

Nota: 10/10

Relatório 7 — Máquinas térmicas

Felipe Magina (15451791); Luan Leal (15470820);
Matheus Justino (14598021); Matheus Queiroz (15479562);
Micael Baruch (15578823)

9 de junho de 2025

1 Introdução

A Revolução Industrial foi um período de intensa transformação social e tecnológica, marcada pela o advento de diversos mecanismos capazes de inovar os meios de produção e transporte, criando um novo dinamismo comercial e contribuindo à lógica mercantil. Tal fenômeno foi em grande parte possibilitado pelo uso de máquinas térmicas, como a máquina a vapor, aprimorada e patenteada por James Watt em 1769, que permitiu aceleração do desenvolvimento industrial, além da colocação dos motores a vapor como dominantes nas indústrias e transportes até o século XX [1].

Tendo em vista melhor compreensão de fenômenos de expansão térmica e mudança de fase, essenciais para o funcionamento de máquinas a vapor, foi realizado um experimento com um bulbo de vidro que tinha um canudo em sua ponta. Após ser aquecido era colocado em água, esperando-se observar subida do líquido conforme o instrumento esfriasse, devido a mudança de densidade e pressão do ar, além da mudança de fase da água entre líquido e vapor.

Vale ressaltar que muitos fenômenos térmicos relacionados a gases, como os citados acima, podem ser explicados por meio da Lei dos Gases Perfeitos, que trata-se de uma boa aproximação para a maioria dos gases [7]:

$$PV = nRT$$

em que P é a pressão, V o volume, n o número de moles, R a Constante Universal dos Gases e T a temperatura. Além disso, em alguns experimentos discutidos neste relatório envolvem o fenômeno da vaporização, sendo este uma mudança no estado de agregação de líquido para vapor, que pode ocorrer graças a um ganho de energia térmica pelo material, que cause redução nas forças de coesão de suas partículas [5].

Em seguida foi feita uma experimentação em que um pistão conectado a um disco em uma ponta era movido graças ao sopro que recebia na outra extremidade. Ela permitiu análise do movimento e forças necessárias para o funcionamento de pistões, essenciais para a maior parte dos motores de máquinas térmicas.

Quanto a esses maquinários, foi observado o funcionamento de três tipos, sendo eles posteriormente comparados quanto a seus ciclos, vantagens e desvantagens. O primeiro, um Motor de Heron (ou Eolípila) é uma recriação do instrumento inventado por Hero de Alexandria do século I AC, sendo o primeiro motor a vapor criado, embora não tivesse uma aplicação prática [3]. A Eolípila envolve uma esfera com água que é aquecida e dois escapamentos para o vapor, que fazem-na girar pelo princípio de foguete, em que a saída de gás por uma abertura causa uma propulsão do objeto na direção oposta [2].

A segunda máquina térmica abordada foi o Motor Stirling, patenteado por Robert Stirling em 1816

[6]. Foram observados dois pequenos modelos. Esse sistema depende de uma fonte de calor que aquece um gás, causando sua expansão e impulsionamento de um êmbolo, com o gás sendo então resfriado por uma fonte fria e contraído para começar o próximo ciclo. Sendo que, para uma máquina térmica cíclica, é essencial ter-se ao menos dois reservatórios, por conta do fenômeno descrito pelo enunciado de Kelvin [7]: “É impossível realizar um processo cujo único efeito seja remover calor de um reservatório térmico e produzir uma quantidade equivalente de trabalho”.

Por fim, foi feita uma experimentação com uma máquina térmica similar a uma locomotiva. Nela, uma fonte de calor aquece uma caldeira, cujo vapor liberado move pistão de forma a girar uma roda. Vale notar que, entre as três máquinas analisadas, é a que representa o modelo mais utilizado durante a Revolução Industrial, em especial nas locomotivas.

