 1. O experimento foi realizado ao soprar continuamente no tubo, movimentando o pistão e consequentemente movimentando o disco.

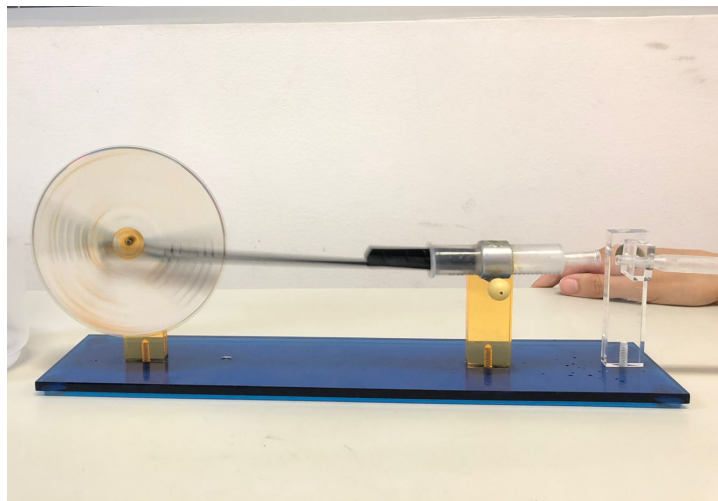


Figura 1: Aparato experimental do experimento do pistão.

Fonte: Autores.

3.2 Mudança de fase

O aparato experimental consiste em um tubo aberto com ampola esférica feita de vidro, um isqueiro para aquecê-lo e um recipiente com água, como mostrado na figura 2. Inicialmente aqueceu-se o tubo vazio e mergulhou-se na água. Para uma segunda análise, aqueceu-se o tubo um pouco de água dentro, mergulhando-o novamente.



Figura 2: Balão de vidro aquecido em recipiente com água.

Fonte: Autores.

3.3 Motor de Eron

O aparato experimental, exibido na figura 3, foi montado com os seguintes materiais:

- Um balão de vidro com dois tubos capilares laterais, dispostos horizontalmente, que funcionam como bocais de exaustão;
- Uma haste metálica que sustenta o balão e permite seu equilíbrio e rotação;
- Um suporte vertical de madeira e metal, garantindo estabilidade ao sistema;
- Uma lamparina como aquecedor externo posicionado sob o balão para fornecer calor.

O balão foi preenchido parcialmente com água e cuidadosamente equilibrado na estrutura metálica de forma que pudesse girar livremente ao redor do eixo vertical. Durante o experimento, o balão foi aquecido com uma chama colocada sob sua base esférica. Com o aumento da temperatura, o sistema começou a girar.



Figura 3: Aparato experimental do motor de Eron

Fonte: Autores

3.4 Motor de Stirling

Materiais utilizados:

- Dois pistões ativos;
- Dois cilindros (um com aquecimento e outro com resfriamento);
- Virabrequim com defasagem angular;
- Gás em ciclo fechado (ex: ar, hélio ou hidrogênio).

Procedimento realizado:

Conectaram-se os dois cilindros com temperaturas diferentes por meio de um virabrequim com defasagem angular, permitindo o movimento alternado dos pistões (Figura 4). O gás foi deslocado continuamente de um cilindro aquecido para o outro resfriado, passando por ciclos de aquecimento e resfriamento.

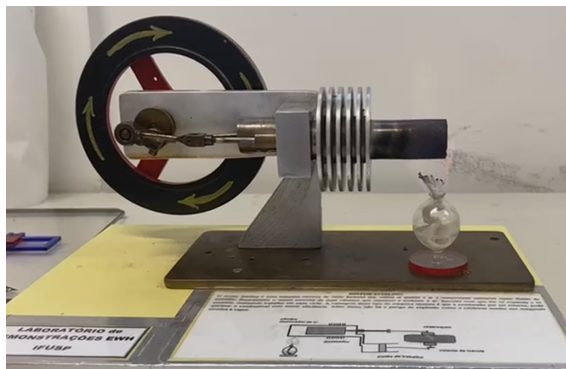


Figura 4: Motor de Stirling 1

Fonte: Autores.

Materiais utilizados:

- Tubo de vidro com duas bolinhas de vidro e uma de ferro;
- Seringa de vidro (atuando como pistão de trabalho);
- Suporte de PVC e madeira;
- Espiriteira a álcool (fonte de calor).

Procedimento realizado:

Conectar o tubo de vidro (contendo as bolinhas) à seringa de vidro e fixá-lo no suporte de PVC/madeira e posicionar a espiriteira sob a extremidade do tubo onde estão as bolinhas para fornecer calor (Figura 5).

