

**UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
PRÓ-REITORIA DE GRADUAÇÃO
CURSO DE CIÊNCIAS MOLECULARES**

Nota: 10/10

BRUNO KLEINE MOLLICA (14562470)
CAUÊ RAFFAINI BRONDI (14564513)
DIEGO ALEXANDRE T. DOS SANTOS (14566283)
FELIPE SCHOENACKER WEY (15451717)
JOSÉ ALEXANDRE SOARES DE OLIVEIRA (11761208)

RELATÓRIO DE EXPERIMENTOS VII
Máquinas Térmicas e Conversão de Energia

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
PRÓ-REITORIA DE GRADUAÇÃO
CURSO DE CIÊNCIAS MOLECULARES

RELATÓRIO DE EXPERIMENTOS VII
Máquinas Térmicas e Conversão de Energia

Atividade apresentada ao docente Caetano Rodrigues Miranda, na disciplina de Física II (CCM0122), como atividade para composição de nota.

São Paulo
2025

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	3
2	METODOLOGIA.....	3
2.1	BALÃO DE VIDRO.....	3
2.2	MOTOR DE ERON.....	4
2.3	MOTOR DE STIRLING.....	5
2.4	MOTOR DE STIRLING (VARIAÇÃO).....	6
2.5	MÁQUINA A VAPOR.....	6
2.5	PISTÃO MOVIDO A SOPRO.....	6
3	RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	7
3.1	BALÃO DE VIDRO.....	7
3.2	COMPARAÇÃO ENTRE MOTORES.....	8
4	CONCLUSÃO.....	10
	REFERÊNCIAS.....	11

1 INTRODUÇÃO

A termodinâmica é o campo da física que estuda as relações entre calor, trabalho e outras formas de energia. O estudo da termodinâmica possibilitou o desenvolvimento de máquinas térmicas, sistemas projetados para transformar energia térmica em trabalho mecânico. As máquinas térmicas operam sob os princípios da primeira e segunda lei da termodinâmica, que estabelecem os limites teóricos para a conversão de energia (NUSSENZVEIG, 2014; HALLIDAY, 2016).

Foram realizados cinco experimentos para demonstrar os princípios fundamentais da termodinâmica e o funcionamento de diferentes tipos de máquinas térmicas. O primeiro, envolvendo um balão de vidro, ilustra os efeitos da variação de pressão e temperatura em um gás. Os experimentos subsequentes analisam diferentes motores: o Motor de Eron, o primeiro motor a vapor documentado; duas variações do Motor de Stirling, conhecido por sua alta eficiência teórica e ciclo fechado; e uma Máquina a Vapor com pistão. (ÇENGEL, 2013).

Este relatório tem dois objetivos: discutir o aumento volumétrico no interior do balão de vidro e analisar comparativamente os diferentes motores e seus respectivos ciclos termodinâmicos, apresentando as vantagens, desvantagens e eficiências na conversão de energia térmica em trabalho.

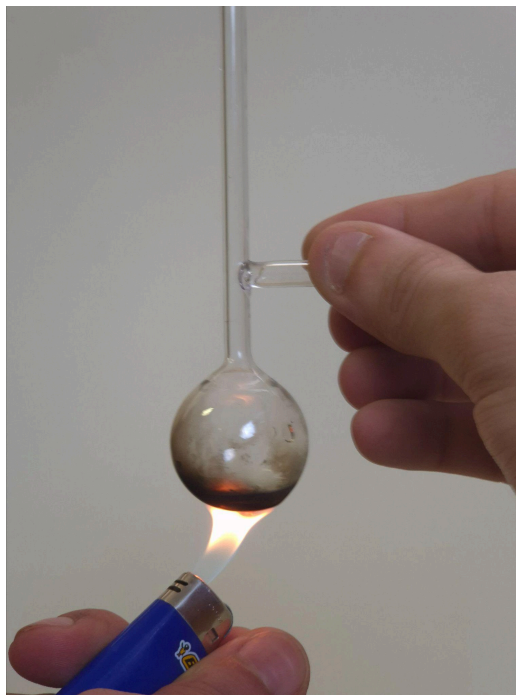
2 METODOLOGIA

2.1 BALÃO DE VIDRO

O sistema consiste em um balão de vidro conectado a um tubo de vidro aberto na extremidade inferior. Um aluno utiliza uma fonte térmica (isqueiro) sob a base do balão de vidro. Uma vez aquecido, a fonte térmica é removida e a extremidade aberta do tubo é imediatamente inserida em um recipiente contendo água à temperatura ambiente. O contato com a água faz com que o balão seja instantaneamente preenchido com água. Os resultados do experimento são registrados em vídeo para análise posterior.