2 Metodologia

2.1 Mudança de Fase em Balão de Vidro

Foi utilizado um balão de vidro acoplado a um cilindro capilar aberto do mesmo material. Realizaram-se dois procedimentos: no primeiro, o balão continha uma pequena quantidade de água antes do aquecimento; no segundo, o balão estava quase seco. Em ambos os casos, após o aquecimento, a ponta do capilar foi submersa em água. Observou-se a entrada de água no balão durante o resfriamento. A Figura 1 mostra o experimento realizado.



Figura 1. Sistema experimental com balão de vidro acoplado a um cilindro e uma haste transparente para auxiliar o manuseio do equipamento. No canto superior direito, uma frasco cheio representando um mol de água. Fonte: fotografia registrada pelo monitor da disciplina.

2.2 Pistão com Movimento por Sopro

A montagem experimental consistiu em um tubo acoplado a uma câmara contendo um pistão móvel conectado a um disco. Um dos participantes soprou no tubo, o que provocou a movimentação do pistão e, conseqüentemente, o giro do disco acoplado. A Figura 2 apresenta o aparato utilizado.

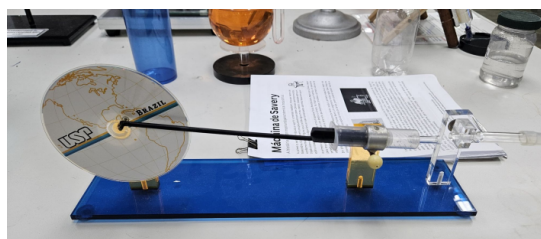


Figura 2. Sistema pistão-dispositivo de giro movido por sopro. A imagem mostra o tubo de entrada de ar e o pistão conectado a um disco rotativo. Fonte: registro fotográfico feito pelo monitor Pedro.

2.3 Motor de Heron

O dispositivo experimental foi composto por um reservatório de água conectado a tubos laterais abertos em formato de “L”. Após ser aquecido, observou-se a liberação de vapor por esses tubos, criando movimento rotacional. A montagem está ilustrada na Figura 3.

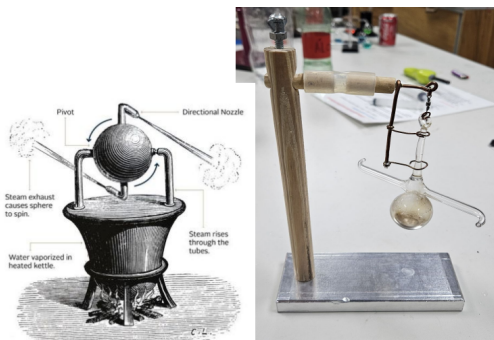


Figura 3. Montagem do motor de Heron. A imagem a direita mostra o sistema com tubos laterais por onde o vapor é liberado, enquanto a da esquerda mostra uma representação gráfica do modelo. Fonte: imagens disponibilizadas pelo monitor da disciplina.

2.4 Motor de Stirling

Foram utilizados dois modelos distintos de motores de Stirling para observação do funcionamento mecânico. O primeiro modelo consistia em um cilindro metálico disposto horizontalmente, conectado a um pistão e a um volante de inércia, todos fixados sobre uma base rígida. O segundo modelo apresentava uma estrutura montada em base acrílica, composta por dois tubos verticais: um destinado ao suporte da fonte de calor e o outro acoplado a um bulbo de vidro contendo esferas no interior. Este bulbo encontrava-se ligado a um êmbolo com extremidade de borracha, capaz de realizar movimento alternado. Ambos os modelos foram posicionados sobre bancadas e submetidos ao aquecimento por fontes externas. A Figura 4 mostra os sistemas utilizados.