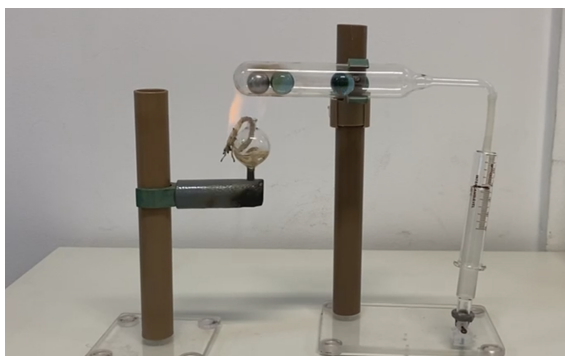


Figura 5: Motor de Stirling 2

Fonte: Autoral.

3.5 Máquina térmica

O experimento consistiu em observar o funcionamento de um protótipo que simula uma máquina térmica, em menor escala e com estrutura simplificada, explicito na figura 6. O protótipo em si era feito de uma câmara metálica em formato cilíndrico na qual era colada água; embaixo do cilindro, havia um espaço onde cabia a fonte de calor, neste caso um pavio embebido com álcool, que fora aceso e colocado de modo a esquentar a água dentro do recipiente.

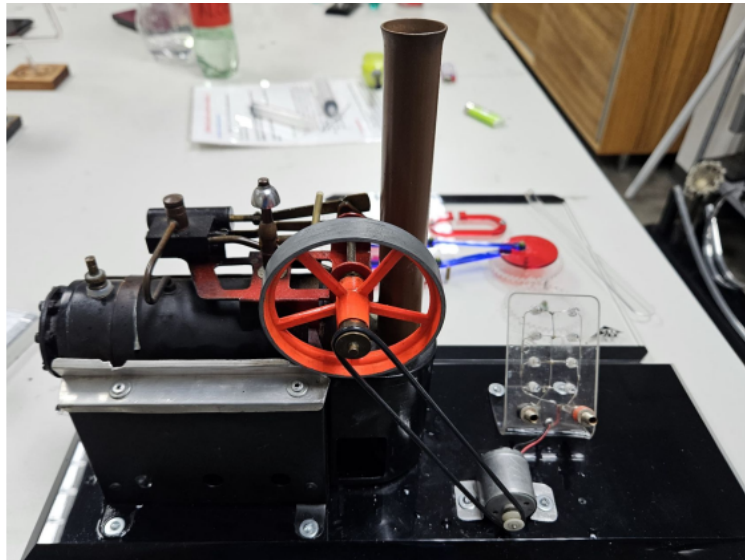


Figura 6: protótipo de máquina térmica movida a vapor.

Fonte: Slides da aula.

O recipiente com a água era conectado a outro compartimento, para o qual o vapor da água era direcionado após a água entrar em fervura. Esse vapor impulsionava o movimento dos pistões; e o gás saía por uma abertura superior enquanto os pistões se moviam. O movimento dos pistões era ligado ao movimento das rodas, que giravam rapidamente.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 Pistão

O funcionamento do experimento inicia-se com o sopro contínuo que introduz ar no cilindro, atrás do pistão. A pressão exercida pelo ar força o pistão a se deslocar linearmente ao longo do cilindro. Este movimento linear do pistão é transmitido ao disco e, como o pistão está conectado a um ponto excêntrico no disco (atuando como uma manivela), o movimento linear da extremidade do pistão é convertido em movimento rotacional do disco.

A fonte de energia para o movimento do sistema é o trabalho realizado pelo ar soprado ao se expandir dentro do cilindro. Quando o ar se expande, ele empurra o pistão, realizando trabalho mecânico sobre ele. Esse trabalho é dado pela fórmula : $W = P \cdot \Delta V$, onde P é a pressão e ΔV é a variação de volume.

Cabe também destacar que o conjunto pistão-disco constitui um mecanismo biela-manivela - como nos motores à combustão interna - fundamental para a conversão do tipo de movimento. Este mecanismo transforma o movimento linear do pistão em movimento rotacional do disco. O pistão executa um movimento de translação, a manivela - que, nesse caso, é o disco - executa um movimento de rotação, e a biela, uma haste rígida que conecta o pistão a um ponto excêntrico no disco, executa um movimento plano geral, combinando translação e rotação.