A figura 1 abaixo mostra o sistema descrito sendo aquecido por isqueiro.

Figura 1 - Aquecimento do balão de vidro com isqueiro na fase preparatória do experimento de sucção por resfriamento.



Fonte: elaboração própria.

2.2 MOTOR DE ERON

O sistema consiste em um motor de Eron montado sobre uma base metálica, composto por uma haste vertical de suporte e um braço horizontal acoplado a um balão de vidro, conforme apresentado na figura 2. Os alunos adicionam água ao balão de vidro e posicionam uma fonte de energia térmica (lâmparina de álcool) abaixo do balão para promover o aquecimento. O aquecimento da água gera vapor que é direcionado através dos tubos laterais apontados em direções opostas, criando movimento rotacional do motor. O processo é registrado em vídeo pelos alunos para análise comparativa posterior com os demais motores térmicos.

Figura 2 - Duas vistas do motor de Heron: (esquerda) vista frontal mostrando o balão de vidro suspenso por suporte metálico com tubos laterais e lâmparina na base; (direita) vista lateral do mesmo aparato demonstrando a configuração completa do sistema.

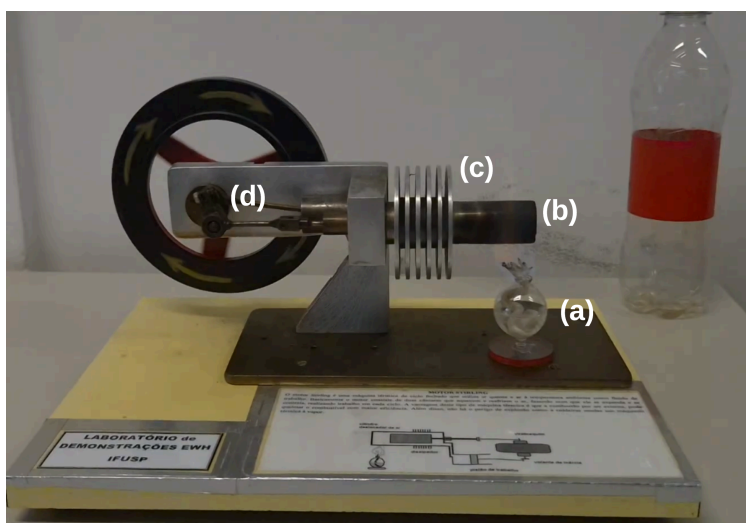


Fonte: elaboração própria.

2.3 MOTOR DE STIRLING

O motor de Stirling é uma máquina térmica de ciclo fechado. O equipamento é composto por um cilindro com pistão, dissipador e virabrequim (conforme legendado na figura 3). Os alunos posicionam uma fonte de energia térmica (lâmparina de álcool) sob a base do cilindro para fornecer calor ao sistema. O calor aplicado promove o movimento do pistão, que é transmitido ao virabrequim, responsável por converter o movimento linear em movimento rotacional.

Figura 3 - Motor de Stirling montado com componentes identificados: (a) lâmparina de álcool para aquecimento, (b) cilindro com pistão, (c) dissipador de calor, (d) virabrequim com volante.