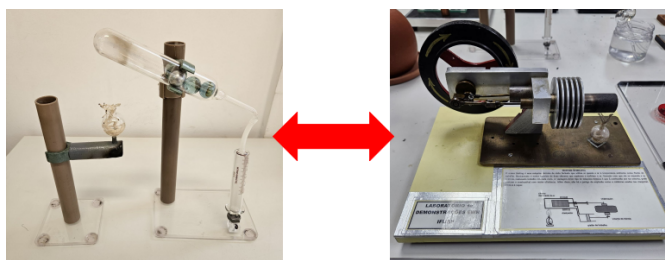


Figura 4. Modelos experimentais de motores de Stirling: à esquerda, estrutura com tubos verticais, bulbo e êmbolo; à direita, sistema com cilindro metálico e volante de inércia. Fonte: fotografia feita pelo monitor da disciplina.

2.5 Máquina Térmica

Foram utilizados dois modelos distintos de máquinas térmicas para fins de observação. O primeiro modelo consistia em uma representação esquemática, montada sobre uma base acrílica transparente. O sistema era composto por um conjunto de câmaras, pistão simulado, biela e volante, todos fixados com componentes coloridos para facilitar a visualização. O percurso do fluido de trabalho era indicado por setas na própria estrutura. O segundo modelo tratava-se de uma máquina térmica funcional, montada com estrutura metálica e equipada com caldeira, pistão, biela, volante e uma correia conectada a um pequeno gerador. Durante o funcionamento, o calor gerado na caldeira movimentava o conjunto mecânico,

acionando o gerador que, por sua vez, acendia um LED acoplado à estrutura, indicando a conversão de energia mecânica em energia elétrica. A Figura 5 mostra os dispositivos utilizados.

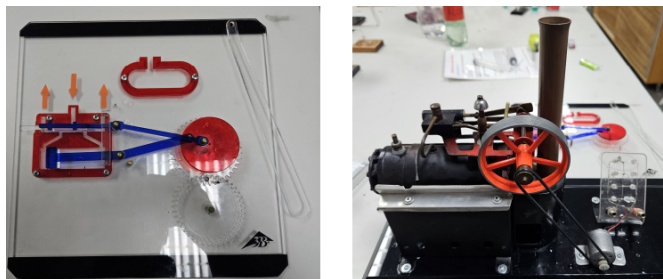


Figura 5. Modelos de máquinas térmicas: à esquerda, representação esquemática em base acrílica com setas indicativas de fluxo; à direita, modelo funcional metálico com caldeira, volante e LED conectado ao gerador. Fonte: imagem capturada durante a aula por monitoria.

3 Resultados e discussões

3.1 Mudança de fase

Ao aquecer o recipiente com um pouco de água dentro e depois mergulhá-lo de ponta cabeça na água, foi possível observar a água preencher o volume do recipiente por inteiro. Não foi possível testar com o recipiente completamente seco pois já estava molhado pelo uso de grupos anteriores. No entanto, o esperado seria que da mesma forma a água preenchesse o volume do recipiente, porém não por inteiro.

O princípio por trás desta diferença entre o recipiente com água ou sem água está na mudança de fase da água. Primeiro, vamos fazer a análise geral do fenômeno, depois discutiremos em termos das diferenças.

Em ambos os casos, ao aquecer o frasco, a velocidade média das partículas nele aumenta, como o frasco é um sistema aberto, a pressão se mantém constante e igual a pressão atmosférica, o volume do frasco é fixo, então pela lei geral dos gases ideais, temos que o número de mols dentro do frasco deve diminuir para compensar o aumento da temperatura. Fisicamente, interpreta-se que parte das moléculas de gás são ejetadas do frasco de forma que as que sobram lá dentro, naquela temperatura, exercem pressão equivalente a 1 atm. Ao pôr o frasco de ponta cabeça no recipiente com água, o gás agitado dentro do frasco passa a colidir com as moléculas de água, transferindo momento linear para estas, ou seja, há transferência de calor. Este processo faz com que a temperatura dentro do frasco e na água comece a entrar em equilíbrio, resfriando o gás dentro do frasco. Agora, a temperatura diminui, a princípio não há como entrar mais moléculas de gás, o volume do frasco continua constante, então, por consequência a pressão dentro do frasco torna-se menor que a pressão atmosférica. Com isso, a diferença de pressão dentro e fora do frasco gera uma força resultante sobre a água que aponta para dentro do frasco, fazendo a água subir.

