

**PRINCÍPIOS DA TERMODINÂMICA E MECÂNICA:
MOTOR TÉRMICO DE ELÁSTICOS**



A. L. Pereira e J. A. Souza

UFSCar – Sorocaba
Abril de 2019

Prefácio

Este produto educacional foi desenvolvido para auxiliar o professor de física do ensino médio a complementar suas aulas teóricas com experimentos utilizando uma metodologia investigativa para ministrar tópicos de física nas áreas de Termodinâmica e Mecânica. Os dois experimentos propostos, o *pêndulo de elástico* e o *motor térmico de elásticos*, podem contribuir para tornar as aulas de física mais dinâmicas durante o tratamento de assuntos como calor, dilatação térmica, as leis da termodinâmica, máquinas térmicas, trabalho, equilíbrio, força, torque entre outros. Este material possibilita também a abordagem dos assuntos de física de maneira interdisciplinar com outras disciplinas como a química, história e geografia. Nas primeiras seções apresentamos todos os detalhes necessários para construir os dois experimentos propostos e como utilizá-los para a abordagem dos tópicos de física mencionados. Em seguida apresentamos ao professor uma sugestão de aplicação do produto mostrando como os assuntos podem ser conduzidos teoricamente e complementados pela observação dos experimentos.

É importante ressaltar que o desenvolvimento matemático apresentado neste material é para fornecer melhor entendimento para os professores e não para os alunos. A transposição didática das equações e a própria abordagem dos temas, se será mais quantitativa ou qualitativa, fica a cargo do professor que escolherá a melhor maneira de trabalhar o conteúdo com os seus alunos.

Esperamos que este produto educacional ajude o professor a nortear sua prática pedagógica e que o mesmo possa utilizar a metodologia experimental investigativa como um bom complemento para sua prática docente.

Para dúvidas ou informações adicionais, envie um e-mail para
pereirandre.luiz@gmail.com

Os autores.

Este material foi produzido no Programa de Mestrado Profissional em Ensino de Física da Universidade Federal de São Carlos, campus Sorocaba (PROFIS-So)
Sorocaba, abril de 2019.

Sumário

1. FABRICAÇÃO DOS EXPERIMENTOS	4
1.1. Pêndulo de Elástico	4
1.2. Motor Térmico de Elásticos	7
1.3. Algumas observações importantes	11
2. APLICAÇÃO DO PRODUTO EDUCACIONAL.....	12
2.1. Etapas da Aplicação do produto educacional	13
3. CONTEÚDOS DE FÍSICA QUE PODEM SER ABORDADOS COM OS EXPERIMENTOS.....	17
3.1. Calor	18
3.2. Lei Zero da Termodinâmica e o Conceito de Temperatura.....	20
3.3. Trabalho de uma Força Variável	23
3.4. Dilatação Linear dos Sólidos.....	26
3.5. Dilatação Superficial dos Sólidos.....	27
3.6. Dilatação Volumétrica dos Sólidos	28
3.7. Dilatação Volumétrica dos Líquidos	28
3.8. Dilatação Anômala da Água.....	30
3.9. Dilatação Anômala da Borracha.....	31
3.10. Centro de Massa	32
3.11. Torque e Centro de Gravidade.....	36
3.12. Primeira Lei da Termodinâmica	43
3.13. Máquinas Térmicas.....	44
3.14. Segunda Lei da Termodinâmica	48
3.15. Terceira Lei da Termodinâmica	50
4. REFERÊNCIAS	51

1. FABRICAÇÃO DOS EXPERIMENTOS

O pêndulo de elástico e o motor térmico de elásticos podem ser construídos na escola ou em casa com materiais simples e de fácil aquisição. Os materiais listados a seguir podem ser substituídos por outros, desde que proporcionem um bom funcionamento dos experimentos.

1.1. Pêndulo de Elástico

Começaremos pelo pêndulo de elástico por ser o experimento mais simples. Para a construção deste dispositivo serão necessários os seguintes materiais:

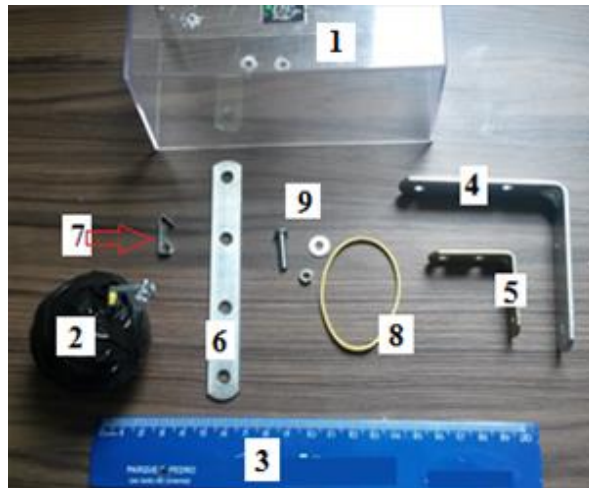
- ✓ 1 base de acrílico ou madeira com dimensões aproximadas de 15cm x 7cm x 7cm (comprimento x largura x altura);
- ✓ 1 cantoneira em L de 80mm x 20 mm de largura;
- ✓ 2 cantoneiras em L de 40mm x 16mm de largura;
- ✓ 1 união reta de 4 furos com 125mm x 16mm de largura;
- ✓ 1 régua graduada;
- ✓ 6 parafusos com rosca 5/32" x 3/4";
- ✓ 6 porcas 5/32";
- ✓ 12 arruelas 5/32";
- ✓ 2 grampos de metal;
- ✓ 2 elásticos de dinheiro N°18;
- ✓ 1 massa de aproximadamente 0,5kg, suficiente para esticar o elástico;
- ✓ Fita isolante.

Além dos materiais listados acima serão necessárias algumas ferramentas para a construção do experimento como furadeira e brocas para fazer os furos na base e na régua, chave de fenda, alicate, etc. Na figura 1.1 apresentamos os materiais necessários para a construção do aparato experimental para melhor visualização.

Para a montagem do experimento, faça primeiramente a junção com parafusos das cantoneiras de 80mm e 40mm com a união reta para que tome o formato de um "Z", depois fixe a cantoneira de 80mm à base de acrílico. No segundo furo da união, de baixo

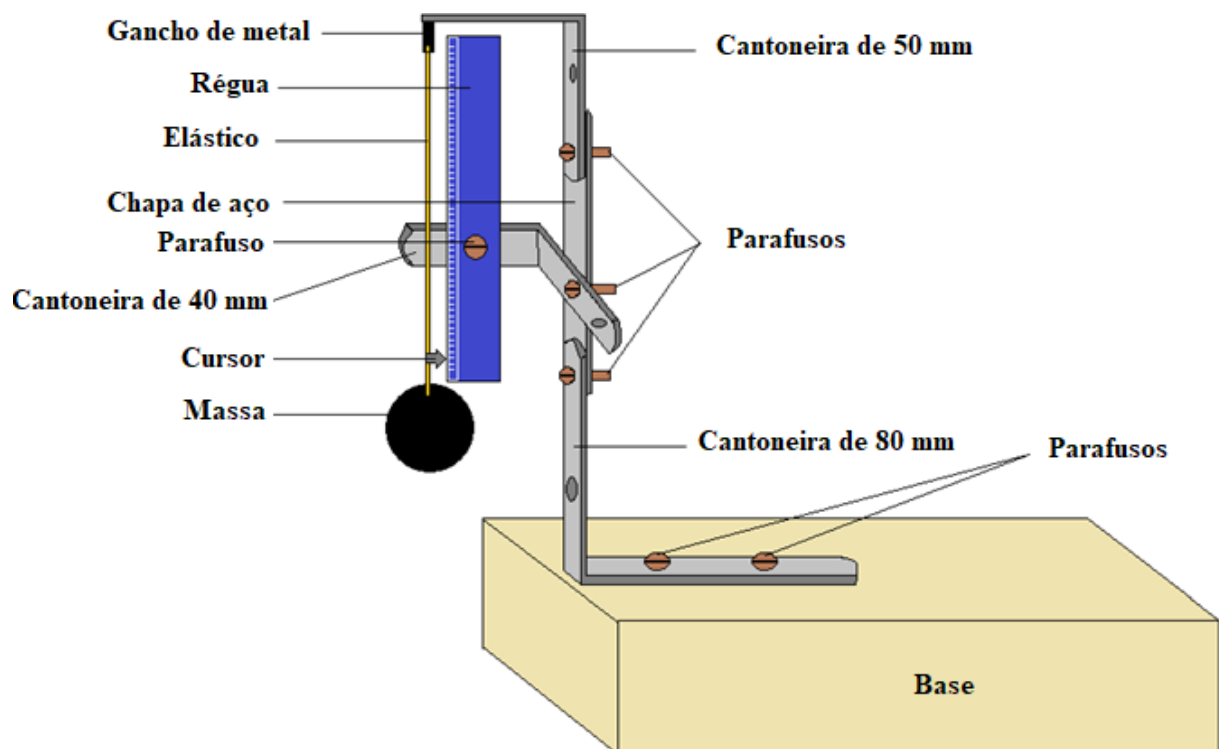
para cima, fixe a outra cantoneira de 40mm para servir de suporte para a régua, veja esquema apresentado na figura 1.2.

Figura 1.1: Materiais utilizados para a construção do pêndulo de elástico: (1) base de acrílico, (2) massa, (3) régua de plástico, (4) cantoneira de 80mm, (5) cantoneira de 40mm, (6) união reta de 4 furos, (7) grampo de metal, (8) elástico, (9) parafuso, porca e arruela.



Fonte: Elaborada pelo autor.

Figura 1.2: Esquema da montagem do pêndulo.



Fonte: Elaborada pelo autor.

Pegue a massa, que servirá de peso para tensionar o elástico, e passe um outro elástico em volta da mesma prendendo-o com fita isolante envolvendo toda a massa, deixando apenas uma pequena ponta do elástico para prender um lado do grampo de metal, como mostrado na foto da figura 1.3. Na outra extremidade do grampo prenda um elástico e pendure a massa no suporte com um segundo grampo.

No grampo que uniu os dois elásticos prenda um pedaço de papel no formato de seta para verificar a dilatação do elástico através de uma régua. Este funcionará como um cursor. Deve-se tomar cuidado ao prender a massa, pois a mesma pode tombar o suporte. Se necessário prenda a base à mesa com uma fita dupla face, por exemplo.

Todos os detalhes da montagem do pêndulo de elástico estão apresentados no desenho da figura 1.2 e na foto do dispositivo apresentado da figura 1.3.

Figura 1.3: Pêndulo de elástico montado.



Fonte: Elaborada pelo autor.

1.2. Motor Térmico de Elásticos

Nosso segundo experimento é o motor térmico de elásticos que é uma máquina térmica cuja substância de trabalho é formada por elásticos. Para a construção e montagem deste dispositivo nós utilizamos os seguintes materiais:

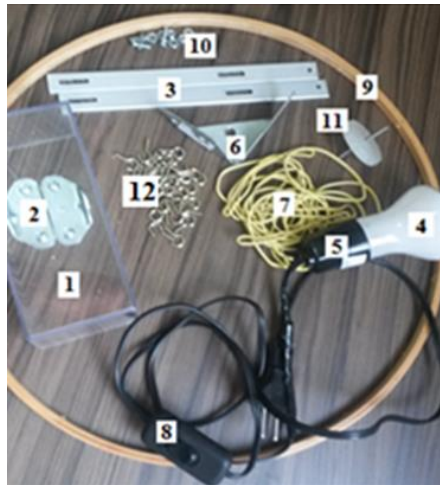
- ✓ 1 aro de madeira, com aproximadamente 35 cm de diâmetro externo. O aro pode ser encontrado em casas de bordado pelo nome de bastidor N°35. Este é utilizado para prender tecidos esticados para bordar;
- ✓ 32 ganchos de metal com rosca para madeira com medida de 16 x 30 (mm);
- ✓ 16 a 20 elásticos N°18, destes utilizados para prender dinheiro. A quantidade de elásticos dependerá do balanceamento da roda do motor, o qual daremos maiores detalhes mais adiante;
- ✓ 1 base de acrílico ou madeira com dimensões aproximadas de 15cm x 7cm x 7cm, (comprimento x largura x altura);
- ✓ 2 barras de alumínio com 20cm x 1,5cm x 3mm (comprimento x largura x espessura), as quais servirão como suporte da roda;
- ✓ 2 chapas de aço em forma de “L” para fixar as barras à base;
- ✓ 1 eixo de aço com 3mm de diâmetro x 45mm de comprimento;
- ✓ 1 disco de nylon com 40mm de diâmetro e 7mm de espessura. O disco deverá ter um furo com 3mm de diâmetro no centro para que o eixo de aço entre forçado para que fique bem ajustado sem qualquer folga;
- ✓ 1 bocal para lâmpada;
- ✓ 1 lâmpada incandescente ou halógena de 200W ou mais;
- ✓ 1 fio com interruptor para ligar a lâmpada na tomada;
- ✓ 1 suporte para a lâmpada;
- ✓ Parafusos, porcas e arruelas para fixação. Os parafusos são com rosca M3 x 18mm de comprimento ou rosca 1/8” x 3/4” de comprimento.

Todos os materiais utilizados para a montagem do motor térmico de elásticos estão apresentados na figura 1.4.

Iniciamos a montagem do dispositivo pela roda. Dividimos a parte interna do aro de madeira em 16 partes iguais, onde serão rosqueados 16 ganchos de metal, como

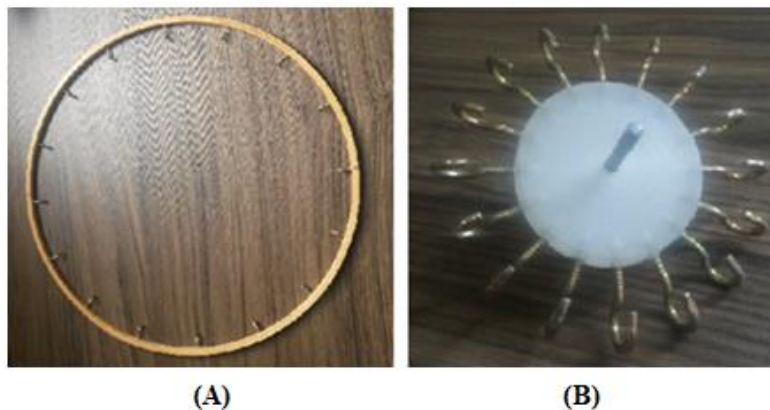
mostrado na figura 1.5(A). Analogamente, dividimos o disco de nylon também em 16 partes iguais, mas em sua parte externa, para rosquear outros 16 ganchos de metal, como na figura 1.5(B).