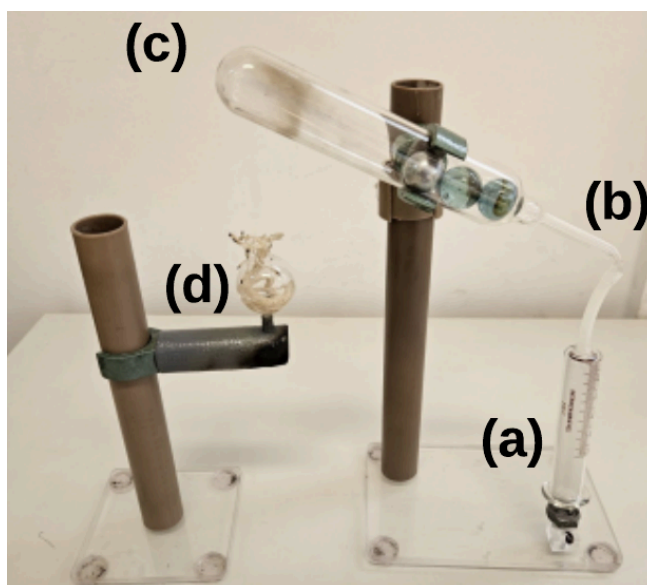


Fonte: elaboração própria.

2.4 MOTOR DE STIRLING (VARIAÇÃO)

O motor deste experimento é uma variação do motor de Stirling, constituído por uma haste vertical que sustenta um tubo de vidro horizontal. Uma das extremidades do tubo de vidro horizontal está acoplada a uma seringa através de uma mangueira de plástico. No interior do tubo de vidro há três bolinhas de gude que agem como dissipadores de calor. Na extremidade oposta à qual o sistema está acoplado à seringa, os alunos aplicam uma fonte de energia térmica (lâmparina com álcool), fazendo com que o motor comece a funcionar. O aquecimento promove a expansão do ar no interior do tubo, empurrando o êmbolo da seringa para fora, e o posterior resfriamento pelas bolinhas de gude faz com que o ar se contraia, puxando o êmbolo de volta, criando um movimento alternado contínuo. O sistema descrito é apresentado na figura 4.

Figura 4 - Variação do motor de Stirling com componentes identificados: (a) seringa de vidro; (b) mangueira; (c) tubo de vidro horizontal contendo bolinhas de gude como dissipadores; (d) lâmparina de álcool.



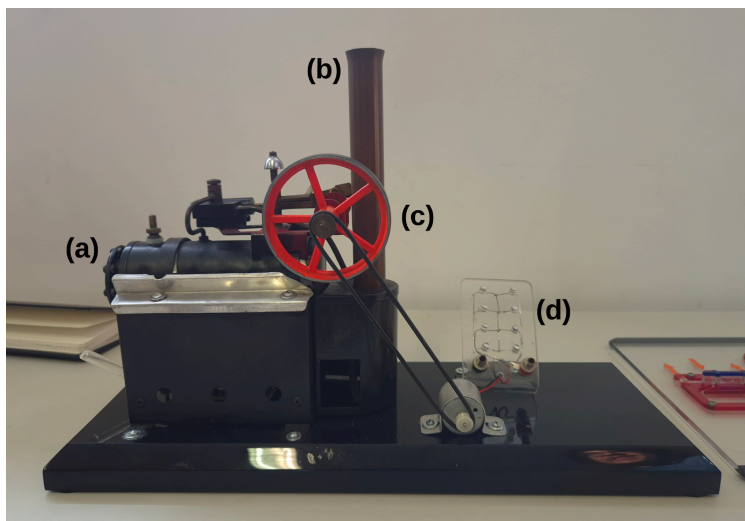
Fonte: Adaptado dos slides da aula 22 do Curso de Física II - CCM, com legenda elaborada pelos autores.

2.5 MÁQUINA A VAPOR

O sistema consiste em uma máquina a vapor composta de caldeira e pistão — acoplado a um gerador elétrico. No início do experimento, a água adicionada a caldeira é aquecida por uma fonte térmica (lâmparina com álcool). O vapor gerado pela ebulição movimenta o pistão, que está conectado a um volante. O movimento do pistão é convertido em movimento rotacional pelo volante, acionando o gerador elétrico. A energia gerada é

utilizada para acender um painel led conectado ao circuito. A figura 5 abaixo apresenta o sistema descrito.

Figura 5 - Máquina a vapor com componentes identificados: (a) caldeira com sistema de aquecimento; (b) chaminé de escape de vapor; (c) volante; (d) gerador elétrico acoplado com painel LED para demonstração da conversão de energia térmica em energia elétrica. A fonte de aquecimento está posicionada sob a caldeira (não aparece na imagem).