Quanto à diferença entre o frasco com água ou seco antes de aquecer, a presença de água dentro do frasco faz com que a força resultante da diferença de pressão seja maior. A justificativa está na mudança de fase da água, ao ser aquecida, a água torna-se vapor de água, comportando-se como gás e contribuindo para o equilíbrio de pressão previamente descrito. No entanto, ao resfriar quando o frasco é colocado de ponta cabeça no recipiente o vapor condensa e deixa de atuar como gás, exercendo ainda menos pressão contra os contornos do frasco. Isto faz com que uma porção maior do frasco seja preenchida por água do que caso o frasco estivesse completamente seco antes de aquecer.

3.2 Motor de Heron

Ao acender a lamparina sob o reservatório de água em princípio nada aconteceu. No entanto, após alguns instantes, vapor começou a ser ejetado dos tubos e o motor ganhou movimento angular.

O motor funciona o seguinte processo: a água dentro do reservatório é aquecida gerando vapor; o vapor se acumula aumentando a pressão interna, o vapor escapa gerando movimento. Segue desta maneira até que a água dentro do reservatório acabe.

Ao aquecer a água e aumentar a pressão interna, gera-se uma força resultante que aponta para fora do reservatório exatamente nos bicos do motor. Esta força faz com que o vapor seja expelido do reservatório. Pela conservação de momento linear do sistema e visto que o sistema parte do repouso, temos a seguinte relação para a velocidade do motor V , a massa dentro total do motor com o tanto de água no reservatório M , a velocidade com que o vapor é expelido v_e e a massa de vapor expelida m :

$$M \frac{dV}{dt} = \frac{dm}{dt} v_e$$

Ou seja, a força sobre o motor é igual a $v_e \frac{dm}{dt}$, como o vapor é expelido das pontas da esfera, então esta força resulta em um torque τ descrito por:

$$\tau = r \cdot v_e \frac{dm}{dt}$$

Em que r é o comprimento do tubo.

Embora seja um motor de construção relativamente simples, o motor de Heron apresenta dificuldade de escalonamento. Pelas relações apresentadas temos que para aumentar a potência do motor seria necessário: (1) aumentar o comprimento dos tubos, aumentando o torque; (2) aumentar a quantidade de calor fornecida, aumentando v_e e a quantidade de massa expelida que também aumentam o torque; (3) otimizar a área transversal dos tubos para que a vazão aumente sem que esse aumento na vazão seja compensando por menor força resultante da diferença de pressão. A ideia (1) tem o problema de tornar um reservatório pequeno muito grande com relação ao comprimento do tubo. A ideia (2) é limitada pela disponibilidade de energia térmica. Por fim, a ideia (3) é limitada pela relação ideal, após atingi-la não há nada mais que possa ser feito.

3.3 Pistão de sopro

Ao soprar com força a seringa observou-se que o sopro empurrou a ampola, e como a ampola estava ligada a ao disco por uma haste, seu movimento fez com que o disco iniciasse um movimento de rotação, e empurrasse a ampola para trás, reiniciando o ciclo do movimento, similar ao funcionamento de uma roda de trem. Assim, viu-se que ao assoprar a ampola em um ritmo correto, foi possível fazer o disco girar mais rápido e de forma homogênea como uma roda.

Este experimento demonstra o princípio da realização de trabalho por um gás, transformando a expansão do gás em rotação. Pois, ao soprar a seringa, aumenta-se a pressão do ar no seu interior, e como a pressão de um gás exerce uma força igual para todas as direções, uma parte dessa força move a ampola, que ligada ao disco, transforma a energia contida no ar em energia cinética do disco. Apesar de ser uma demonstração de um sistema de ação única e ciclo aberto, não produzindo trabalho contínuo, serve para demonstrar como ocorre dentro de motores mais complexos, como o funcionamento de pistões por exemplo.