Figura 1.4: Materiais utilizados para a construção do motor térmico de elásticos sendo (1) base de acrílico, (2) “Ls” para fixação do suporte à base, (3) suporte de alumínio, (4) lâmpada, (5) bocal, (6) suporte da lâmpada, (7) elásticos, (8) interruptor e fios de ligação da lâmpada, (9) aro de madeira, (10) parafusos, porcas e arruelas, (11) disco de nylon com eixo de aço, (12) ganchos de metal.



Fonte: Elaborada pelo autor.

Figura 1.5: (A) Aro de madeira dividido em 16 partes iguais para a fixação de 16 ganchos de metal e (B) disco de nylon com um eixo no centro e 16 ganchos de metal seguindo o mesmo particionamento do aro.

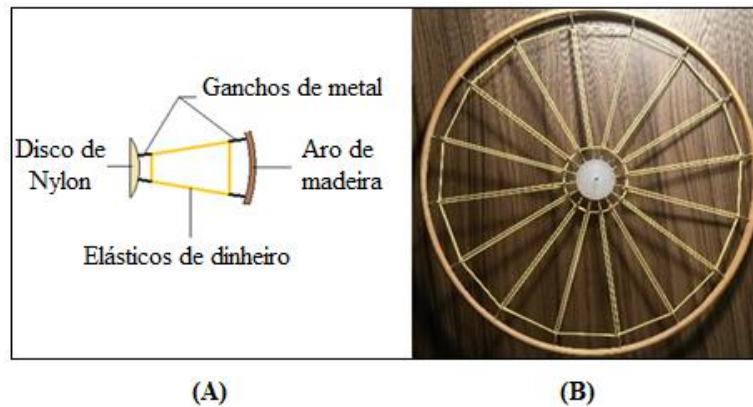


Fonte: Elaborada pelo autor.

Feita a divisão e fixação dos ganchos de metal, deve-se unir as peças com os elásticos, de acordo com o formato da figura 1.6(A). Esta configuração é necessária para proporcionar um melhor balanceamento da roda. Prendendo os 16 elásticos entre o aro de

madeira e o disco de nylon, a roda do motor deve ter a configuração mostrada na figura 1.6(B).

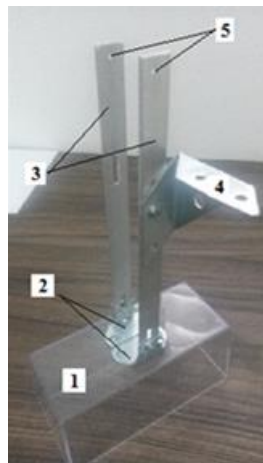
Figura 1.6: (A) Formato de cada elástico ligando o disco de nylon ao aro de madeira e (B) Roda do motor de elásticos.



Fonte: Elaborada pelo autor.

Finalizada a montagem da roda, deve-se montar o suporte de alumínio à base de acrílico, que são ligados pelos Ls, como mostrado na figura 1.7. Este conjunto irá deixar a roda suspensa e livre para girar.

Figura 1.7: Montagem da base e do suporte da roda mostrando (1) base de acrílico, (2) Ls de metal, (3) barras de alumínio que servirão de suporte para a roda, (4) suporte para a lâmpada, (5) furos para a passagem do eixo da roda.

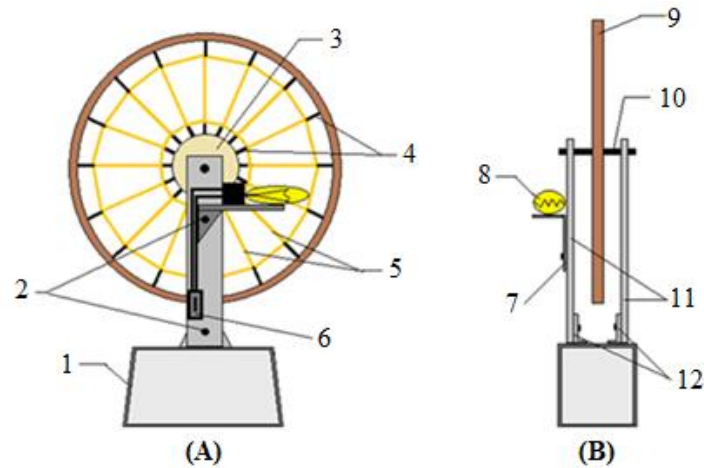


Fonte: Elaborada pelo autor.

O último passo da montagem é a união da roda com o conjunto da figura 1.7 para que a roda fique girando livremente. Na figura 1.8 é apresentada uma ilustração da

montagem do motor de elásticos para se ter uma visão geral do experimento e a figura 1.9 mostra uma fotografia do experimento montado e finalizado.

Figura 1.8: Esquema ilustrativo do motor de elásticos e seus componentes. Em (A) temos (1) base de acrílico, (2) parafusos, porcas e arruelas para fixação, (3) disco de nylon, (4) ganchos de metal, (5) elásticos de dinheiro, (6) interruptor e fios para ligação da lâmpada. Em (B) temos (7) suporte de fixação da lâmpada, (8) lâmpada, (9) aro de madeira, (10) eixo de aço, (11) suportes de alumínio e (12) Ls para unir a base aos suportes.



Fonte: Elaborada pelo autor.

Figura 1.9: Motor de elásticos montado.

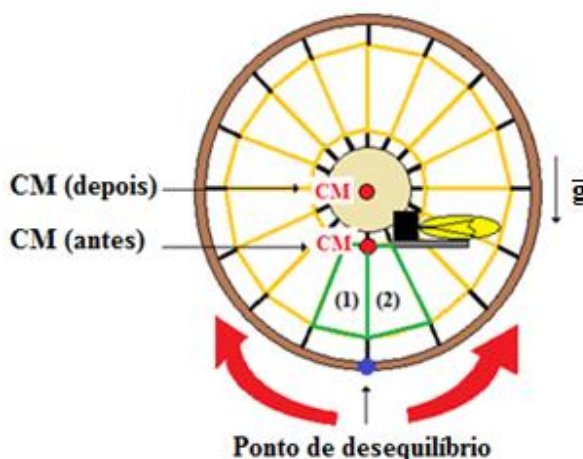


Fonte: Elaborada pelo autor.

1.3. Algumas observações importantes

O primeiro fator a ser observado é o balanceamento da roda. O aro de madeira normalmente vem deformado e isso pode comprometer bastante o funcionamento do experimento. Com a roda apoiada no suporte deve-se girar a mesma e observar se a roda tende a permanecer em uma posição tendenciosa. Se isso ocorrer é necessário fazer o balanceamento da roda para que a mesma, quando posicionada em um determinado ângulo, permaneça imóvel em equilíbrio estável. Se existir um ou mais pontos de desequilíbrio deve-se adicionar mais elásticos à roda, seguindo a mesma configuração da figura 1.6(A), para que a região fique mais tensionada e desloque o centro de massa da roda para o seu eixo de rotação fazendo com que a mesma fique balanceada. A figura 1.10 mostra um exemplo das regiões (1) e (2) onde foram adicionados os elásticos.

Figura 1.10: Exemplo de balanceamento da roda.



Fonte: Elaborada pelo autor.

Outro fator a ser observado é a potência da lâmpada, que serve como fonte térmica de maior temperatura para o experimento. Para um dispositivo do porte que nós montamos foi verificado que o motor começa a ter força suficiente para girar quando utilizada uma lâmpada de no mínimo 200W. Portanto, se o leitor desejar reproduzir o nosso dispositivo nas mesmas dimensões sugerimos a utilização de uma lâmpada de 200W ou mais de potência. De outra maneira, será necessário conduzir testes para verificar a potência mínima da lâmpada.

Para finalizar deve-se ressaltar que a roda, normalmente, não gira de forma contínua. Isso ocorre porque existe um tempo de resposta para o elástico se dilatar

termicamente, tanto em seu aquecimento, quanto no seu resfriamento. Como consequência disso a roda poderá girar e parar algumas vezes, voltando a girar novamente de maneira intermitente.

2. APLICAÇÃO DO PRODUTO EDUCACIONAL

Com este material o professor poderá abordar de diferentes formas vários conceitos e fenômenos físicos relacionados à Termodinâmica e Mecânica. Apresentamos, como sugestão ao professor do ensino médio, uma sequência didática com o objetivo de conduzir o aluno a pensar sobre os fenômenos na tentativa de induzi-los a um processo investigativo para fazer com que os mesmos pensassem a respeito do que está sendo estudado. Por exemplo, iniciamos a aplicação do produto falando sobre calor, energia, trabalho e dilatação térmica. Na dilatação térmica foi explorada a ideia de que a maioria dos materiais aumentavam suas dimensões com o aumento da temperatura e logo em seguida mostramos o experimento do pêndulo de elástico e os alunos evidenciaram o contrário, ou seja, o elástico recebe energia através de calor, aumenta sua temperatura mas contrai, apresentando um comportamento diferente do exposto anteriormente. Com isso os alunos ficaram surpresos com o que ocorreu e interessados em investigar o fenômeno para saber o porquê daquele resultado. Isso os motivou a pensar e criar hipóteses.

Nós aplicamos o produto por meio de etapas, onde as mesmas iam se completando para que ao final da aplicação o aluno conseguisse explicar o funcionamento do motor térmico de elásticos a partir dos conceitos físicos estudados. A seguir apresentamos nossas sugestões de aplicação.

2.1. Etapas da Aplicação do produto educacional

2.1.1. ETAPA 1

Duração: Duas aulas de 50 minutos cada.

Objetivos:

- ✓ Demonstrar a contração do elástico tensionado na presença de uma fonte térmica;
- ✓ Discutir o conceito de calor;
- ✓ Discutir as razões da dilatação anômala do elástico através de uma aula interdisciplinar.

O professor pode iniciar a aula demonstrando que na presença de uma fonte térmica o elástico sob tensão sofre uma dilatação térmica anômala quando aquecido. Este sofre uma contração, diferentemente da maioria dos materiais sólidos que se expandem quando aquecidos. Para isso pode-se utilizar o experimento do pêndulo de elásticos. Na figura 2.1(A) mostramos a calibração do dispositivo quando a lâmpada está desligada, com o cursor na posição zero. Quando a lâmpada é ligada é possível ver a elevação da massa devido a contração do elástico aquecido. Na figura 2.1(B) podemos ver que o cursor chega em aproximadamente 3mm. É notável como um elástico pode elevar uma massa de 0,5 kg apenas por ter sido aquecido.

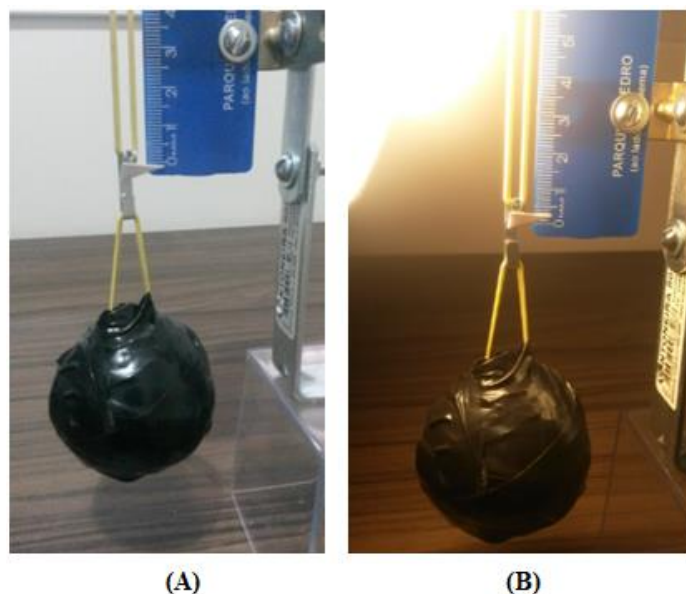
O professor irá notar que a dilatação térmica do elástico, assim como a de qualquer outro sólido, não é tão significativa. No nosso experimento o elástico se contrai em aproximadamente 3mm quando aquecido. O uso de uma régua graduada no experimento é essencial para fazer com que os alunos enxerguem o fenômeno claramente.

Após todos terem observado a contração do elástico é interessante iniciar uma discussão sobre porque esse efeito ocorre. Uma vez que o fenômeno ocorre após o acionamento da lâmpada, espera-se que os alunos entendam a influência da fonte térmica no processo, que pode ser uma lâmpada ou uma vela. A partir disso o professor pode introduzir o conceito de calor se desejar. Discussões podem ser conduzidas até que os alunos entendam que o efeito observado foi devido à energia térmica absorvida pelo elástico através do calor.

Após ensinar o conceito de calor o professor tem a opção de aproveitar o conteúdo da aula e fazer uma colaboração com o professor de química para ministrar uma aula interdisciplinar. Este poderia discutir com os alunos, através de conceitos trabalhados

usualmente na disciplina de química, as causas do efeito anômalo do elástico e outros materiais.

Figura 2.1: Pêndulo de elástico mostrando em (A) o cursor na posição zero da escala quando a lâmpada está desligada e em (B) a elevação da massa devido ao aquecimento do elástico quando a lâmpada é ligada.



Fonte: Elaborada pelo autor.

Ao final da primeira etapa é desejável e interessante que o aluno saiba o que é calor e o que causa a dilatação térmica no elástico e que esse efeito de dilatação pode acontecer em outras substâncias. Neste momento o professor pode discutir que o efeito observado acontece em poucas substâncias e que na verdade a maioria dos materiais respondem de maneira diferente do elástico quando aquecidos. Ou seja, estes sofrem um aumento em suas dimensões e ao serem resfriados sofrem uma diminuição de suas dimensões. Se o professor optar por ministrar a aula interdisciplinar pode ser necessário estender as discussões em mais uma aula de 50 minutos.

2.1.2. ETAPA 2

Duração: Duas aulas de 50 minutos cada.

Objetivos:

- ✓ Demonstrar o funcionamento do motor térmico de elásticos;
- ✓ Apresentar o conceito de dilatação térmica dos sólidos.

Na segunda etapa o professor pode iniciar a aula resgatando a aula anterior e verificando se os alunos entenderam os conceitos de calor e de dilatação. Posteriormente, pode-se demonstrar o funcionamento do motor térmico de elásticos, colocando o mesmo para funcionar algumas vezes.

A demonstração servirá para chamar a atenção dos alunos e fazer com que eles comecem a pensar em uma possível hipótese para entender o funcionamento do motor. Depois da demonstração sugerimos que o professor ensine sobre as dilatações térmicas linear, superficial e volumétrica dos sólidos dando ênfase às equações. No final da aula, após todas as discussões e resoluções de alguns exercícios o professor pode fazer mais uma demonstração com o dispositivo para questionar os alunos sobre seu funcionamento de forma a introduzir o assunto para que nas próximas aulas sejam discutidos detalhes sobre o seu funcionamento. Esse procedimento pode despertar a curiosidade dos alunos motivando-os para a próxima aula.