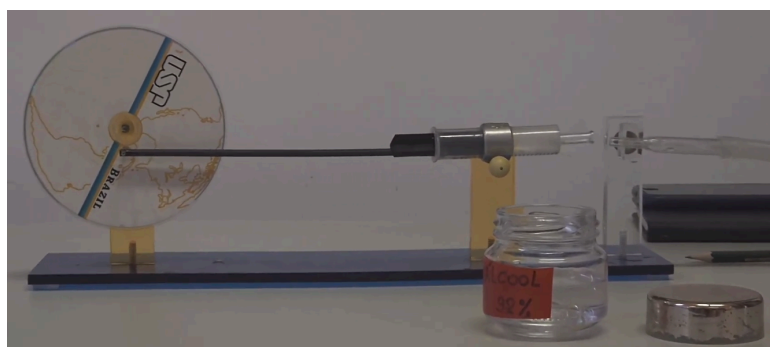


Fonte: elaboração própria.

2.5 PISTÃO MOVIDO A SOPRO

O motor é composto por um cilindro transparente com pistão interno conectado a um disco. Os alunos utilizam o sopro para movimentar o pistão, gerando movimento que é transmitido através da haste ao disco, fazendo-o girar. O sistema descrito é apresentado na figura 6.

Figura 6 - Pistão movido a sopro com cilindro transparente.



Fonte: elaboração própria.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

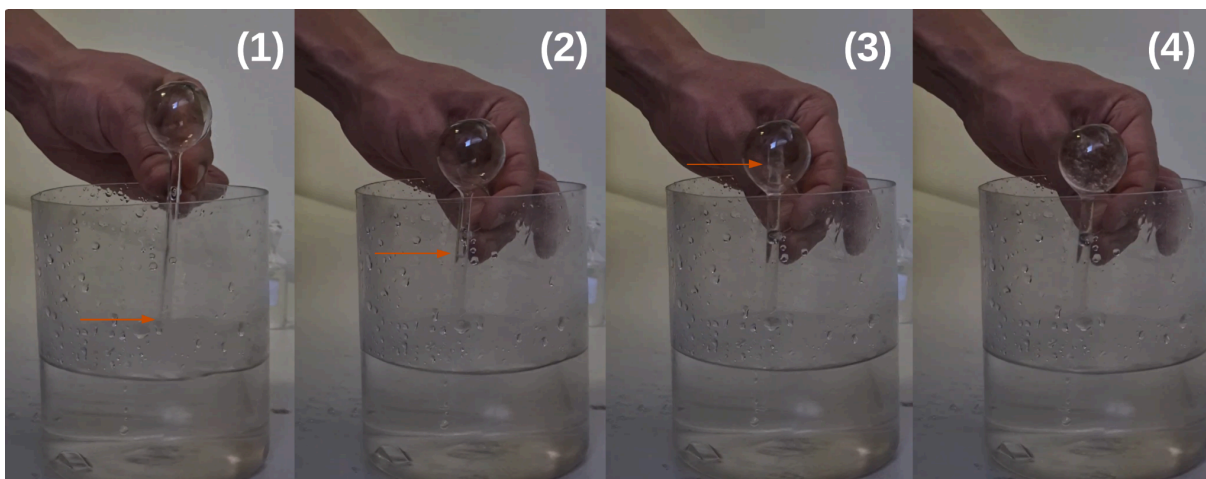
3.1 BALÃO DE VIDRO

O fenômeno observado no experimento do balão de vidro é uma demonstração dos princípios da lei dos gases ideais e da relação entre pressão, volume e temperatura. Inicialmente, o balão contém ar à temperatura e pressão ambientes. Ao aquecer o vidro, a energia térmica é transferida para as moléculas de ar no interior, aumentando sua energia cinética e, conseqüentemente, a temperatura (T). De acordo com a lei de Gay-Lussac ($P \propto T$, a volume constante) e a lei de Charles ($V \propto T$, a pressão constante), o aumento da temperatura causa um aumento da pressão e/ou do volume do gás. Como o balão está aberto, o gás se expande e parte do ar é expelido, reduzindo o número de mols de gás dentro do recipiente (NUSSENZVEIG, 2014).