3.4 Motor de Stirling

Foram observadas duas versões do motor de Stirling, um composto de uma seringa ligado a um compartimento de vidro com bolinhas de gude, e outro mais clássico com uma parte de metal, um dissipador de calor e uma roda.

Sobre o primeiro motor, observou-se que ao acender a lamparina em sua ponta, após um tempo, a seringa começou a levantar fazendo com que a parte de vidro com as bolinhas se inclinasse para próximo à fonte de calor e as bolinhas rolassem para a extremidade inclinada, seguidamente observou-se que a seringa abaixou, fazendo assim com que as bolinhas voltassem para sua extremidade de origem e repetissem esse ciclo. Agora, sobre o segundo motor, observou-se que após acender a lamparina em sua extremidade cilíndrica de metal não demorou muito tempo para que houvesse a movimentação de um pistão na outra extremidade que ligado a uma roda a fazia girar cada vez mais rápido, até atingir uma velocidade constante.

Apesar de possuírem construções bem diferentes, ambos motores partem do mesmo princípio físico de funcionamento, movendo uma quantidade fixa de um gás entre uma fonte de calor e um dissipador. Esse processo define o ciclo de Stirling, que é um ciclo fechado e pode ser dividido em quatro etapas termodinâmicas. O princípio geral baseia-se na lei dos gases ideais ($PV = nRT$): quando um gás é aquecido, ele se expande; quando é resfriado ele se contrai. O motor de Stirling utiliza essa propriedade de forma cíclica para produzir um trabalho mecânico.

Para descrever o ciclo de Stirling fisicamente, tomaremos como exemplo o segundo motor observado, cuja construção é do tipo **beta**. Este motor possui uma câmara selada com uma fonte de calor em uma extremidade e um dissipador de calor na outra. No seu interior operam dois pistões: o pistão deslocador, responsável por mover o gás entre as zonas quente e fria, e o pistão de potência, que realiza o trabalho mecânico e está conectado ao volante (a roda). O ciclo do motor de Stirling ocorre em quatro etapas coordenadas, como demonstrado na Figura 6:

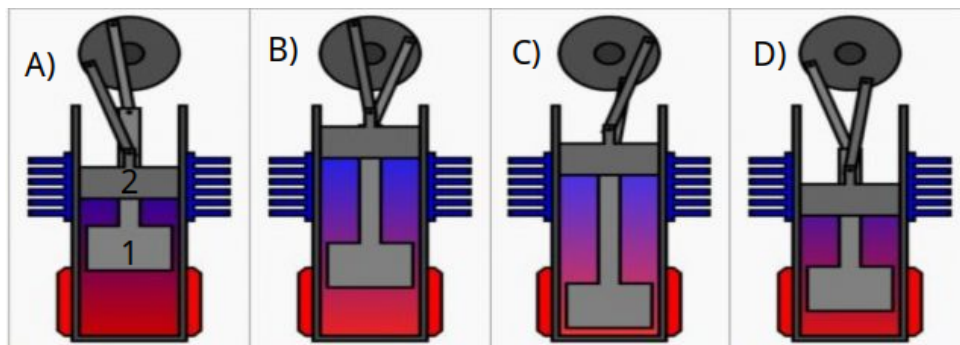


Figura 6. A imagem ilustra as etapas sequenciais (A-D) do funcionamento do motor. O componente interno (1) é o pistão deslocador, responsável por mover o gás entre a fonte de calor (região vermelha) e o dissipador (região azul). O componente externo (2) é o pistão de potência, que realiza o trabalho mecânico acionando o volante (roda). Fonte: Adaptado de Galante et al.[4].