2.1.3. ETAPA 3

Duração: Três aulas de 50 minutos cada.

Objetivos:

- ✓ Apresentar o conceito de centro de massa;
- ✓ Apresentar o conceito de torque.

Sugerimos que o professor inicie a aula novamente com a demonstração do funcionamento do motor térmico para questionar os alunos sobre tal funcionamento. É interessante o professor tratar o assunto de forma investigativa para tentar induzir o aluno a chegar na ideia de equilíbrio mostrando que sem a fonte térmica, lâmpada desligada, há equilíbrio e com a fonte térmica, lâmpada ligada, não há. Este pode ser um bom momento para introduzir o conceito de centro de massa.

Após a explicação e exploração desse conceito o professor pode evoluir na discussão apresentando o conceito de torque, como a grandeza física que mede a eficácia de uma força para fazer com que os corpos girem. Com isso o aluno já terá condições de explicar o funcionamento do motor de elásticos. Portanto, ao final dessa etapa é desejável que o aluno saiba explicar fisicamente o funcionamento do motor de elásticos.

2.1.4. ETAPA 4

Duração: 2 aulas de 50 minutos cada.

Objetivos:

- ✓ Discutir o conceito de máquinas térmicas;
- ✓ Discutir a primeira lei da termodinâmica.

Após todas as demonstrações e explicações sobre os fenômenos que fazem o motor térmico de elásticos funcionar, o professor pode considerar o tratamento dos conceitos de termodinâmica para os alunos entenderem o que é uma máquina térmica.

A aula pode ser iniciada com comparações e questões que abordem o que há de comum no funcionamento do motor térmico de elásticos e uma geladeira ou do motor térmico de elásticos e uma locomotiva, por exemplo. Isso é interessante para fazer com que o aluno enxergue que tais equipamentos e o dispositivo analisado operam ciclicamente com duas fontes térmicas, quente e fria, para a realização de trabalho, sendo por isso chamados de máquinas térmicas.

As diferentes modalidades de energia e a conversão de uma modalidade em outra podem ser muito úteis para introduzir o princípio de conservação e transformação de energia, dada pela primeira lei da termodinâmica. Adicionalmente, o professor pode, de forma introdutória, falar um pouco sobre a segunda lei da termodinâmica ao discutir com os alunos o conceito de máquina térmica, fontes térmicas e quantidades de energia recebidas e perdidas pelo sistema através do calor.

2.1.5. ETAPA 5

Duração: Duas aulas de 50 minutos cada.

Objetivo:

- ✓ Discutir a segunda e terceira leis da termodinâmica.

De acordo com o nosso cronograma de aplicação deste produto, esta foi a etapa final da nossa sequência didática. Isso não significa que o professor deve ajustar suas aulas para discutir os assuntos e apresentar o experimento da mesma forma que nós abordamos. Isso dependerá da realidade de cada escola e se for desejável, o professor poderá estender a aplicação da proposta para abordagem de outros assuntos tornando a mesma ainda mais enriquecedora didaticamente.

Nesta, a aula pode ser iniciada com questões sobre se é possível que toda a energia térmica da fonte quente absorvida pelo sistema através de calor pode ser convertida em outra forma de energia através de trabalho. Para isso é importante introduzir o conceito de rendimento de uma máquina térmica. A partir disso é possível trabalhar os principais conceitos para o entendimento da segunda lei da termodinâmica, como entropia e a impossibilidade de conceber uma máquina térmica com rendimento de 100%. A equação do rendimento escrita em função da temperatura absoluta das fontes térmicas pode ser utilizada para discutir de forma introdutória o que vem a ser a terceira lei da termodinâmica, mostrando as consequências de considerarmos a fonte fria de uma máquina térmica a zero absoluto. O professor pode fazer isso através de questionamentos como: Qual será o rendimento da máquina térmica se a temperatura da fonte fria for zero na escala Kelvin? Se o conceito sobre a impossibilidade de concebermos uma máquina térmica com rendimento de 100% foi bem estabelecido, os alunos poderão concluir que é impossível atingirmos a temperatura de zero Kelvin, pois isso violaria a segunda lei da termodinâmica.

3. CONTEÚDOS DE FÍSICA QUE PODEM SER ABORDADOS COM OS EXPERIMENTOS

Com os experimentos construídos neste trabalho é possível abordar uma grande quantidade de conteúdos de física que fazem parte do currículo de mecânica e de termodinâmica do ensino médio. Estes têm grande potencial para que a abordagem dos fenômenos físicos considerados seja simples, além de permitir o tratamento interdisciplinar dos conteúdos através da história, por exemplo, com a invenção das máquinas térmicas no contexto da primeira revolução industrial ou mesmo uma aula interdisciplinar com a disciplina de química para os alunos aprenderem sobre cadeias carbônicas e ligações de dissulfeto que estão associadas ao comportamento anômalo do elástico com relação à dilatação térmica.

Os assuntos de física foram abordados na ordem em que foram aparecendo durante a demonstração dos experimentos. O primeiro experimento demonstrado em sala foi o pêndulo de elástico, com o objetivo de mostrar a dilatação anômala do elástico. Com isso, para este primeiro momento pode-se abordar os conceitos de calor, a lei zero da

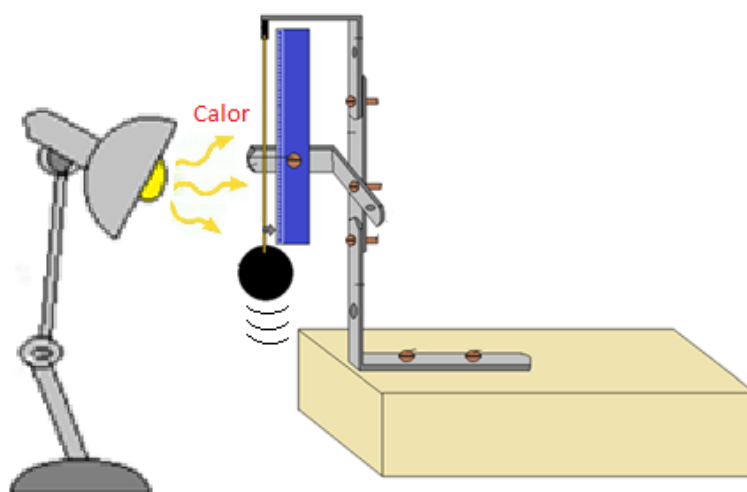
termodinâmica e a definição de temperatura, trabalho e dilatação térmica. No tema de dilatação térmica pode ser trabalhado as dilatações linear, superficial e volumétrica dos sólidos, a dilatação de líquidos, dando ênfase na dilatação anômala da água, e por fim a dilatação anômala do elástico.

Para o motor térmico de elásticos, que foi o segundo experimento demonstrado em sala, além dos assuntos voltados à termodinâmica, como máquinas térmicas e as leis da termodinâmica, é possível tratar alguns tópicos de mecânica, como centro de massa, torque e equilíbrio, pois são importantes para o entendimento do funcionamento do motor.

3.1. Calor

Com o pêndulo de elástico foi possível discutir de maneira clara o conceito de calor. Quando a luz incide no elástico energia térmica é transferida através do calor, ou seja, o calor é o método ou forma pela qual a energia térmica é transferida da fonte térmica, dada pela lâmpada incandescente, para o elástico, devido à diferença de temperatura que existe entre eles. O aquecimento do elástico provoca sua dilatação, veja ilustração na figura 3.1.

Figura 3.1: Energia térmica sendo transferida da lâmpada, fonte térmica, para o elástico através do calor.



Fonte: Elaborada pelo autor.

Neste momento o professor pode também fornecer uma contextualização histórica sobre a natureza do calor. Existiam duas hipóteses alternativas sobre a natureza do calor no final do século XVIII: a hipótese de o calor ser uma substância fluida indestrutível e a

hipótese de o calor consistir em minúsculos movimentos de vibração das partículas dos corpos. A mais aceita na época era a hipótese de o calor ser um fluido que “preenchia os poros” dos corpos e se escoaria de um corpo mais quente para um corpo mais frio. Antoine Lavoisier (1743 – 1794), defensor desta hipótese, chamou esta substância de “calórico”. A implicação era de que o calor poderia ser transferido de um corpo a outro, mas a quantidade total de “calórico” se conservaria, ou seja, existia uma lei da conservação do calor. Note que o calor era considerado como uma propriedade física do sistema que poderia ser medido.

A segunda hipótese, endossada por Francis Bacon (1561 – 1626), Robert Hooke (1635 – 1703) e Isaac Newton (1643 – 1727), pode ter sido sugerida devido a geração de calor por atrito, exemplificada pelo “método do escoteiro” para acender uma fogueira ou pelo aquecimento de um ferro martelado em uma bigorna. A teoria do calórico explicava estes efeitos dizendo que o atrito, ou o martelo do ferreiro, “espremem” o calórico para fora do material como água absorvida em uma esponja. (NUSSENZVEIG, 2002, p.167)

Em 1798, Benjamin Thompson (1753 – 1814), conde de Rumford – físico americano refugiado na Inglaterra – trabalhou em Munique, na Alemanha, e ficou impressionado com o intenso aquecimento dos cilindros de latão perfurados para serem utilizados em canos de canhões. Rumford realizou diversas experiências para entender melhor esse aquecimento e, em todas elas, ficou claro que o calor não poderia ser um fluido. A hipótese de ser originário do movimento era bem mais aceitável. Apesar de obter apoio de importantes cientistas, como Humphry Davy (1778 – 1829) e Thomas Young (1773 – 1829), sua tese obteve pouco sucesso.

No início do século XIX a teoria de que o calor era um fluido ainda era amplamente dominante, provavelmente devido à predominância dos físicos franceses nessa época. Só em 1840, com as experiências de James Prescott Joule (1818 - 1889), a ideia do fluido calórico caiu definitivamente por terra.

É comum encontrarmos em livros didáticos que calor é energia em trânsito. Essa definição causa muita confusão nos alunos, pois calor não é energia, não é mensurável, ele aparece no processo de transferência de energia térmica de um corpo para outro. O calor é a forma ou o método pelo qual energia térmica se transfere de um corpo para outro devido a diferença de temperatura entre eles. Em nosso experimento energia térmica é gerada na lâmpada quando corrente elétrica passa pela mesma, fazendo com que ela tenha maior temperatura que os outros objetos em sua vizinhança, como o elástico.

Consequentemente, esta energia é transferida através do calor para o elástico até que o equilíbrio térmico entre os dois seja estabelecido. Portanto, o que é gerado na lâmpada é energia térmica e não calor.

Nas equações em que aparece a quantidade de calor Q , a unidade de medida, de acordo com o sistema internacional (SI), é o *Joule* [J], pois estamos quantificando a quantidade de energia absorvida ou perdida pelo sistema através do calor e não propriamente o calor. Outra unidade muito comum, utilizada na prática é a *caloria* [Cal]. 1 *caloria* é a quantidade de energia necessária para elevar a temperatura de 1g de água de 1°C no intervalo de 14,5°C a 15,5°C através do calor. Para efeito de conversão de unidades entre calorias e Joule temos que 1 cal = 4,184 J. Este último é conhecido como o equivalente mecânico do calor, o qual foi decisivo para o estabelecimento da primeira lei da Termodinâmica, que é a lei de conversão e conservação de energia.

3.2. Lei Zero da Termodinâmica e o Conceito de Temperatura

A temperatura T é uma grandeza fundamental na termodinâmica e uma das sete grandezas fundamentais do SI. A unidade de medida de temperatura nesse sistema é o Kelvin (K). Embora não exista um limite superior para a temperatura de um corpo, existe um limite inferior, dada por $T = 0$ K, comumente chamada de zero absoluto. (HALLIDAY; RESNICK e WALKER; 2009, p.184)

O conceito de temperatura aparece muitas vezes nos livros didáticos como sendo a medida do grau de agitação molecular do sistema ou à energia cinética média das moléculas constituintes do mesmo. (TIPLER, 1999, p.504)

Um *sistema termodinâmico* é formado por um número muito grande de partículas, $N \gg 1$, limitado por uma fronteira. As paredes de um sistema podem ser fixas ou móveis e a natureza destas afetam de forma fundamental a interação entre o sistema e o meio externo que o cerca, comumente chamado de vizinhança do sistema. Se colocarmos água dentro de um recipiente metálico fechado e o pusermos em contato com uma fonte térmica de energia, como a chama de um fogão ou o congelador de uma geladeira, veremos que a temperatura da água irá se alterar. Da mesma maneira se colocarmos água em uma garrafa térmica veremos que sua temperatura irá se manter constante ou variará muito lentamente se comparado ao recipiente de metal. As paredes que separam dois sistemas e

é transparente ao fluxo de energia térmica, como no caso do recipiente de metal, são chamadas de paredes diatérmicas e as paredes que não facilitam ou isolam a troca de energia térmica entre duas regiões são chamadas de adiabáticas.

Quando dois sistemas estão separados por uma parede diatérmica dizemos que os sistemas estão em contato térmico e quando dois sistemas estão separados por uma parede adiabática dizemos que os sistemas estão isolados um do outro termicamente. Este isolamento pode ser realizado de forma geral, de modo que todo sistema isolado tende a uma condição onde nenhuma de suas variáveis macroscópicas variam com o tempo. Quando isso ocorre dizemos que o sistema está em equilíbrio termodinâmico. Isso significa que o sistema está em equilíbrio térmico, químico e mecânico. *Térmico* porque sua temperatura é constante em todos os pontos do sistema, *químico*, no sentido de não ocorrer nenhuma reação química, e *mecânico*, no caso em que o sistema não sofre deformações.

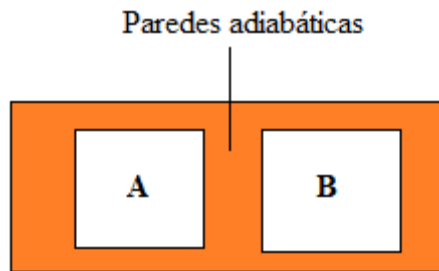
O conceito de temperatura está associado a uma propriedade comum de sistemas em equilíbrio térmico. Sensações subjetivas de temperatura, como o tato, não são confiáveis. Em um dia frio se pisarmos no chão com piso de cerâmica e depois em um piso de madeira, teremos a sensação de que o piso de cerâmica está mais frio que o piso de madeira. Esta falsa sensação de que a cerâmica está mais fria se dá pelo fluxo de energia retirada dos pés, através do calor, ser maior para a cerâmica do que para a madeira. Esse tipo de sensação ocorre porque na natureza existem absorvedores de energia melhores que outros. A medida da temperatura dos corpos em análise exclui esse tipo de sensação, mostrando que ambos estão à mesma temperatura quando estão em equilíbrio térmico.