O ciclo operacional do pistão pode ser descrito nos seguintes passos:

1. Admissão/Expansão do ar pelo sopro: O ar é “soprado” para dentro da região de trás do pistão e a pressão do ar nesta região aumenta rapidamente.
2. Movimento do pistão: A diferença de pressão entre as faces do pistão gera uma força resultante que empurra o pistão ao longo do cilindro. Este é o curso onde o trabalho é realizado pelo ar sobre o pistão. O movimento linear do pistão é convertido em rotação do disco pelo mecanismo biela-manivela.
3. Retorno do pistão: Após uma volta completa do disco, o pistão retorna a posição inicial, e o sopro contínuo, dá continuidade ao ciclo, retornando a fase 1.

4.2 Mudança de fase

De início, aqueceu-se o vidro vazio e observou-se a água subindo lentamente pelo tubo, preenchendo um pouco da ampola. A explicação desse fenômeno se baseia no aquecimento do vidro que também aquece o ar em seu interior, o que, conseqüentemente, aumenta sua pressão, segundo a lei dos gases ideais ($P.V = n.R.T$). Assim, quando a extremidade aberta do tubo é imersa na água, o ar dentro da ampola começa a resfriar. A diminuição da temperatura reduz a pressão interna, criando uma diferença de pressão em relação à pressão atmosférica externa. Isso faz com que a água suba pelo tubo até que as pressões se equilibrem.

Quando aqueceu-se o tubo com um pouco de água dentro, observou-se vapor saindo do tubo e, ao mergulhá-lo na água, a água penetrou na ampola com muita rapidez, preenchendo quase todo o volume interno. Isso pode ser explicado pois, quando a água foi fervida dentro da ampola, o vapor ocupou praticamente todo o espaço interno, expulsando o ar que estava contido ali. Conseqüentemente, com o resfriamento, o vapor se transformou em líquido que, além de diminuir a pressão interna, fez a água ocupar todo o espaço da ampola. No experimento, o volume final da

água que preencheu a ampola pode ser associado ao volume de 1 mol de água líquida (aproximadamente 18 mL, conforme a Figura 7). No entanto, no início da segunda etapa, essa mesma quantidade de moléculas no estado de vapor estava a 100 °C, ocupando um volume de aproximadamente 30,6 L, dado pela lei dos gases ideais. A transição de 30,6 L (gás) para apenas 18 mL (líquido) representa uma redução de volume drástica — cerca de 1700 vezes. É essa contração súbita que causa a queda abrupta de pressão e o consequente preenchimento violento da ampola pela água, impulsionada pela pressão atmosférica externa.

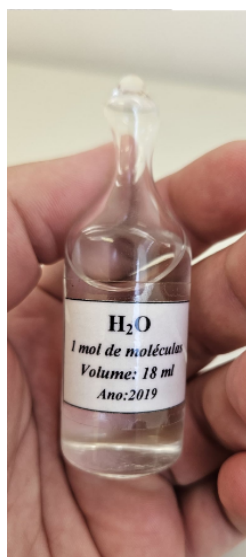


Figura 7: 1 mol de moléculas de H_2O .

Fonte: Slides de aula.

O experimento demonstra a transição de fase da água do estado gasoso para o líquido, conhecida como condensação. Esse princípio foi amplamente empregado em máquinas térmicas históricas, como as bombas a vapor usadas para drenagem de poços e minas de carvão, funcionando como sistemas de vácuo primitivos.

4.3 Motor de Eron

Ao iniciar o aquecimento da base do balão de vidro com uma chama contínua, após passar o tempo necessário para o ar no interior atingir a pressão adequada, observou-se que o balão saiu de seu estado inicial de repouso, exibido na figura 8A, e borbulhas em seu interior precederam o início de um movimento giratório crescente, observado na figura 8B.

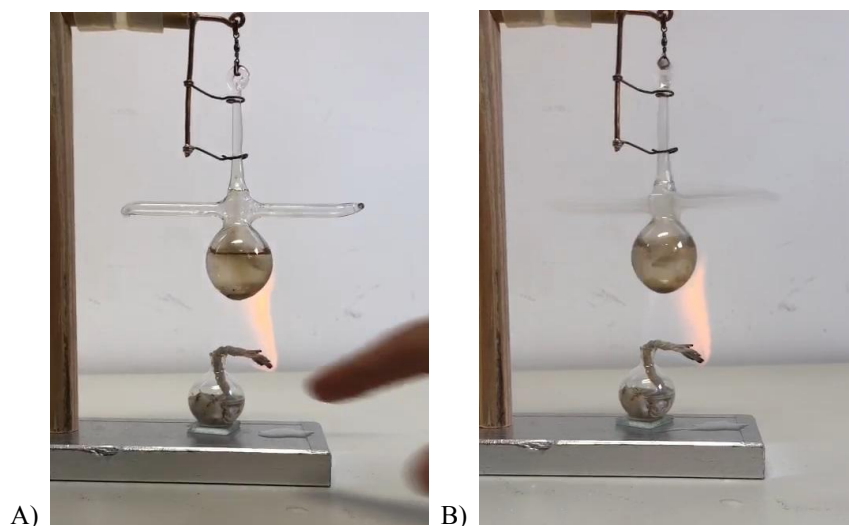


Figura 8: A: Motor de Eron em repouso; B: Motor de Eron em aquecimento.