Primeiro, o pistão deslocador move a massa de gás para a extremidade quente da câmara (D). O gás absorve calor, e sua pressão aumenta consideravelmente. Em seguida, essa alta pressão impulsiona o pistão de potência, que se expande e realiza trabalho, transferindo energia para o volante (A).

Com o movimento contínuo do sistema, o pistão deslocador então move o gás aquecido da extremidade quente para a fria (B). O gás cede calor ao dissipador, e sua pressão diminui drasticamente (C). Finalmente, impulsionado pela inércia do volante, o pistão de potência comprime o gás frio de baixa pressão (D), deslocando a massa de gás para a extremidade quente da câmara. O ciclo então se repete, produzindo trabalho líquido a cada volta do volante.

Além da análise mecânica, o funcionamento do motor pode ser compreendido do ponto de vista termodinâmico, sendo o diagrama Pressão vs. Volume (P-V) a ferramenta ideal para isso, como ilustrado na Figura 7. Este gráfico representa as transformações que o gás de trabalho, um sistema fechado, sofre a cada etapa do ciclo.

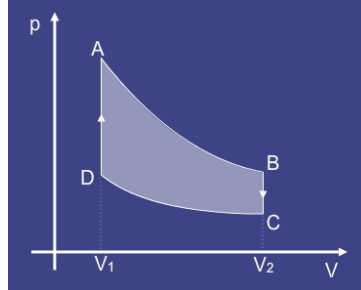


Figura 7. Diagrama Pressão vs Volume do ciclo de Stirling, em que o gráfico ilustra as quatro transformações termodinâmicas do ciclo: $D \rightarrow A$ (aquecimento isocórico), $A \rightarrow B$ (expansão isotérmica), $B \rightarrow C$ (resfriamento isocórico) e $C \rightarrow D$ (compressão isotérmica). Fonte: [8].

O ciclo inicia com o processo de aquecimento a volume constante (isocórico), $D \rightarrow A$ no gráfico. Nesta fase, o gás é movido para a fonte quente e, sem que seu volume mude, sua temperatura e pressão aumentam consideravelmente. Em seguida, ocorre a expansão a temperatura constante (isotérmica), mostrada no processo $A \rightarrow B$. Mantendo-se em contato com a fonte quente, o gás se expande, empurrando o pistão de potência para realizar trabalho. Durante esta expansão, o sistema absorve calor para manter a temperatura estável, enquanto seu volume aumenta e a pressão diminui. Esta é a fase de potência do motor.

Após a expansão, o ciclo prossegue com o resfriamento a volume constante (isocórico), no processo $B \rightarrow C$. O gás é então deslocado para a fonte fria, onde sua temperatura e pressão caem drasticamente, mas seu volume é mantido fixo. Finalmente, a quarta etapa é a compressão a temperatura constante (isotérmica), no processo $C \rightarrow D$. O gás é comprimido de volta ao seu volume inicial enquanto permanece em contato com a fonte fria, liberando o calor gerado no processo e fechando o ciclo, que se repetirá.

A análise a partir do gráfico P-V do ciclo de Stirling se mostra muito importante, visto que a partir da integral desse gráfico é possível obter-se o trabalho realizado pelo gás, e consequentemente a energia que é transmitida para a roda e se torna energia cinética.

O motor de Stirling possui vantagens objetivas sobre os motores convencionais, uma de suas principais vantagens é a utilização de uma combustão externa, o que possibilita a utilização de qualquer fonte de calor para o seu funcionamento, o que pode torna-lo muito mais ecológico, com a utilização de fontes de calor como energia solar concentrada, e seguro por não depender de explosões internas. Porém, os motores de Stirling possuem problemas para mudanças de potência, dependendo da intensidade das fontes de calor e de frio para realizar essas mudanças.