Quando a extremidade aberta do tubo é mergulhada na água, o ar remanescente dentro do balão esfria rapidamente. Essa queda brusca de temperatura causa uma contração do gás e, principalmente, reduz a pressão interna (P_{int}). A pressão atmosférica externa (P_{ext}), que permanece constante, torna-se significativamente maior que a pressão interna. Essa diferença de pressão ($\Delta P = P_{ext} - P_{int}$) cria uma força que empurra a coluna de água para dentro do balão até que a pressão interna, somada à pressão da coluna de água, se equilibre com a pressão externa. O aumento volumétrico de água dentro do balão é, portanto, uma consequência direta da redução da pressão do gás causada pelo resfriamento. Além disso, se houver vapor de água no balão devido ao aquecimento, sua condensação durante o resfriamento contribui para uma queda de pressão ainda mais acentuada, intensificando o efeito de sucção (NUSSENZVEIG, 2014).

O painel de imagens abaixo (figura 7) apresenta como isso ocorre empiricamente. As imagens seguem a sequência de eventos a partir do momento em que o balão de vidro aquecido é colocado na água.

Figura 7 - Sequência experimental demonstrando o efeito de sucção por resfriamento em balão de vidro aquecido. (1) Balão de vidro aquecido sendo posicionado sobre a superfície da água, com ar expandido em seu interior devido ao aquecimento prévio; (2) Extremidade do balão fazendo contato inicial com a água, iniciando o processo de resfriamento do ar interno e sucção da água — coluna de água indicada pela seta laranja; (3) Coluna de água já no topo do balão; (4) Água totalmente aspirada para o interior do balão.



Fonte: elaboração própria.

3.2 COMPARAÇÃO ENTRE MOTORES

Os motores demonstrados na aula (Eron, Stirling e a máquina a vapor) convertem energia térmica em trabalho mecânico, mas operam com base em ciclos termodinâmicos e princípios distintos, resultando em diferentes características de eficiência, aplicação e complexidade.

O Motor de Eron, também conhecido como eolípila, é considerado o primeiro motor a vapor documentado. Seu funcionamento baseia-se na terceira lei de Newton (ação e reação). A água aquecida no balão se transforma em vapor, que escapa em alta velocidade por dois jatos tangenciais opostos, gerando um torque que faz a esfera girar. Este motor opera em um ciclo aberto, onde o fluido de trabalho (água/vapor) é expelido para a atmosfera. Embora seja historicamente importante — como um dos motores de conversão térmica mais antigos registrados, sua eficiência é extremamente baixa, pois a energia térmica é convertida em energia cinética do vapor expelido, e não em trabalho útil de forma controlada, tornando-o inviável para aplicações práticas (HALLIDAY, 2016).

A Máquina a Vapor de pistão também é um motor de combustão externa que opera em um ciclo aberto ou fechado. No ciclo idealizado de Rankine, a água é aquecida em uma caldeira, transformando-se em vapor de alta pressão. Esse vapor se expande contra um pistão, realizando trabalho mecânico, e depois é condensado de volta ao estado líquido para reiniciar o ciclo. Suas principais vantagens são a capacidade de gerar alta potência e torque, além da robustez. No entanto, suas desvantagens incluem a baixa eficiência térmica em comparação com motores de ciclo interno, a necessidade de caldeiras de alta pressão (que representam riscos de segurança) e um longo tempo de aquecimento para entrar em operação (ÇENGEL, 2013).

O Motor de Stirling destaca-se por ser um motor de combustão externa de ciclo fechado. O mesmo gás de trabalho (geralmente ar, hélio ou hidrogênio) é aquecido e resfriado continuamente em um espaço selado, causando expansões e contrações que movimentam os pistões. O ciclo de Stirling ideal é composto por duas transformações isotérmicas e duas isocóricas. Uma de suas características mais notáveis é o regenerador, um componente que armazena e libera calor durante o ciclo, aproximando sua eficiência teórica à do ciclo de Carnot, o máximo possível entre duas temperaturas. As vantagens do motor Stirling incluem sua alta eficiência, operação silenciosa e a capacidade de utilizar qualquer fonte de calor externa (solar, geotérmica, etc.). Suas desvantagens são o alto custo de fabricação, a dificuldade em variar rapidamente sua potência e a necessidade de grandes diferenciais de temperatura para um bom desempenho (ÇENGEL, 2013).