Fonte: Autores

À medida que a temperatura aumentava, o ar contido no interior do balão se expandia e era forçado a sair pelos tubos capilares laterais, gerando jatos de ar direcionados. Esses jatos, ao escaparem em sentidos opostos, provocaram uma força de reação responsável por impulsionar o sistema em rotação, de forma semelhante ao princípio de funcionamento de um foguete. O balão, então, passou a girar ao redor de seu eixo vertical, suspenso pela haste metálica superior. O movimento manteve-se contínuo com velocidade de rotação aparentemente constante, demonstrando a eficiência da conversão de energia térmica em energia mecânica.

Também pôde ser observado que a rotação era sensível à simetria do sistema: desalinhamentos ou atritos nos pontos de apoio diminuía a eficiência ou impediam o movimento; ao retirar a chama, o motor desacelerava gradualmente, até parar, indicando que o movimento era diretamente sustentado pelo aquecimento contínuo, e obstruções nas extremidades dos capilares afetavam o desempenho, reduzindo a força de propulsão.

4.4 Motor de Stirling

Embora ambos os experimentos explorem o funcionamento do motor de Stirling, eles apresentam diferenças significativas em sua construção e comportamento prático. O primeiro modelo, mais tradicional, utiliza dois pistões ativos conectados por um virabrequim com defasagem angular, funcionando com ciclos de aquecimento e resfriamento do gás entre dois cilindros. No entanto, esse sistema apresenta limitações: ele não inicia o ciclo sozinho, exigindo um motor de arranque, e sua resposta lenta às mudanças de carga o torna inadequado para aplicações que demandam rápidas variações de potência, como veículos. Já o segundo experimento é uma variação didática que substitui o pistão de deslocamento por bolinhas de gude móveis dentro de um tubo

inclinado, acompanhadas de uma seringa. O movimento das bolinhas, guiado pela gravidade, promove a troca de ar entre regiões quentes e frias, iniciando e mantendo o ciclo sem necessidade de motor auxiliar. Apesar de mais simples, esse modelo é altamente sensível a perturbações externas e depende de condições estáveis de temperatura e posição para funcionar adequadamente. Em essência, ambos os sistemas executam o ciclo termodinâmico de Stirling, com compressão e expansão do gás, variação de volume e pressão, mantendo os princípios fundamentais de um motor térmico, como mostrado na figura 9.

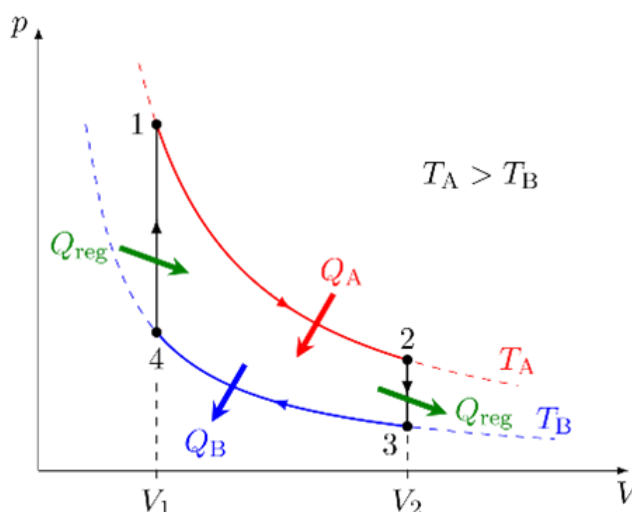


Figura 9: Ciclo aproximado de um motor Stirling que contém duas isothermas e duas isocóricas.

Fonte: <https://labdemon.ufpa.br/fisica-termica/motor-stirling-furukawa>

4.5 Máquina térmica

A máquina térmica em questão, mostrada na figura 10, usa energia térmica, vinda do fogo aceso, para gerar energia mecânica/cinética, que por sua vez gera energia elétrica. Ao constatar-se que as mini-lâmpadas acenderam, ficou evidente que a máquina realizava de fato sua função de conversão energética.