3.5 Máquina térmica

No experimento com a máquina térmica, observou-se que ao acender a lamparina sob o tambor de ferro - semelhante ao sistema de locomotivas - a roda externa começou a girar rapidamente. Através de um sistema de corda conectando a roda a um gerador, foi possível acender um LED, comprovando a geração de corrente elétrica a partir a energia cinética realizada pelo motor.

O funcionamento das locomotivas a vapor, como a representada no experimento, baseia-se na conversão de energia térmica em mecânica através de um ciclo termodinâmico de quatro etapas. Inicialmente, a água é aquecida na caldeira por combustão externa, gerando vapor em alta pressão e temperatura, que é então conduzido ao cilindro principal.

Na fase de expansão, o vapor pressurizado movimenta o pistão, convertendo energia térmica em trabalho mecânico. O movimento linear do pistão é transformado em rotação através de um sistema que inclui um volante de inércia. A etapa final consiste na exaustão, quando o vapor já expandido é liberado para a atmosfera ou direcionado a um condensador em sistemas fechados.

Entre as principais vantagens desses motores destacam-se a versatilidade de combustíveis (devido à combustão externa, permitindo uso de carvão, biomassa ou energia solar) e o alto torque inicial, ideal para aplicações pesadas. Essas características foram fundamentais durante a Revolução Industrial. Contudo, fatores como dimensões excessivas, longo tempo de aquecimento, riscos operacionais e significativo impacto ambiental (com emissões de poluentes) limitam sua aplicação atual.

4 Conclusão

Com base nos experimentos, aprofundou-se a compreensão sobre os princípios das máquinas térmicas. A prática com o balão de vidro ilustrou a Lei dos Gases Ideais, onde o resfriamento do ar e a condensação do vapor criaram uma diferença de pressão que succionou a água, evidenciando a importância das transições de fase em processos termodinâmicos.

O Motor de Heron demonstrou a conversão de energia térmica em cinética pela conservação de momento, com a expulsão de vapor gerando torque. A análise apontou limitações práticas de escalonamento e potência. De forma similar, o pistão de sopro serviu como modelo para a realização de trabalho por um gás, transformando a energia da expansão do ar em rotação e ilustrando o funcionamento de um ciclo aberto.

Os motores Stirling evidenciaram o funcionamento de um ciclo termodinâmico fechado, produzindo trabalho ao mover um gás entre fontes de temperaturas distintas. A vantagem da combustão externa e da flexibilidade de combustível contrasta com a dificuldade em alterar sua potência rapidamente.

Por fim, a máquina térmica funcional sintetizou os conceitos ao converter energia térmica em trabalho mecânico para girar uma roda e, subsequentemente, em energia elétrica, comprovada pelo acendimento de um LED.

Referências

- [1] Alexandre Alves and Letícia F. de Oliveira. *Conexões com a história, volume único*. Moderna, São Paulo, 2 edition, 2015. Parte 2.
- [2] Tom Benson. Rocket principles. https://www.grc.nasa.gov/www/k-12/rocket/TRCRocket/rocket_principles.html. Last accessed 7 June 2025.
- [3] Encyclopaedia Britannica. steam engine. <https://www.britannica.com/technology/steam-engine>. Last accessed 7 June 2025.
- [4] Alexandre Galante. Submarino sueco classe “gotland” pronto para novo motor aip - poder naval, mar 2017.
- [5] Francisco R. Júnior, Nicolau G. Ferraro, and Paulo A. de T. Soares. *Os fundamentos da física*, volume 2. Moderna, São Paulo, 11 edition, 2015. Parte 1.
- [6] Joao Marcelo Pedra Lopes. O motor stirling: passado e presente. 2022.
- [7] H. Moysés Nussenzveig. *Curso De Física Básica Fluidos, Oscilações E Ondas, Calor*, volume 2, chapter 9, 10. Editora Edgard Blücher Ltda, 5 edition, 2014.

[8] Daniel Schulz. O ciclo de stirling, 2009.