Vamos considerar dois sistemas A e B com paredes adiabáticas, isolados termicamente um do outro. Cada sistema atinge o seu próprio equilíbrio térmico e como estão separados por paredes adiabáticas o estado termodinâmico do sistema A não afetará o estado termodinâmico do sistema B, veja ilustração na figura 3.2. O estado termodinâmico de um sistema é caracterizado pelos seus parâmetros como pressão P, volume V, temperatura T, etc. Portanto, para os sistemas A e B, seus estados termodinâmicos são caracterizados pelos parâmetros (P_A, V_A, T_A) e (P_B, V_B, T_B) , respectivamente, por exemplo.

Se substituirmos as paredes que separam os dois sistemas por uma parede diatérmica, como ilustrado na figura 3.3, os sistemas A e B estarão em contato térmico.

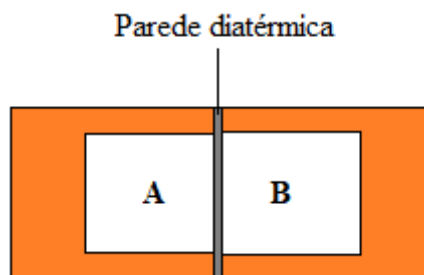
Com isso os sistemas irão evoluir para um outro estado de equilíbrio dado por $A+B$, que será diferente dos estados iniciais A e B se considerarmos que A e B são diferentes. À medida em que energia térmica é trocada entre A e B, chegará um momento em que A estará em equilíbrio térmico com B. Este momento se dá quando observamos $T_A = T_B$.

Figura 3.2: Sistemas A e B isolados por paredes adiabáticas fazendo com que o estado termodinâmico de um sistema não seja afetado pelo outro.



Fonte: Elaborada pelo autor.

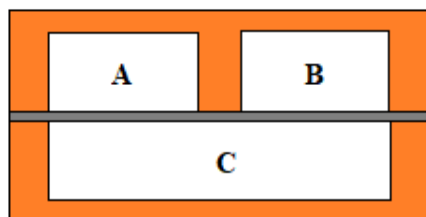
Figura 3.3: Sistemas A e B separados por uma parede diatérmica evoluindo para o equilíbrio térmico, o qual ocorre quando $T_A = T_B$.



Fonte: Elaborada pelo autor.

Vamos agora considerar uma situação com três sistemas (A, B e C) onde A e B estão em contato com C e isolados entre si, como ilustrado na figura 3.4.

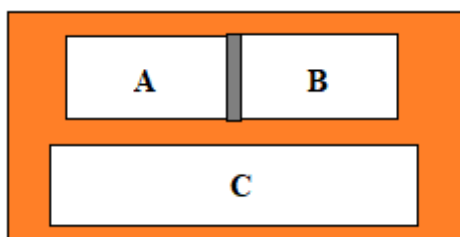
Figura 3.4: Sistemas A e B isolados entre si e em contato térmico com o sistema C.



Fonte: Elaborada pelo autor.

Após a obtenção do equilíbrio térmico entre A e C e o equilíbrio térmico entre B e C, o que irá acontecer se colocarmos uma parede diatérmica entre A e B e uma parede adiabática entre C e os sistemas A e B, como mostrado na figura 3.5?

Figura 3.5: Sistemas A e B em contato térmico e isolados do sistema C.



Fonte: Elaborada pelo autor.

Experimentalmente observa-se que se A e B estão em equilíbrio térmico com C, eles estão em equilíbrio térmico entre si, e portanto, nada acontecerá na situação da figura 3.5, ou seja, não haverá qualquer fluxo de energia entre A e B, pois eles já estão em equilíbrio térmico. Esta situação é conhecida como *lei zero da termodinâmica*: Dois sistemas em equilíbrio térmico com um terceiro sistema estão em equilíbrio térmico entre si.

A noção intuitiva de temperatura leva à ideia de que dois sistemas em equilíbrio térmico entre si têm a mesma temperatura, com isso, a partir da lei zero da termodinâmica podemos medir temperaturas com o auxílio de um termômetro.

3.3. Trabalho de uma Força Variável

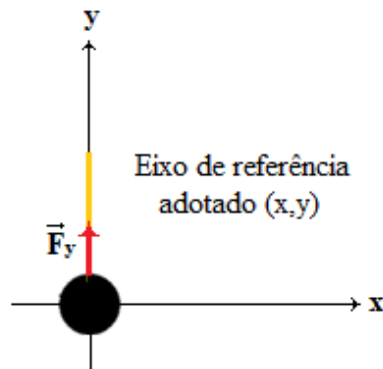
Após a lâmpada ser acesa e energia térmica ser transferida através do calor para os elásticos do pêndulo os mesmos realizam trabalho sobre a massa do pêndulo elevando-a. O trabalho, assim como o calor, é um método de transmissão de energia, mas neste caso a transmissão de energia se dá através de uma força, causada pela dilatação dos elásticos.

Vamos considerar que a força exercida pelos elásticos varia à medida que a massa se desloca, ou seja, a força depende da posição y ocupada pela massa, como ilustrado na figura 3.6:

$$F = F(y), \quad (3.1)$$

onde $F(y)$ pode ser positivo ou negativo.

Figura 3.6: Eixo de referência adotado para definição do trabalho de uma força variável F_y , causada pela dilatação do elástico.



Fonte: Elaborada pelo autor.

Num deslocamento muito pequeno Δy_k da massa em torno de uma posição y_i , tal que a força permaneça praticamente constante, $F(y) \approx F(y_k)$, o trabalho realizado pela força sobre a massa é

$$\Delta W_k \approx F(y_k) \Delta y_k \quad (3.2)$$

Para calcular o trabalho realizado num deslocamento finito de uma posição inicial para uma final, $y_i \rightarrow y_f$, podemos decompô-lo em uma sucessão de deslocamentos muito pequenos Δy_k , a cada um dos quais aplicamos a eq.(3.2). Fazendo o limite da somatória de todas as contribuições para $\Delta y_k \rightarrow 0$, ou seja,

$$W_{y_i \rightarrow y_f} = \lim_{\Delta y_k \rightarrow 0} \sum_k F(y_k) \Delta y_k, \quad (3.3)$$

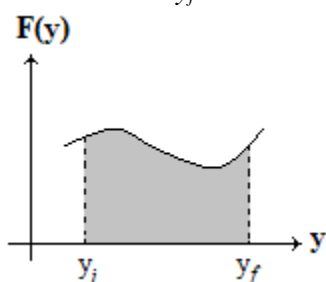
onde a soma se estende da posição inicial y_i até a final y_f . O limite acima é chamado de integração definida, dada por

$$W_{y_i \rightarrow y_f} = \int_{y_i}^{y_f} F(y) dy. \quad (3.4)$$

Esta representa a área sob a curva de $F(y)$, na região que vai de y_i até y_f , como ilustrado na figura 3.7.

Considerando que os elásticos dos nossos experimentos, pêndulo e motor térmico de elásticos, sofreram dilatação térmica, achamos conveniente trabalhar com os alunos os conceitos de dilatação térmica dos sólidos (linear, superficial e volumétrica) para introduzir a dilatação anômala da borracha (elásticos). Essa discussão pode ser proveitosa também para falar sobre a dilatação térmica dos líquidos, considerando o caso da dilatação anômala da água.

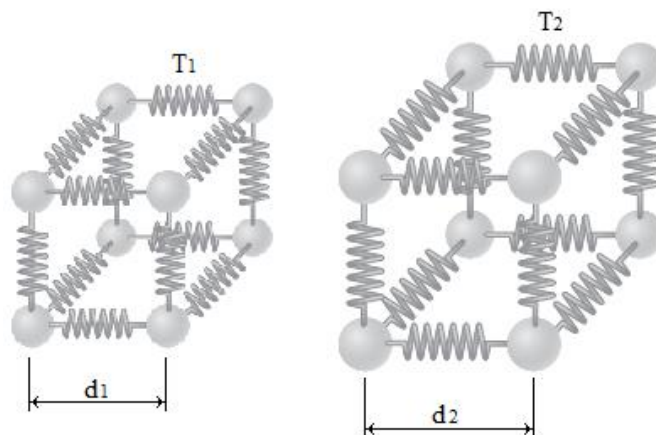
Figura 3.7: O trabalho realizado pela força é dado pela área do gráfico $F(y)$ vs y da posição y_i até y_f .



Fonte: Elaborada pelo autor.

A dilatação térmica é a alteração do tamanho de um corpo produzida por uma variação de temperatura. Este fenômeno está associado a um aumento do espaçamento interatômico médio das partículas constituintes do sistema. Uma ilustração simples de dilatação térmica é apresentada na figura 3.8 para um sólido, em que consideramos átomos dispostos em uma estrutura cúbica simples a uma temperatura T_1 espaçados entre si por uma distância d_1 . Essa distância é chamada de parâmetro de rede. As molas representam a interação entre os átomos. Após o aquecimento o sistema evolui para uma temperatura $T_2 > T_1$ e o parâmetro de rede passa a ser $d_2 > d_1$, ilustrando assim o aumento do espaçamento interatômico dos constituintes do sistema como consequência de sua dilatação térmica.

Figura 3.8: Estrutura cúbica simples mostrando a configuração atômica em um sólido. Neste modelo os átomos, representado por esferas, são dispostos nas arestas de um cubo conectados um ao outro por molas para representar as interações entre os mesmos. À esquerda o parâmetro de rede é dado pela distância d_1 para temperatura T_1 , e à direita temos a distância $d_2 > d_1$, para temperatura $T_2 > T_1$.



Fonte: Adaptado de Serway e Jewett (2014 p.135)

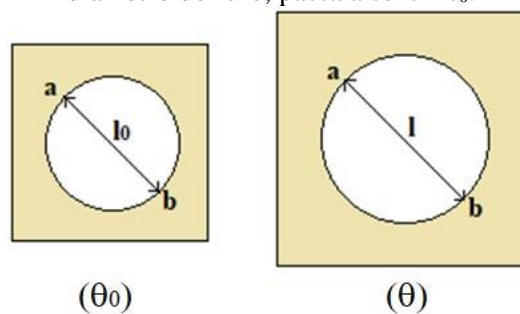
3.4. Dilatação Linear dos Sólidos

Considerando uma lâmina de um material sólido com um furo circular de diâmetro inicial $d = l_0$, como ilustrado na figura 3.9, sendo aquecida, a variação Δl do diâmetro do furo é proporcional a l_0 , ao aumento de temperatura $\Delta\theta$ e depende do tipo do material que é feita a lâmina. Essa dependência é expressa através de um número que fornece o coeficiente característico de cada material, chamado de coeficiente de dilatação linear α . A relação entre esses parâmetros forma a lei da expansão térmica linear de sólidos dada por,

$$\Delta l = \alpha l_0 \Delta\theta. \quad (3.5)$$

Note que nós mudamos a notação para o parâmetro temperatura de T para θ , pois T é usualmente utilizado para temperatura absoluta, escala Kelvin, enquanto que θ se refere à temperatura empírica do sistema, escala Celsius, por exemplo. A temperatura empírica está relacionada com a substância termométrica do termômetro, que pode ser de coluna líquida, um termopar, etc. A temperatura absoluta recebe este nome porque independe da substância termométrica utilizada para a medida da temperatura do sistema, ou seja, independe do tipo de termômetro utilizado.

Figura 3.9: Dilatação térmica de uma lâmina de material sólido com um furo circular de diâmetro inicial $d = l_0$. Com o aquecimento, $\theta > \theta_0$, a distância entre os pontos a e b, ou o diâmetro do furo, passa a ser $l > l_0$.



Fonte: Elaborada pelo autor.

Isolando o coeficiente de dilatação linear $\alpha = (\Delta l/l_0)/\Delta\theta$ vemos que o mesmo representa a variação relativa do comprimento l_0 com a temperatura. Não vamos entrar na discussão do quanto o coeficiente α é constante na realidade. As faixas de temperatura em que é observada essa constância podem ser relativamente pequenas, ou seja, $\Delta\theta \ll 1$.

Por simplicidade, vamos assumir que na região de temperatura que estamos trabalhando α é constante.

Sendo $\Delta l = l - l_0$ e $\Delta\theta = \theta - \theta_0$ a eq.(3.5) pode ser reescrita como,

$$l = l_0[1 + \alpha(\theta - \theta_0)]. \quad (3.6)$$

Para sólidos anisotrópicos, ou seja, aqueles cujas propriedades variam com a direção, como acontece com cristais, o coeficiente de dilatação térmica linear assume valores diferentes em direções diferentes. Para materiais isotrópicos, cujas propriedades não variam com a direção, α é independente da direção.

3.5. Dilatação Superficial dos Sólidos

Como a área do furo da placa descrita na seção anterior é a mesma do disco removido, vamos analisar agora o comportamento da dilatação superficial do sólido. Sendo o diâmetro do disco circular, após o aquecimento, dado por l , sua área A será dada por,

$$A = \pi \left(\frac{l}{2}\right)^2 = \frac{\pi}{4} l_0^2 (1 + \alpha\Delta\theta)^2.$$

Note que $A_0 = \frac{\pi}{4} l_0^2$ é a área inicial do disco. Expandindo o quadrado da relação acima

$$(1 + \alpha\Delta\theta)^2 = 1 + 2\alpha\Delta\theta + (\alpha\Delta\theta)^2,$$

observa-se um termo de segunda ordem para $\alpha\Delta\theta$. Como estamos trabalhando em uma faixa de temperatura em que α é constante, ou seja, $\Delta\theta \ll 1$, e como o coeficiente de dilatação linear de sólidos na prática é da ordem de $\alpha \sim 10^{-5} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$, tem-se que $\alpha\Delta\theta \ll 1$ de modo que podemos desprezar, em boa aproximação, o termo $(\alpha\Delta\theta)^2$. Diante dessas considerações, obtemos para a dilatação superficial do disco circular,

$$A = A_0(1 + \beta\Delta\theta), \quad (3.7)$$

em que o coeficiente $\beta = 2\alpha$ é o coeficiente de dilatação superficial do material do disco. Como estamos supondo que o material é isotrópico, a dilatação é a mesma em qualquer direção do plano que contém o disco.