Tabela 1 - Comparação das características técnicas entre diferentes tipos de motores térmicos. As linhas indicam as especificações técnicas analisadas, e as colunas apresentam os três tipos de motores estudados.

Característica/Motor	Motor de Eron	Máquina a Vapor	Motor de Stirling
Combustão	Externa	Externa	Externa
Ciclo	Aberto	Aberto ou Fechado	Fechado, Regenerativo
Fluido de Trabalho	Água/Vapor	Água/Vapor	Gás (Ar, Hélio, H ₂)
Eficiência Teórica¹	Baixa (comparada a Carnot)	Média (comparada a Carnot)	Alta (próxima de Carnot)
Vantagens	-	Alto torque, alta potência	Alta eficiência, silencioso, versatilidade de combustível
Desvantagens	Ineficiente, baixo torque	Risco de explosão, lento para iniciar	Custo elevado, resposta lenta a mudanças de carga

Fonte: Elaboração própria.

Por fim, dois motores não entraram na análise comparativa realizada nesta seção: a variação do motor de Stirling e o pistão movido a sopro. Cada um deles não apareceu em comparação com os outros por motivos diferentes. Para a variação do motor de Stirling, que opera através de ciclos de aquecimento e resfriamento de um gás em um sistema fechado, o instrumento quebrou durante a execução do experimento, o que impossibilitou a análise

¹ A eficiência teórica se refere ao rendimento máximo que cada motor poderia alcançar sob condições idealizadas, baseando-se em seus respectivos ciclos termodinâmicos. Essa medida não representa o desempenho em uma aplicação real, mas sim o limite físico imposto pelo seu princípio de funcionamento.

empírica do motor. Adiciona-se que a fragilidade do instrumento, além do fato de que o motor para de funcionar quando as bolinhas de gude estão muito aquecidas, são pontos de desvantagem para esse motor. Já para o motor de pistão movido a sopro, aparato que transforma o sopro de um aluno no movimento rotacional de um disco, considerou-se que esse motor não poderia ser comparativamente colocado com os demais, uma vez que suas desvantagens, como a dependência de força humana constante, baixa potência e irregularidade no fornecimento de energia, o colocam muito abaixo dos outros motores.

4 CONCLUSÃO

Os experimentos realizados evidenciaram os princípios da termodinâmica na conversão de energia. A demonstração com o balão de vidro ilustrou a relação entre temperatura e pressão em um gás, conforme descrito pela lei dos gases ideais, explicando como variações térmicas podem gerar forças mecânicas.

A análise comparativa dos motores térmicos evidenciou a diversidade de abordagens para converter calor em trabalho. O Motor de Eron demonstrou ser impraticável devido à sua baixíssima eficiência. A máquina a vapor, operando com base no ciclo de Rankine, mostrou sua capacidade de gerar alta potência, justificando seu papel crucial na história da industrialização, apesar de suas limitações de eficiência e segurança. Por fim, o Motor de Stirling emergiu como o mais eficiente teoricamente, graças ao seu ciclo fechado e regenerativo, que se aproxima do ciclo ideal de Carnot. Sua flexibilidade quanto à fonte de calor e operação silenciosa o tornam uma tecnologia promissora para aplicações específicas, embora seu custo e complexidade ainda sejam barreiras para um uso generalizado.

Os resultados obtidos demonstram os conceitos teóricos da termodinâmica, desde a expansão de gases até o funcionamento de ciclos térmicos complexos, permitindo compreender as características operacionais dos diferentes sistemas de conversão energética e suas respectivas limitações práticas.

REFERÊNCIAS

NUSSENZVEIG, Herch Moysés. **Curso de física básica: fluidos, oscilações e ondas, calor.** 5. ed. São Paulo: Blucher, 2014. v. 2.

HALLIDAY, David; RESNICK, Robert; WALKER, Jearl. **Fundamentos de Física, vol. 2: Gravitação, Ondas e Termodinâmica.** 10. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2016.

ÇENGEL, Yunus A.; BOLES, Michael A. **Termodinâmica.** 7. ed. Porto Alegre: AMGH Editora, 2013.