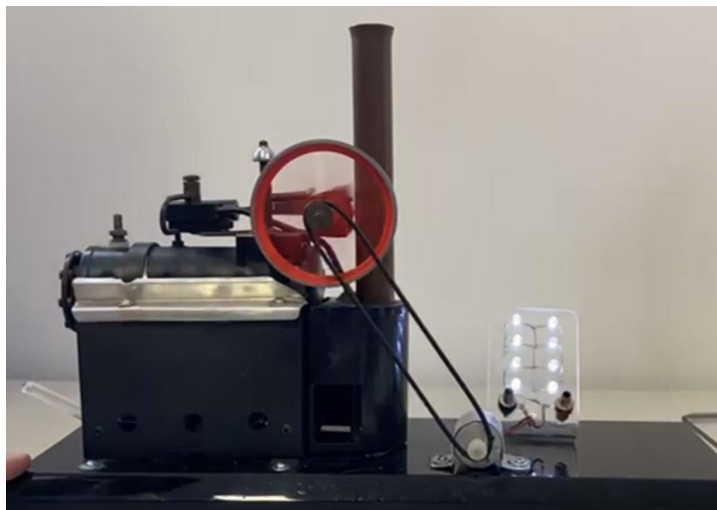


Figura 10: Máquina térmica ligada a mini-lâmpadas acesas.

Fonte: Autores.

Analizando a máquina sob a ótica da termodinâmica, o pavio aceso é a fonte quente do sistema, e age como o reservatório quente ao aquecer a água. O reservatório frio, que recebe o calor rejeitado após a realização do trabalho, é o ambiente externo, o ar ao redor da máquina. Após a expansão e o trabalho realizado pelos pistões, o vapor perde parte de sua energia térmica para o ambiente. Esse meio externo funciona como a fonte fria, absorvendo o calor residual do ciclo.

A energia térmica da fonte quente Q_1 é convertida parcialmente em trabalho W , mas por princípio não é uma conversão de 100%.

5 CONCLUSÃO

A conversão de calor em trabalho foi observada em diferentes dispositivos, com destaque para o comportamento dos gases em processos de expansão e compressão. O experimento do pistão ilustrou a conversão de energia pneumática em movimento mecânico através do mecanismo biela-manivela, analogamente ao funcionamento básico de motores a combustão. O experimento de mudança de fase evidenciou a relação entre temperatura, pressão e volume, conforme a equação de estado dos gases ideais. O experimento do Motor de Eron permitiu a visualização clara dos efeitos

da dilatação térmica dos gases e do princípio de ação e reação, reforçando o entendimento de como forças térmicas podem ser utilizadas para gerar movimento em sistemas físicos simples, sem a necessidade de partes móveis complexas ou eletricidade. Os dois modelos de motor de Stirling, embora distintos em construção, operaram segundo o mesmo ciclo termodinâmico, ressaltando a importância da transferência cíclica de calor entre fontes a diferentes temperaturas. Por fim, a máquina térmica sintetizou o funcionamento idealizado desses sistemas, confirmando os limites impostos pela segunda lei da termodinâmica.

Dessa forma, concluímos que os experimentos realizados demonstraram, de forma aplicada em dispositivos reais, os princípios fundamentais da termodinâmica.

6 REFERÊNCIAS

NUSSENZVEIG, Moysés. Curso de Física Básica 2: Fluidos, Oscilações e Ondas, Calor. 5. ed. São Paulo: Edgard Blücher, 2012.

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ. *Máquina de Heron*. Laboratório Didático de Demonstrações da UFPA. Disponível em:

<https://labdemon.ufpa.br/fisica-termica/maquina-de-heron>. Acesso em: 9 jun. 2025.

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ. *Motor Stirling - Furukawa*. Laboratório Didático de Demonstrações da UFPA. Disponível em:

<<https://labdemon.ufpa.br/fisica-termica/motor-stirling-furukawa>>. Acesso em: 8 jun. 2025.

WIKIPEDIA. *Stirling engine*. Wikipedia, The Free Encyclopedia, 2024. Disponível em:

https://en.wikipedia.org/wiki/Stirling_engine. Acesso em: 8 jun. 2025.

YOUNG, Hugh D.; FREEDMAN, Roger A. Física 2: termodinâmica e ondas. 14. ed. São Paulo: Pearson, 2016.

Física Universitária. Tema 05 - Transições de Fase | Experimentos - Condensação do vapor da água. 2016. Disponível em: <https://www.youtube.com/watch?v=ZC8Xn4nrw3c>. Acesso em: 7 jun. 2025.