3.6. Dilatação Volumétrica dos Sólidos

Para a dilatação volumétrica do sólido podemos utilizar um cilindro formado pelo disco de área inicial A_0 e altura inicial l_0 , de modo que seu volume inicial é dado por $V_0 = A_0l_0$. Utilizando o mesmo raciocínio anterior e as eqs.(3.6) e (3.7), o volume V do cilindro após o aquecimento é dado por,

$$\begin{aligned} V &= Al = A_0(1 + 2\alpha\Delta\theta)l_0(1 + \alpha\Delta\theta), \\ V &= A_0l_0[1 + \alpha\Delta\theta + 2\alpha\Delta\theta + 2(\alpha\Delta\theta)^2], \\ \therefore V &\cong V_0(1 + \gamma\Delta\theta), \end{aligned} \quad (3.8)$$

em que $\gamma = 3\alpha$ é o coeficiente de dilatação volumétrica do sólido. Note que utilizamos a mesma aproximação da seção anterior ao desconsiderar o termo de segunda ordem $2(\alpha\Delta\theta)^2$, uma vez que $\alpha\Delta\theta \ll 1$.

3.7. Dilatação Volumétrica dos Líquidos

Além das dilatações linear, superficial e volumétrica dos sólidos o professor pode trabalhar os conceitos de dilatação volumétrica de líquidos. Na dilatação dos líquidos temos a questão da dilatação real e aparente, pois o líquido, por ser amorfo, precisa obrigatoriamente estar dentro de um recipiente e com isso, quando aquecemos o líquido estamos aquecendo também o recipiente que o contém. Por isso, na prática o que medimos

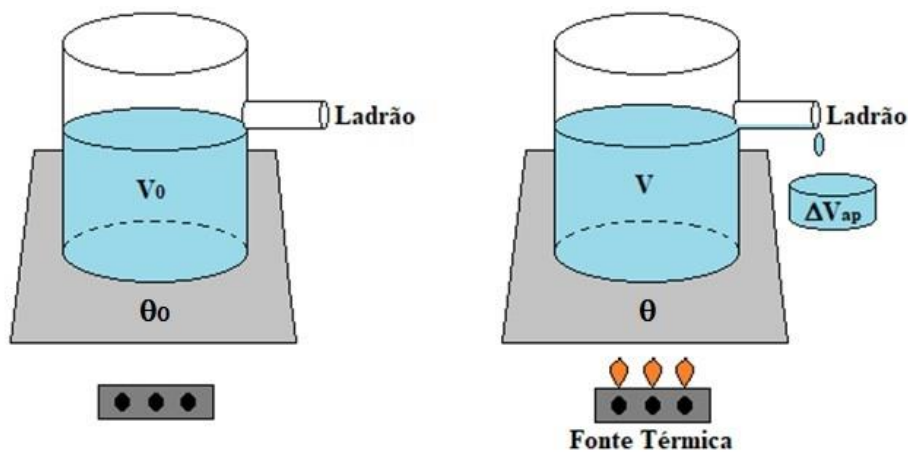
é a dilatação aparente do líquido, sendo necessário definir os coeficientes de dilatação aparente dos líquidos.

Normalmente a dilatação volumétrica dos líquidos é maior que a dilatação volumétrica dos sólidos, ou seja, o coeficiente de dilatação volumétrica do líquido é maior que o coeficiente de dilatação do sólido.

$$\gamma_{\text{líquido}} > \gamma_{\text{sólido}}$$

Assim, quando aquecemos um recipiente totalmente preenchido com um líquido, o líquido tende a derramar, como ilustrado na figura 3.10.

Figura 3.10: Dilatação volumétrica do líquido, sendo $\theta > \theta_0$.



Fonte: Elaborada pelo autor.

O líquido que se derrama pela dilatação do sistema ΔV_{ap} é chamado de volume aparente. Podemos relacionar matematicamente os coeficientes de dilatação volumétrica real, do recipiente e aparente da seguinte forma:

$$\Delta V_{\text{real}} = \Delta V_{\text{aparente}} + \Delta V_{\text{recipiente}} \quad (3.9)$$

A expressão da variação do volume de um líquido é a mesma daquela obtida para um sólido isotrópico, eq.(3.8), de modo que:

$$V_0 \gamma_{\text{real}} \Delta \theta = V_0 \gamma_{\text{aparente}} \Delta \theta + V_0 \gamma_{\text{recipiente}} \Delta \theta.$$

Logo,

$$\gamma_{\text{real}} = \gamma_{\text{aparente}} + \gamma_{\text{recipiente}}, \quad (3.10)$$

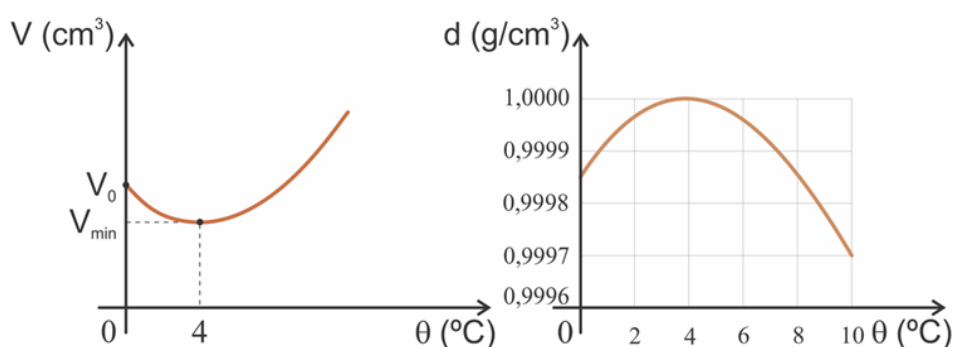
mostrando que a dilatação volumétrica real de um líquido é maior do que aparenta ser, devido à dilatação do recipiente.

3.8. Dilatação Anômala da Água

A água tem um comportamento anômalo com relação à sua dilatação térmica em determinadas condições. À medida que a água é resfriada a partir da temperatura ambiente o seu volume aumenta e conseqüentemente sua densidade diminui ao atingir a temperatura de 4°C, veja figura 3.11. Isso explica, por exemplo, porque o gelo flutua quando imerso em água líquida. Outra consequência extraordinária da dilatação anômala da água é o congelamento de lagos em suas superfícies, fazendo com que a vida dentro deles seja preservada. Mais detalhes podem ser dados durante a explicação deste fenômeno, que é causado quando as correntes de convecção que se estabelecem próximas à superfície do lago deixam de existir quando a atmosfera logo acima de sua superfície atinge a temperatura de 4°C. Como a densidade da água diminui abaixo dessa temperatura a porção mais fria de água fica próximo à superfície e a mais quente fica mais abaixo. Sendo o gelo um bom isolante térmico diminuições de temperatura na atmosfera próxima à superfície do lago não serão transmitidas para o interior do mesmo.

Dizemos que a água possui um comportamento anômalo porque a maioria dos líquidos tendem a diminuir o seu volume, ou equivalentemente aumentar sua densidade, à medida que os mesmos são resfriados.

Figura 3.11: Gráficos do volume e da densidade da água em função da temperatura.



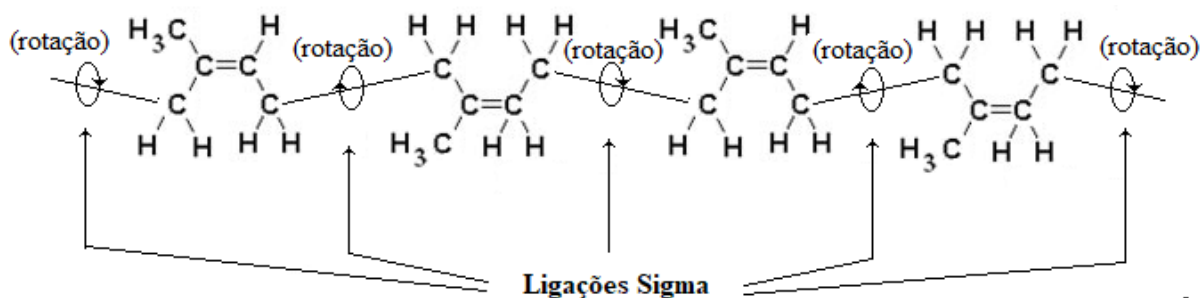
Fonte: FERRARO, N. G. Dilatação anômala da água. “Disponível em:” <http://osfundamentosdafisica.blogspot.com/2013/03/cursos-do-blog-termologia-optica-e-ondas.html>. Acesso em: 07 jan. 2019.

3.9. Dilatação Anômala da Borracha

A anomalia discutida na seção anterior não é exclusividade da água ou de líquidos. Esta pode acontecer também em um material sólido, como a borracha que constitui os elásticos dos nossos experimentos.

A borracha, em seu estado bruto, é formada por uma cadeia polimérica de monômeros de C_5H_8 . As unidades de monômeros estão conectadas por ligações σ (sigma) entre carbonos (figura 3.12) ao redor das quais pode haver rotação. O comportamento é produzido por “vulcanização”, ou seja, látex (estado bruto) tratado quimicamente com enxofre. São possíveis vários graus de vulcanização, o que resulta em diferentes números de unidades de monômeros entre pares de pontes de enxofre (SIMÕES, 2006).

Figura 3.12: Monômeros C_5H_8 conectados por ligações σ entre carbonos, ao redor das quais podem ocorrer rotações.



Fonte: Elaborada pelo autor.

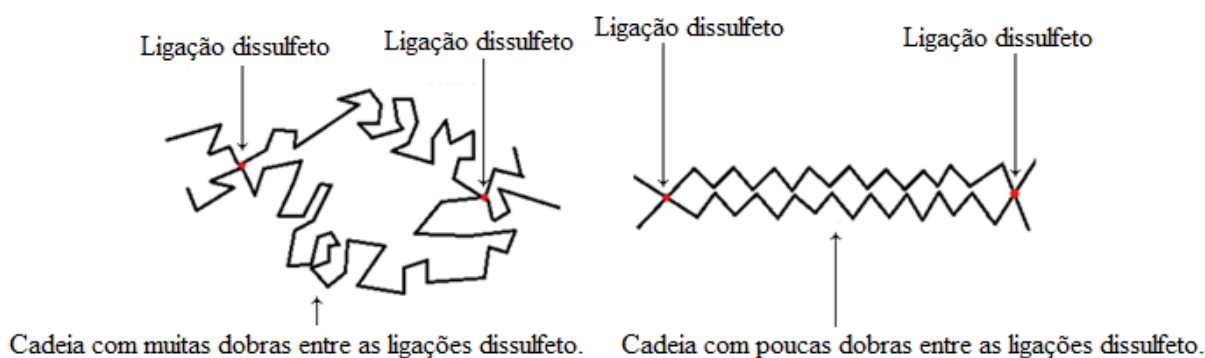
Na figura 3.13 mostramos um diagrama esquemático de como se comportam essas cadeias de monômeros entre um par de ligações dissulfeto. Estas ligações explicam o fenômeno observado de que a borracha, quando mantida sob uma tensão constante, tende a se contrair quando aquecida e tende a ficar mais alinhada, com poucas dobras, quando resfriada. As moléculas da cadeia, ao serem aquecidas, tendem a se agitar termicamente, portanto, não podem manter a sua forma alinhada. No caso do pêndulo de elásticos a tensão é mantida nos elásticos pela massa pendurada nos mesmos fazendo com que as dobras das cadeias de monômeros fiquem mais alinhadas. Quando os elásticos são aquecidos pela energia térmica proveniente da lâmpada os seus átomos vibram com maior

intensidade causando um “enrugamento” das cadeias de monômeros. Isso faz com que os elásticos se contraíam elevando a massa que está pendurada nos mesmos.

No caso dos sólidos, o comportamento usual é o material se distender quando aquecido e não se contrair, como no caso do elástico. Essa anomalia pode ser explorada para a introdução do comportamento anômalo da água apresentado na seção anterior, ou o contrário.

Adicionalmente, o professor pode propor uma aula interdisciplinar com a disciplina de Química para estudar cadeias carbônicas de polímeros e ligações químicas, trazendo o assunto sobre ligações dissulfeto.

Figura 3.13: Diagrama esquemático do comportamento da borracha vulcanizada: à esquerda temos o sistema relaxado a temperaturas suficientemente altas e à direita temos o sistema esticado a temperaturas suficientemente baixas.



Fonte: Elaborada pelo autor.

Vamos discutir agora alguns tópicos de Física relacionados a Mecânica e a Termodinâmica.

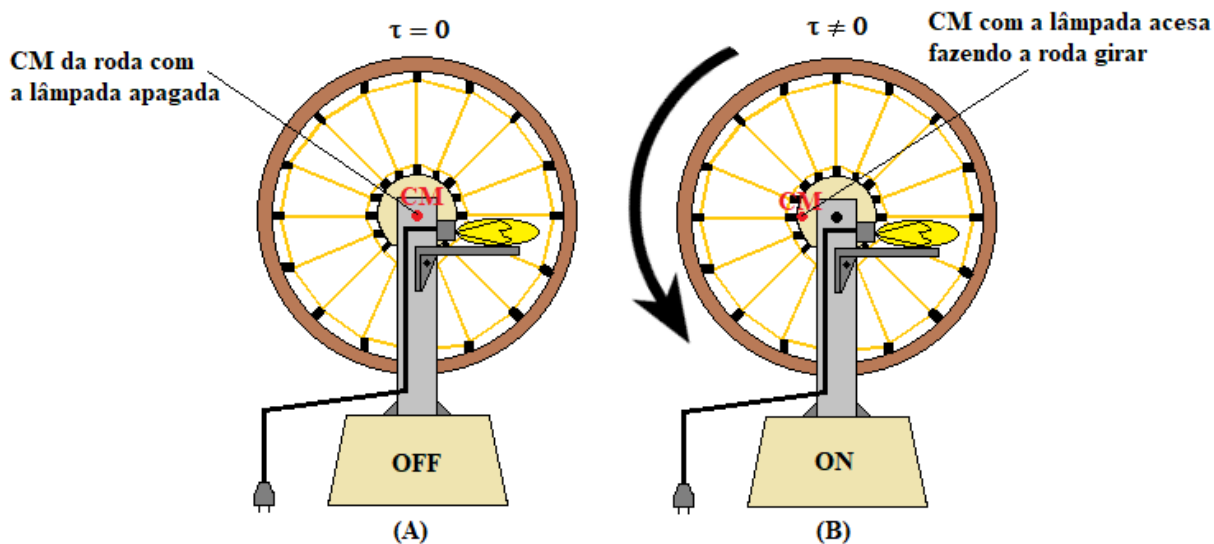
3.10. Centro de Massa

Vimos nas seções anteriores alguns conteúdos de física que aparecem no funcionamento do experimento do pêndulo de elásticos e que também irão aparecer no funcionamento do motor térmico de elásticos. Para o motor térmico funcionar devemos ligar a lâmpada para que ela forneça energia aos elásticos da roda através do calor,

fazendo com que os elásticos daquela região sofram dilatação térmica e consequentemente o centro de massa (CM) da roda seja deslocado.

Para melhor compreender o funcionamento da máquina temos que analisar o que é o CM de um corpo ou de um conjunto de corpos. Na mecânica clássica a determinação do CM é muito importante porque usualmente analisamos o seu movimento. Isso é útil porque se tivermos que descrever o movimento de um objeto com forma irregular sujeito a uma força uniforme podemos reduzir o mesmo a um ponto material desprezando as dimensões do sistema. Este ponto é justamente o CM do objeto. É importante deixar claro para os alunos que isto é uma aproximação. Dependendo do tipo de análise que se quer fazer as dimensões do sistema não podem ser desconsideradas, como no caso da análise do movimento de um avião, por exemplo, o qual possui parte móveis provocando o deslocamento do seu CM. Em nosso experimento o fator que irá definir o giro da roda é a alteração da posição de seu CM, pois é a partir da mudança dele que a roda perde o equilíbrio e começa a girar, veja ilustração na figura 3.14. Isso será melhor explicado na próxima seção. Nesta vamos apenas discutir como podemos localizar o CM de um sistema.

Figura 3.14: (A) O CM da roda com a lâmpada apagada coincide com o seu eixo de rotação. Todos os elásticos são organizados para que a roda esteja em equilíbrio estático sobre o seu eixo; (B) O CM da roda é deslocado no sentido contrário à fonte de energia (lâmpada), causando um desequilíbrio e fazendo com que a roda ganhe movimento de rotação no sentido indicado.



Fonte: Elaborada pelo autor.

O centro de massa de um sistema de partículas é o ponto que se move como se toda massa do sistema estivesse concentrada nesse ponto (HALLIDAY; RESNICK e WALKER; 2009, p.207). A figura 3.15 ilustra um sistema de duas partículas com suas respectivas coordenadas. Note que se $m_2 > m_1$ o CM de massa do sistema estará mais próximo de m_2 .

A posição do CM desse sistema, dada por x_{CM} na figura 3.15, é definida por:

$$x_{CM} = \frac{m_1x_1 + m_2x_2}{m_1 + m_2} \quad (3.11)$$

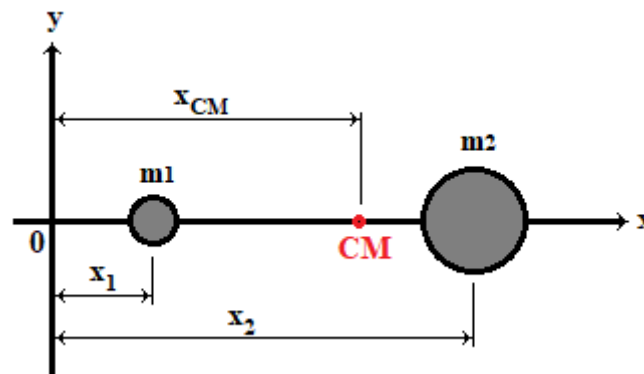
Para um sistema com n partículas ao longo do eixo- x a massa total é dada pela soma das massas,

$$M = m_1 + m_2 + m_3 + \dots + m_n \quad (3.12)$$

e a posição do centro de massa do sistema pode ser escrita da seguinte forma,

$$x_{CM} = \frac{m_1x_1 + m_2x_2 + m_3x_3 + \dots + m_nx_n}{M} \quad (3.13)$$

Figura 3.15: Representação de um sistema de duas partículas de massas m_1 e m_2 localizadas no eixo- x em x_1 e x_2 , respectivamente. A posição do CM é dada por x_{CM} .



Fonte: Elaborada pelo autor.

A eq.(3.13) pode também ser escrita de forma compacta utilizando o sinal de somatório como:

$$x_{CM} = \frac{1}{M} \sum_{i=1}^n m_i x_i \quad (3.14)$$

Se tivéssemos uma distribuição de partículas nos eixos y e z teríamos a mesma equação acima bastando mudar a variável x por y ou z . De maneira geral se a posição da partícula i de um sistema de muitas partículas é dada pelo vetor posição $\vec{r}_i = (x_i, y_i, z_i)$, a posição do CM é escrita como:

$$\vec{r}_{CM} = \frac{1}{M} \sum_{i=1}^n m_i \vec{r}_i \quad (3.15)$$

Mas como ficaria o cálculo do centro de massa de um objeto maciço com um formato não simétrico como um taco de beisebol, por exemplo? Um taco de beisebol, contém tantas partículas (átomos) que podemos aproximá-lo por uma distribuição contínua de massa. Se dividirmos o taco em elementos de massa dm infinitesimalmente pequenos, o somatório da eq.(3.15) passa a ser escrito como uma integral e a coordenada do centro de massa fica,

$$\vec{r}_{CM} = \frac{1}{M} \int_0^M \vec{r} dm. \quad (3.16)$$

Neste caso precisamos considerar o conceito de densidade ρ do sistema, pois se a distribuição de massa no mesmo não é homogênea, temos que,

$$\rho(\vec{r}) = \frac{dm(\vec{r})}{dV} \rightarrow dm(\vec{r}) = \rho(\vec{r})dV. \quad (3.17)$$

Substituindo a eq.(3.17) na eq.(3.16), obtemos para um caso geral,

$$\vec{r}_{CM} = \frac{1}{M} \int_V \vec{r} \rho(\vec{r})dV, \quad (3.18)$$

em que a integral no volume é uma integral tripla relacionada às coordenadas x , y e z . No ensino médio é possível tratar matematicamente sistemas mais simples como o da figura 3.15 ou corpos simétricos com densidade constante. Nestes casos o CM de massa coincidirá com o centro geométrico, ou centroide, do corpo.

3.11. Torque e Centro de Gravidade

Para entendermos porque a roda do motor de elásticos gira precisamos descrever para os alunos o que é equilíbrio. O movimento de um corpo como um todo pode ser considerado como o seu movimento de translação junto com qualquer movimento de rotação que o corpo possa ter. No caso mais geral, uma única força agindo em um corpo produz mudanças em ambos os movimentos, de translação e rotação. Contudo, quando várias forças atuam em um corpo simultaneamente, seus efeitos podem ser compensados e os movimentos de translação e rotação permanecem inalterados. Estes são os exemplos de exercícios sobre estática que geralmente são utilizados no ensino médio. Neste caso dizemos que o corpo ou o sistema está em *equilíbrio*.

Isso significa que o corpo como um todo permanece em repouso ou se move em uma linha reta com velocidade constante e que o corpo não está rotacionando ou está a uma taxa constante, ou seja, está executando um movimento circular uniforme.

No experimento do motor de elásticos, a roda está em equilíbrio quando a lâmpada está apagada, pois a mesma não translaciona e nem rotaciona, ou seja, ela está em equilíbrio translacional e rotacional. Este equilíbrio é perturbado quando os elásticos começam a ser aquecidos, porque a contração dos mesmos provoca o deslocamento do centro de massa (CM) da roda. A roda é construída de forma simétrica, para que o CM de massa dela se localize exatamente em seu eixo de rotação, localizado em seu centro geométrico. Mas por que a roda gira?

Neste momento o professor pode até introduzir o conceito de força aos alunos se isso ainda não tiver sido discutido em outra ocasião. A força é uma grandeza física responsável pela mudança do estado de movimento de um corpo, ou seja, se o corpo está parado ou em movimento, para colocá-lo em movimento ou pará-lo é necessário a aplicação de uma força no mesmo. Portanto, quando a roda começa a rotacionar significa que uma força está agindo sobre ela. Mas que força é essa? É a força devido ao campo gravitacional da Terra, ou seja, é a força da gravidade.

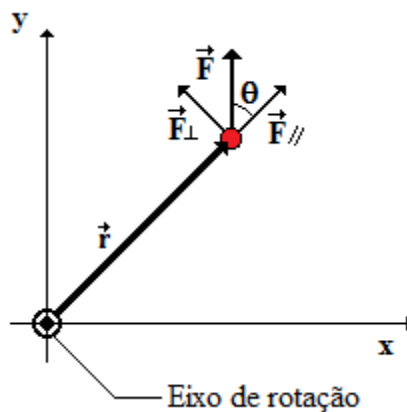
Para entendermos melhor a ação dessa força no movimento da roda vamos definir o que é o centro de gravidade (CG) da roda. O CG é o ponto em que a força da gravidade age em um objeto ou corpo. Usualmente nós consideramos que o campo gravitacional da Terra é uniforme. Nestas condições, como a força gravitacional é diretamente relacionada

com a massa do sistema, a posição do seu CG coincide com a posição do seu centro de massa (CM). Isso justifica o porquê dos termos CG e CM em ensino de física tenderem a ser utilizados como sinônimos, pelo fato de ambos estarem localizados na mesma posição. No caso em que o campo gravitacional não for uniforme na região em que o sistema se localiza, as posições do seu CG e CM não serão coincidentes.

Portanto, podemos considerar um vetor devido à força gravitacional agindo no CM da roda o tempo todo. Quando a lâmpada está apagada a força gravitacional na roda, ou a força peso da mesma, está equilibrada pela força normal fornecida pelo suporte de apoio no eixo de rotação da roda, pois o seu CM está posicionado exatamente em seu eixo de rotação. Como o eixo de rotação está fixo dizemos que o deslocamento do CM da roda, ou seu CG, faz com que a força gravitacional produza um torque e a roda gire. Mas o que é o torque de uma força?

O torque é uma grandeza física que mede a eficiência de uma força \vec{F} para provocar a rotação de um corpo em torno de um eixo de rotação. A figura 3.16 mostra o ponto de aplicação de uma força \vec{F} a uma distância \vec{r} do eixo de rotação de um sistema.

Figura 3.16: Representação de uma força \vec{F} agindo em um ponto localizado a uma distância \vec{r} de um eixo de rotação. O ângulo entre as direções dos vetores \vec{F} e \vec{r} é dado por θ e os vetores \vec{F}_\perp e \vec{F}_\parallel são as componentes perpendicular e paralela do vetor força \vec{F} , respectivamente.



Fonte: Elaborada pelo autor.

O torque $\vec{\tau}$ de uma força é uma grandeza vetorial e aponta na direção do eixo de rotação do sistema. Matematicamente este é dado pelo produto vetorial dos vetores \vec{r} e \vec{F} , ou seja,

$$\vec{\tau} = \vec{r} \times \vec{F}. \quad (3.19)$$

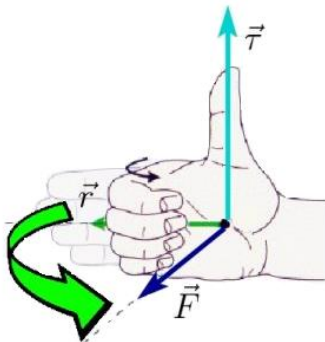
Usualmente a distância entre o ponto de aplicação da força e o eixo de rotação do sistema é chamado de braço de alavanca. Se a direção do vetor força fizer um ângulo θ com a direção do vetor posição, podemos escrever a eq.(19) como,

$$\vec{\tau} = rF \text{sen}\theta (\hat{r} \times \hat{F}) \quad (3.20)$$

em que \hat{r} e \hat{F} são os versores dos vetores posição e força, respectivamente. Se o vetor posição for paralelo ao eixo- x tem-se que $\hat{r} = \hat{i}$ e se a força for paralela ao eixo- y , $\hat{F} = \hat{j}$, de modo que o torque irá apontar na direção de z positivo, ou seja, $\vec{\tau} = \tau \hat{k}$.

Para resolver o produto vetorial e obter o sentido do vetor $\vec{\tau}$ o professor pode utilizar alguma regra mnemônica como a regra da mão direita, ilustrada na figura 3.17.

Figura 3.17: Representação da regra da mão direita, onde o polegar representa o vetor torque e os outros dedos representam o sentido da rotação do sistema, seguindo a ordem do produto vetorial $\vec{r} \times \vec{F}$, ou seja, com os dedos apontando primeiramente na direção de \vec{r} girando sobre o segundo vetor \vec{F} .



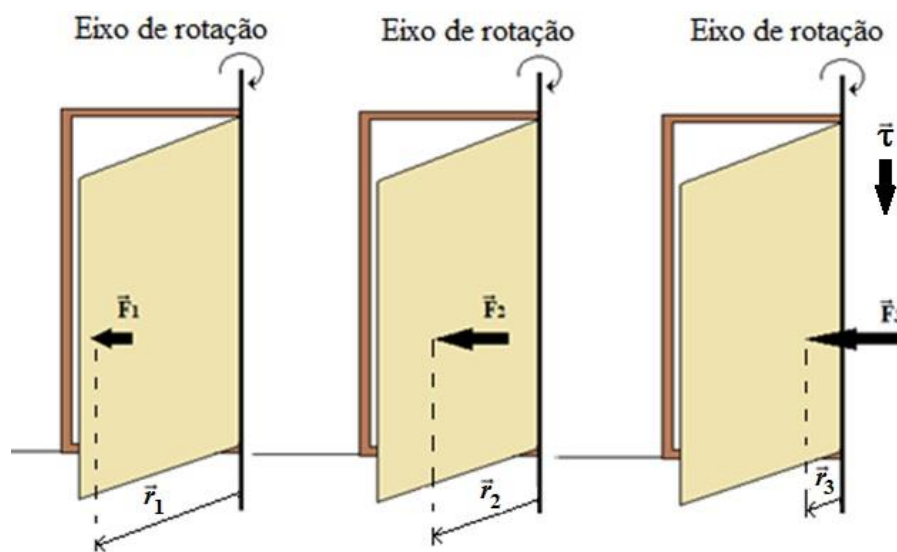
Fonte: OLIVEIRA, I. Cinemática e dinâmica de rotações. “Disponível em:” <http://propg.ufabc.edu.br/mnpef-sites/leis-de-conservacao/cinematica-e-dinamica-de-rotacoes/>. Acesso em: 07 jan. 2019.

Para que o conceito de torque seja melhor entendido o professor pode fornecer aos alunos exemplos em que essa grandeza se faz presente no dia a dia dos mesmos, como o exemplo mostrado na figura 3.18. Faça perguntas como: Por que a fechadura de uma porta fica na extremidade oposta de suas dobradiças (eixo de rotação) e não no centro da porta, por exemplo, como nas portas dos Hobbits no filme do Senhor dos Anéis? Será uma questão de estética? A eq.(3.20) mostra que quanto maior o braço de alavanca r , ou

seja, a distância entre o eixo de rotação da porta, localizado em suas dobradiças, e a fechadura, mais eficiente será a aplicação de uma força arbitrária, pois maior será o torque.

Pela regra da mão direita, o torque na porta da figura 3.18 possui direção vertical para baixo.

Figura 3.18: Exemplo de torque e obtenção de maior eficiência de uma força em um exemplo do dia a dia dos alunos. Vemos que quanto maior a distância r entre o ponto de aplicação de uma força e as dobradiças da porta, maior será a eficiência da força aplicada e, portanto, maior o torque, pois é possível fechar a porta com uma força menor. A direção do vetor torque é vertical para baixo.



Fonte: Elaborada pelo autor.

O mesmo é observado quando queremos trocar o pneu de um carro. Se tivermos uma chave de roda com um grande braço de alavanca não precisaremos muita força para conseguir soltar os parafusos, pois teremos maior eficiência da força aplicada no processo.

Para verificar o efeito do deslocamento do CM da roda do motor de elásticos, quando estes são aquecidos, vamos partir do princípio que nós não sabemos onde está exatamente o CM da roda e realizar o cálculo do torque da força peso da roda, dada por $\vec{F} = M\vec{g}$, em que M é a massa total da roda e \vec{g} é a aceleração da gravidade, que supomos ser uniforme ao longo da roda. Como nós não sabemos exatamente para onde o CM da roda será deslocado, pois não temos como determinar precisamente quais elásticos serão contraídos e a magnitude das contrações, teremos que fazer um cálculo geral.

Como a distribuição de massa na roda não é homogênea, pois a mesma é composta por diferentes materiais, a força gravitacional em cada elemento de massa dm do volume V da roda localizado na posição \vec{r} é dada por $d\vec{F}(\vec{r}) = dm(\vec{r}) \vec{g}$. Sendo a densidade desse elemento de massa dada por $\rho(\vec{r})$, podemos utilizar a eq.(3.17) e escrever a força gravitacional resultante na roda como,

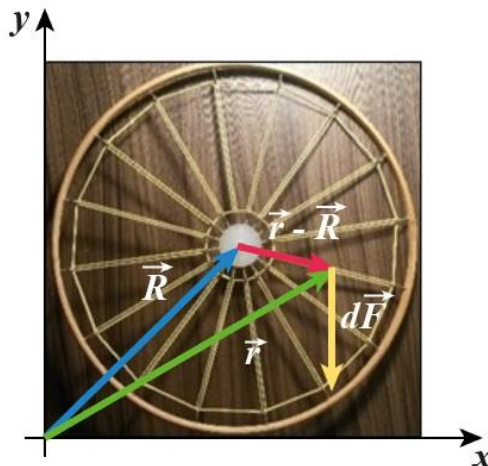
$$\vec{F} = \int_V \rho(\vec{r}) \vec{g} dV. \quad (3.21)$$

Para calcular o torque dessa força na roda vamos considerar um ponto de referência dado pela posição do eixo de rotação da roda localizado em \vec{R} , veja ilustração na figura 3.19. Dessa forma o torque resultante, referente à todas as forças gravitacionais em cada elemento de massa localizado em \vec{r} , com relação ao eixo de rotação da roda localizado em \vec{R} , será dado por,

$$\vec{\tau} = \int_V (\vec{r} - \vec{R}) \times \rho(\vec{r}) \vec{g} dV,$$

em que a quantidade $\vec{r} - \vec{R}$ é o braço de alavanca do elemento de força gravitacional $d\vec{F}$ com relação ao eixo de rotação da roda.

Figura 3.19: Roda do motor térmico de elásticos mostrando a localização de um elemento de massa em \vec{r} com força peso $d\vec{F}$ para o cálculo do torque resultante da força gravitacional na roda em relação ao seu eixo de rotação, localizado em \vec{R} . A diferença $\vec{r} - \vec{R}$ é o braço de alavanca referente ao elemento de massa considerado.



Fonte: Elaborada pelo autor.

Como nós construímos a roda para que seu centro de massa fique exatamente no seu eixo de rotação quando a lâmpada estiver apagada, temos que o ponto de referência é o próprio CM, ou seja, $\vec{R} = \vec{r}_{CM}$. Logo, o torque resultante pode escrito agora como,

$$\therefore \vec{\tau} = \left[\int_V (\vec{r} - \vec{r}_{CM}) \rho(\vec{r}) dV \right] \times \vec{g}. \quad (3.22)$$

Esta expressão mostra que se $\vec{r} = \vec{r}_{CM}$ obtemos $\int_V (\vec{r} - \vec{r}_{CM}) \rho(\vec{r}) dV = 0$ e consequentemente $\vec{\tau} = 0$. Esta é a situação em que estamos analisando o torque resultante da força gravitacional na posição do CM, o qual coincide com o seu centro de gravidade. Isso mostra que a roda permanecerá em repouso, sem qualquer movimento de rotação, quando a lâmpada estiver desligada. Esta é a situação de equilíbrio que discutimos anteriormente. Quando a lâmpada é ligada e os elásticos aquecidos, a dilatação térmica dos mesmos faz com que o CM da roda seja deslocado, de modo que $\vec{R} \neq \vec{r}_{CM}$. Neste caso a eq.(3.22) fornece o resultado,

$$\vec{\tau} = \left[\int_V (\vec{r}_{CM} - \vec{R}) \rho(\vec{r}) dV \right] \times \vec{g} \neq 0,$$

ou seja, como o torque é diferente de zero, a roda deixa o equilíbrio inicial e começa a rotacionar.

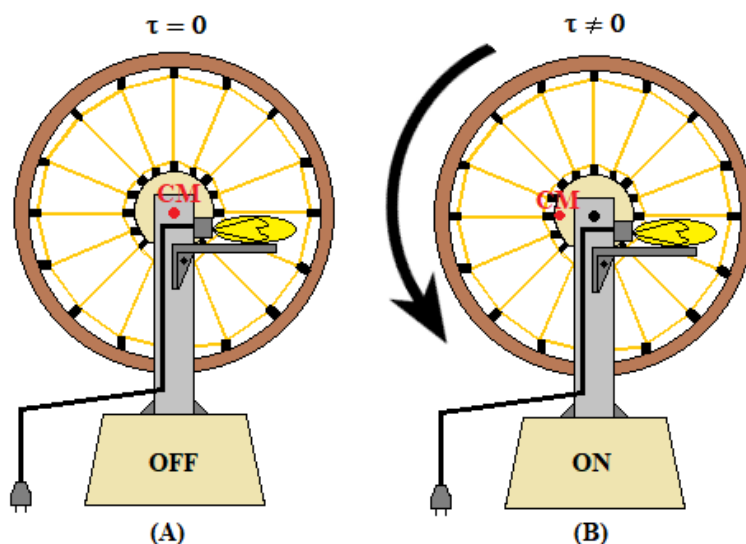
Na figura 3.20(A) apresentamos uma ilustração da situação em que o torque é zero, uma vez que $\vec{R} = \vec{r}_{CM}$, eq.(3.22), e em (B) temos $\vec{R} \neq \vec{r}_{CM}$ que é a situação em que a roda gira devido à contração dos elásticos discutida acima. Note que o CM se desloca na direção oposta à posição em que a lâmpada é colocada, uma vez que o eixo de rotação da roda é puxado para o lado em que a lâmpada está posicionada. Devido à essa assimetria o giro da roda se dá para baixo do lado em que o CM está, com a direção do torque saindo perpendicularmente ao plano da figura no exemplo da figura 3.20(B).

Concluimos então que o equilíbrio estático da roda do motor térmico de elásticos só é garantido se a somatória das forças e dos torques das forças forem iguais a zero.

É importante deixar claro para o professor do ensino médio que todo o formalismo desenvolvido aqui para a explicação da física referente ao funcionamento do motor de elásticos é feito em alto nível para que o professor possa entender com clareza o que está acontecendo com diferentes argumentos, não só qualitativos, mas também quantitativos. Não é nosso objetivo convencer o professor a utilizar tal formalismo para a discussão dos

fenômenos envolvidos no funcionamento do motor de elásticos com os alunos do ensino básico. Partimos do princípio que o professor de física precisa saber bem a física por trás dos fenômenos que estão sendo estudados. As vezes a transposição didática para um nível mais básico de ensino não é direta com relação à matemática envolvida, mas isso não quer dizer que não possa haver uma discussão de caráter qualitativo com os alunos para explicar os fenômenos.

Figura 3.20: Motor térmico de elásticos em (A) com a lâmpada desligada – OFF e em (B) com a lâmpada ligada – ON. Em (A) a roda permanece parada, sem rotacionar, pois como o CM de massa da roda está localizado em seu eixo de rotação o torque da força gravitacional na roda é nulo. Em (B) o CM da roda é deslocado para a esquerda, uma vez que a lâmpada à direita aquece os elásticos fazendo os mesmos se contraírem e puxar o eixo de rotação para a direita. Neste caso observamos a rotação da roda com a direção do torque saindo perpendicularmente ao plano da figura.



Fonte: Elaborada pelo autor.

Vamos passar agora para as discussões das leis da Termodinâmica e como é funcionamento do motor térmico de elásticos como uma máquina térmica.

Para este caso o professor pode definir o torque de uma força como uma grandeza física que mede a eficiência de uma força em produzir a rotação de um corpo. Se a roda do motor está girando temos o torque de uma força. Mas que força é essa? A força peso da roda. Onde é o seu ponto de aplicação? No CM da roda que está localizado no seu eixo de rotação quando a lâmpada está desligada. Isso explica porque a roda se mantém parada.

Mas por que a roda gira quando a lâmpada é ligada? Porque a contração dos elásticos desloca o CM da roda de seu eixo de rotação fazendo com que haja um torque. O professor pode ainda fazer analogias, como o que acontece quando deslocamos para a direita ou esquerda um quadro pendurado na parede que estava parado, em equilíbrio estável. O quadro gira. Mas por quê? Porque nós deslocamos o quadro da posição em que o seu CM estava na mesma linha vertical do suporte que o mantinha pendurado em equilíbrio. Esta é a mesma situação da roda do motor de elástico, no quadro também temos um torque da força peso que faz com que o quadro gire devido ao deslocamento do seu CM.

3.12. Primeira Lei da Termodinâmica

A primeira lei da termodinâmica é mais comumente conhecida como a lei de conservação e transformação de energia. Todo sistema possui uma energia chamada de energia interna U , a qual está associada à energia cinética média das moléculas (temperatura) e à energia potencial de interação das moléculas ou partículas que constituem o sistema. Quando o sistema ganha (perde) energia através do calor Q ou ganha (perde) energia através do trabalho W , tais ganhos e perdas variam a energia interna (ΔU) do sistema para mais ou para menos. Comumente a energia interna de um sistema é chamada de energia térmica.

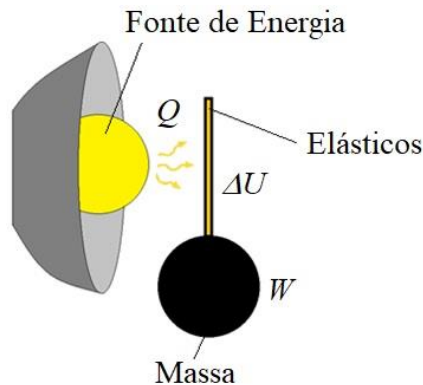
Vamos analisar a situação do pêndulo de elástico, representado na figura 3.21, onde a lâmpada fornece energia ao elástico através do calor (Q). Com isso, parte desta energia servirá para alterar a temperatura do elástico e conseqüentemente alterar sua energia interna (ΔU). A outra parte da energia faz com que o elástico realiza trabalho (W) e eleve a massa.

Isso pode ser explorado através da equação da primeira lei da Termodinâmica dada por,

$$\Delta U = Q - W, \quad (3.23)$$

se a reescrevermos da seguinte forma $Q = \Delta U + W$. Como descrito no parágrafo anterior, parte da energia total absorvida pelo elástico, a partir da lâmpada através de calor Q , aquecerá os elásticos variando a sua energia térmica, ΔU , e o restante será transferida à massa suspensa pelo elástico pela realização de trabalho W .

Figura 3.21: Quando a lâmpada é acesa energia é transferida ao elástico do pêndulo através de calor Q . Parte dessa energia aquece o elástico variando sua energia térmica, ΔU , e o restante é transferida à massa através de trabalho W elevando-a.



Fonte: Elaborada pelo autor.

3.13. Máquinas Térmicas

Uma máquina térmica é um dispositivo que extrai energia de uma fonte térmica através de calor e realiza um trabalho útil. Toda máquina térmica utiliza algo para realizar trabalho, chamada de substância de trabalho. No caso das máquinas a vapor utiliza-se o vapor de água, nos motores à combustão utilizamos álcool ou gasolina e em nosso motor térmico utilizamos a borracha.

O funcionamento de uma máquina térmica se deve pela existência de duas fontes térmicas com temperaturas diferentes. Ou seja, devemos ter uma fonte quente com temperatura T_1 e outra fria com temperatura T_2 , em que $T_1 > T_2$. A fonte quente é representada pelo lado da roda que recebe energia da lâmpada incandescente através do calor e a fonte fria é a atmosfera à temperatura ambiente bem menor que a temperatura da lâmpada.

Na figura 3.22 (A) apresentamos o diagrama de uma máquina térmica usual e fazemos uma analogia de seus parâmetros em (B), onde apresentamos o nosso motor térmico de elásticos.

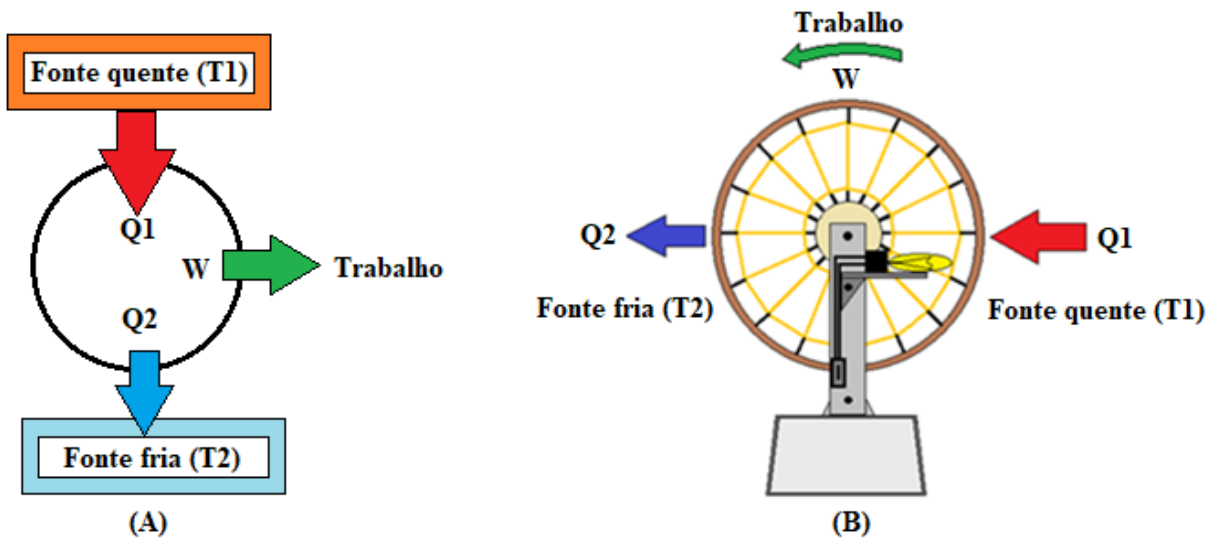
Como a máquina térmica funciona ciclicamente temos que $\Delta U = U_f - U_i = 0$, pois o estado final do sistema é igual ao seu estado inicial $U_f = U_i$. A quantidade total de energia absorvida e dissipada pelos elásticos através de calor é dada por Q_1 e $-Q_2$,

respectivamente. O sinal negativo aparece porque a energia foi dissipada. A energia fornecida à vizinhança pelo giro da roda é dada por W , de modo que a eq.(3.23) nos permite escrever,

$$0 = (Q_1 - Q_2) - W$$

$$\therefore Q_1 = Q_2 + W.$$

Figura 3.22: Em (A) apresentamos um diagrama usual de máquina térmica e em (B) identificamos os parâmetros da máquina térmica no motor térmico de elásticos.



Fonte: Elaborada pelo autor.

Este resultado nos permite obter uma expressão para o rendimento η de uma máquina, o qual é dado pela razão entre o trabalho W e a energia total Q_1 absorvida da fonte quente através de calor, ou seja,

$$\eta = \frac{W}{Q_1} = \frac{Q_1 - Q_2}{Q_1} \quad \rightarrow \quad \eta = 1 - \frac{Q_2}{Q_1} \quad (3.24)$$

Esta mostra que o rendimento de uma máquina térmica é sempre menor que 100%. Uma máquina com este rendimento significaria que toda a energia absorvida da fonte térmica através de calor seria convertida em outra modalidade de energia através do trabalho. Como o fluxo de energia através do calor se dá através de um processo irreversível, isso é impossível, pois sempre existirá energia dissipada no processo. Durante esta discussão podemos introduzir a segunda lei da Termodinâmica. Se utilizarmos a primeira lei para um processo cíclico, $\Delta U = 0$, obtemos o resultado $Q =$

W . Isso significa que toda energia absorvida pelo sistema através de calor pode ser convertida em outra modalidade através de trabalho, ou seja, a primeira lei não nos diz qual parcela da energia absorvida pela fonte quente será convertida em trabalho. A segunda lei se encarrega disso. O exemplo da máquina térmica é excelente para discutir a segunda lei porque é possível mostrar que Q_1 é sempre maior que W , uma vez que $Q_2 \neq 0$ e obtemos $Q_1 = Q_2 + W$. A segunda lei nos diz portanto que para convertermos calor em trabalho em um processo cíclico é necessário que haja uma compensação de energia para repor as perdas devido a Q_2 . Por causa dessas perdas que o rendimento do motor de um carro a gasolina é em torno de 23% apenas. A segunda lei pode também ser introduzida aos alunos através de seus enunciados, como descrito na próxima seção. Note que o motor térmico de elásticos nos fornece flexibilidade e uma infinidade de opções para introdução dos conceitos termodinâmicos.

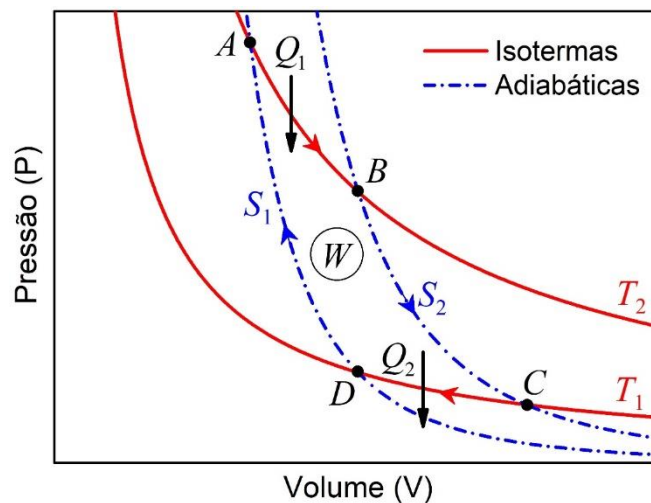
Se o professor quiser ir além e introduzir o conceito de entropia ele pode explorar o fluxo espontâneo de energia através de calor entre as fontes térmicas do motor de elásticos. A entropia é uma medida da irreversibilidade dos processos envolvidos no sistema, como o fluxo espontâneo de calor. Como esse processo é irreversível a energia dissipada jamais poderá ser recuperada para os propósitos iniciais, como provocar o movimento da roda de elásticos ou o movimento de um carro, por exemplo. Em sistemas em que os processos são irreversíveis a entropia sempre aumenta. Esta é conhecida como a lei de aumento da entropia. Portanto, a entropia mede a quantidade de energia térmica que foi dissipada pelo sistema e jamais poderá ser reaproveitada para a realização do trabalho executado na máquina térmica. Quando estacionamos o carro e colocamos a mão sobre o capô do mesmo observamos que o capô está quente. Toda a energia térmica absorvida pela carcaça do motor e do carro jamais poderá ser reutilizada para produzir o movimento do carro. A entropia mede justamente estas perdas.

A máquina térmica de Carnot é uma máquina ideal que apresenta rendimento máximo. O ciclo que representa sua operação é chamado de ciclo de Carnot, o qual é composto por duas transformações isotérmicas, em que as trocas de energia ocorrem à temperatura constante, e duas transformações adiabáticas, em que não há troca de energia através de calor. O ciclo de Carnot é apresentado na figura 3.23.

O conceito de entropia fica ainda mais evidente com o uso do ciclo de Carnot, que é proposto para contornar as perdas de energia através do processo irreversível do fluxo espontâneo de energia através de calor. Este processo ocorre entre dois sistemas quando

estes possuem temperaturas diferentes. Isso explica porque são utilizados processos isotérmicos em que as temperaturas dos sistemas se mantêm constantes. Mais energia pode ser economizada nos processos adiabáticos em que não há troca de energia através de calor. Nestes processos a entropia é constante. Dessa forma é possível estabelecer um ciclo através de quatro processos reversíveis, minimizando ao máximo as perdas de energia aumentando dessa forma o rendimento da máquina térmica.

Figura 3.23: Ciclo de Carnot – AB e CD: Isotermas com temperaturas constantes T_1 e T_2 . BC e DA: Adiabáticas com entropias constantes S_1 e S_2 .



Fonte: Elaborada pelo autor.

É possível mostrar que o rendimento máximo de uma máquina de Carnot depende somente das temperaturas da fonte fria e da fonte quente através da seguinte expressão:

$$\eta = 1 - \frac{T_2}{T_1} \quad (3.25)$$

Veja pela expressão acima que para a máquina ter 100% de rendimento a temperatura da fonte fria deve ser $T_2 = 0$ K, ou seja, zero absoluto. A impossibilidade de se atingir rendimento de 100% em uma máquina térmica, decorrente da segunda lei, conduz à impossibilidade de se atingir o zero absoluto. O professor pode explorar a eq.(3.25) para introduzir tal impossibilidade, usualmente referida como a terceira lei da Termodinâmica.

Diante de tantos tópicos que podem ser discutidos através das primeira e segunda leis da Termodinâmica o professor pode também explorar a impossibilidade de se

estabelecer um moto-perpétuo. Este tópico julgamos ser importante porque existe muita especulação sobre o alcance tecnológico que os moto-perpétuos podem ter.

Um moto-perpétuo é uma máquina cujo funcionamento é autossustentável, sem a necessidade de um agente externo, reutilizando de forma permanente e indefinida energia gerada pelo seu movimento. Leonardo da Vinci (1542-1519), já havia pressentido a impossibilidade do moto-perpétuo e mostrou isto em uma de suas obras sobre problemas mecânicos, analisando máquinas cujo funcionamento baseava-se na diferença de pesos em um dos lados de uma roda. Helmholtz (1821-1892) na sua formulação original do Princípio de Conservação de Energia (1847) afirma ser impossível, pela combinação de corpos naturais, a produção ilimitada de Força (palavra mais tarde substituída por Energia). Desde então com base na validade do Princípio Universal de Conservação de Energia qualquer tentativa de construção de máquinas deste tipo vem sendo negada, o que não impediu que ainda hoje existam pessoas que persistem na criação deste tipo de máquina (SOUSA, 1987).

Se considerarmos o processo cíclico em uma máquina térmica temos pela primeira lei que $Q = W$. Isso significa que trabalho não pode ser criado do nada, sempre é necessário uma fonte de energia, pois se $Q = 0$ tem-se $W = 0$. A primeira lei mostra a impossibilidade de construção de um moto-perpétuo de *primeira espécie*. Existe também o moto-perpétuo de *segunda espécie*, que é uma máquina que apresentaria um rendimento de 100%. Se fosse possível conceber tal máquina, ela violaria a segunda lei da Termodinâmica, como discutido anteriormente.

3.14. Segunda Lei da Termodinâmica

Se o professor preferir introduzir a segunda lei de maneira mais conceitual ele pode proceder da seguinte maneira. Como vimos na seção anterior, a possibilidade ou impossibilidade de se aproveitar energia é o objeto de estudo da segunda lei da termodinâmica. Para esta lei os livros didáticos trazem alguns enunciados que envolvem o rendimento das máquinas térmicas. No livro *Física para cientistas e engenheiros* de Paul A. Tipler (TIPLER, 1999) encontramos três enunciados para a segunda lei:

Enunciado de Kelvin:

É impossível remover energia térmica de um sistema a uma certa temperatura e converter a energia removida em trabalho mecânico sem modificar, de alguma outra maneira, o sistema ou as vizinhanças do sistema. (TIPLER, 1999, p. 558).

O que o enunciado de Kelvin nos mostra é que nós conseguimos, por exemplo, transformar integralmente o trabalho mecânico em energia térmica, porém, não conseguimos o caminho inverso, ou seja, não conseguimos transformar integralmente energia térmica em trabalho mecânico.

Enunciado de Clausius:

Não há nenhum processo cujo único efeito seja o da transferência de energia de um corpo frio para outro quente. (TIPLER, 1999, p. 559).

Com o enunciado acima Clausius diz que se tivermos dois sistemas com temperaturas diferentes e em contato térmico entre si, a energia térmica sempre fluirá naturalmente do sistema de maior temperatura para o sistema de menor temperatura e nunca ao contrário.

Enunciado de Kelvin-Planck:

É impossível que uma máquina térmica, operando em ciclo, tenha como único efeito a extração de calor de um reservatório e a execução de quantidade equivalente de trabalho. (TIPLER, 1999, p. 561).

Por fim o enunciado de Kelvin-Planck nos diz que é impossível converter integralmente energia térmica em trabalho mecânico. Vimos isso em nossa máquina em que a energia transferida por calor é dividida entre o trabalho dos elásticos e o aumento da energia interna dos mesmos.

Todos esses enunciados estão em pleno acordo com a discussão conduzida na seção anterior.

3.15. Terceira Lei da Termodinâmica

A terceira lei da termodinâmica foi proposta pelo físico-químico alemão Hermann Walther Nernst (1864 – 1941) em 1906, o que lhe rendeu, em 1920, o Prêmio Nobel de Química. De acordo com a teoria cinética, como a temperatura é proporcional à média das velocidades das partículas de um corpo, podemos supor que deve haver uma temperatura suficientemente baixa em que todas as partículas do corpo estejam em repouso absoluto. Essa temperatura seria o zero absoluto. Mas a mecânica quântica, teoria que surgiu na época da formulação de Nernst, não admite o repouso absoluto. De acordo com a mecânica quântica, todo átomo tem um estado fundamental de energia mínima, não nula, chamada energia de ponto zero. Sempre há um estado de agitação residual que pode ser calculado e medido experimentalmente. No entanto, esse estado de agitação deve ser de outra natureza, pois não permite a transferência de energia através do calor. (GASPAR, 2000, p. 368)

Nernst descobriu ainda que, à medida que a temperatura de uma substância diminui, torna-se cada vez mais difícil retirar energia da mesma através de calor. Como isso acontecia com todas as substâncias com as quais trabalhou, Nernst concluiu que essa era uma propriedade intrínseca da matéria, ou seja, o zero absoluto é o mesmo para todas as substâncias e, mais importante ainda, é o limite térmico da natureza, inatingível como a velocidade da luz. O enunciado da terceira lei da termodinâmica expressa essa limitação da natureza:

Não é possível, por nenhuma série finita de processos, atingir a temperatura zero kelvin.

Mostramos, portanto, que nossos experimentos podem auxiliar o professor de física como um complemento para introduzir e discutir as três leis da Termodinâmica e uma infinidade de outros tópicos da Física.

Esperamos que com este material o professor tenha incentivo para aprimorar suas aulas e fazer com que os alunos apreciem mais esta ciência maravilhosa chamada Física.

4. REFERÊNCIAS

GASPAR, A. Física: Ondas, Óptica, Termodinâmica. 1ed. São Paulo: Ática, 2000.

HALLIDAY D.; RESNICK R. e WALKER J. Fundamentos de Física: gravitação, ondas e termodinâmica. Vol. 2. 8ed. Rio de Janeiro: LTC, 2009.

NUSSENZVEIG, H. M. Curso de Física Básica: Fluidos, Oscilações e Ondas. Vol.2. 4ed. São Paulo: Edgard Blücher, 2002.

SERWAY R. A.; JEWETT J. W. JR. Princípios de Física: Oscilações, Ondas e Termodinâmica. Vol. 2. 5ed. São Paulo: Cengage Learning, 2014.

TIPLER, P.A. Física. Vol. 1 4.ed. Rio de Janeiro: LTC, 1999.

SIMÕES, S. G. Máquinas térmicas e propriedades termodinâmicas da borracha. “Disponível em:”https://www.ifi.unicamp.br/~lunazzi/F530_F590_F690_F809_F895/F809/F809_sem2_2006/SheilaG-Tamashiro_F809_RF2.pdf. Acesso em: 07 jan. 2019.

SOUSA, F. O. M. Evolução da idéia de conservação da energia: Um exemplo da história da ciência no ensino de Física. Dissertação de mestrado. Instituto de física/Faculdade de educação- USP- São Paulo, 1987.