

MNPEF
Mestrado Nacional
Profissional em
Ensino de Física

MNPEF Mestrado Nacional
Profissional em
Ensino de Física
Polo **ufscar** Sorocaba



UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS

CENTRO DE CIÊNCIAS E TECNOLOGIAS PARA A SUSTENTABILIDADE

DEPARTAMENTO DE FÍSICA, QUÍMICA E MATEMÁTICA

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

ANDRÉ LUIZ PEREIRA

ORIENTADOR: PROF. DR. JAMES ALVES DE SOUZA

Sorocaba - SP

Abril de 2019

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS
CENTRO DE CIÊNCIAS E TECNOLOGIAS PARA A SUSTENTABILIDADE
DEPARTAMENTO DE FÍSICA, QUÍMICA E MATEMÁTICA

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

ANDRÉ LUIZ PEREIRA

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação de Mestrado Profissional em Ensino de Física (PROFIS-So) da Universidade Federal de São Carlos, *campus* Sorocaba, no Curso de Mestrado Nacional Profissional em Ensino de Física (MNPEF), para obtenção do título de Mestre em Ensino de Física.

Área de concentração: Física no Ensino Médio.
Orientador: Prof. Dr. James Alves de Souza

Sorocaba - SP
Abril de 2019

ANDRÉ LUIZ PEREIRA

PRINCÍPIOS DA TERMODINÂMICA E MECÂNICA: MOTOR TÉRMICO DE ELÁSTICOS

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação de Mestrado Profissional em Ensino de Física (PROFIS-So) da Universidade Federal de São Carlos, *campus* Sorocaba, no Curso de Mestrado Nacional Profissional em Ensino de Física (MNPEF), para obtenção do título de Mestre em Ensino de Física.

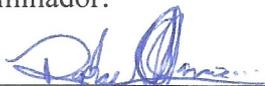
Área de concentração: Física no Ensino Médio.
Sorocaba 03 de abril de 2019.

Orientador:



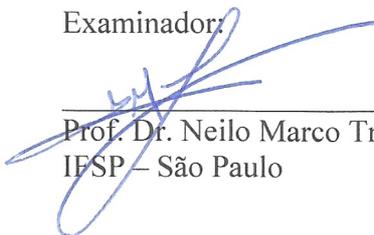
Prof. Dr. James Alves de Souza
UFSCar – Sorocaba

Examinador:



Prof. Dr. Raphael de Oliveira Garcia
UNIFESP – Osasco

Examinador:



Prof. Dr. Neilo Marco Trindade
IFSP – São Paulo

Sorocaba - SP
Abril de 2019

Luiz Pereira, André

PRINCÍPIOS DA TERMODINÂMICA E MECÂNICA: MOTOR
TÉRMICO DE ELÁSTICOS / André Luiz Pereira. -- 2019.
132 f. : 30 cm.

Dissertação (mestrado)-Universidade Federal de São Carlos, campus
Sorocaba, Sorocaba

Orientador: James Alves de Souza

Banca examinadora: Raphael de Oliveira Garcia, Neilo Marco Trindade

Bibliografia

1. Ensino de Física. 2. Termodinâmica. 3. Mecânica. I. Orientador. II.
Universidade Federal de São Carlos. III. Título.

Ficha catalográfica elaborada pelo Programa de Geração Automática da Secretaria Geral de Informática (SIn).

DADOS FORNECIDOS PELO(A) AUTOR(A)

Bibliotecário(a) Responsável: Maria Aparecida de Lourdes Mariano – CRB/8 6979

DEDICATÓRIA

Dedico esta dissertação a todos que de maneira direta ou indireta me ajudaram a chegar até aqui.

AGRADECIMENTO

Agradeço à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pelo fomento ao Mestrado Nacional Profissional em Ensino de Física (MNPEF) durante todo o período de formação.

Agradeço ao Prof. Dr. James Alves de Souza pela orientação, atenção e paciência nesses anos, sempre me incentivando e contribuindo para a minha formação e execução deste trabalho.

Agradeço aos meus pais José de Jesus Pereira e Elisa Maria Braga por me darem a vida e me educarem, fazendo com que eu me tornasse a pessoa que sou hoje.

Agradeço a minha noiva e companheira Aline Pereira do Nascimento que sempre esteve ao meu lado incentivando e não me deixando desistir nos momentos difíceis.

Por fim agradeço aos meus familiares e amigos que sempre me incentivaram e me apoiaram nesta caminhada.

“Os que se encantam com a prática sem a ciência são como os timoneiros que entram no navio sem timão nem bússola, nunca tendo certeza do seu destino”.

Leonardo da Vinci

RESUMO

PEREIRA, André Luiz. Princípios da Termodinâmica e Mecânica: Motor Térmico de Elásticos. 2019. Dissertação (Mestrado em Ensino de Física) – Universidade Federal de São Carlos, *campus* Sorocaba, Sorocaba, 2019.

Ensinar física nos dias atuais é um desafio para os professores. Usualmente o ensino de Física é alicerçado em métodos expositivos e aplicação de fórmulas, culminando geralmente em processos de memorização de conteúdos e resolução de exercícios voltados para o vestibular. Nesta perspectiva os alunos normalmente não veem muita utilidade em estudar física, piorando ainda mais a situação para o ensino e aprendizagem dessa disciplina. Uma metodologia muito estudada por pesquisadores na área de ensino de física é a experimentação. Apesar de chamar a atenção dos alunos, ela é pouco aplicada na sala de aula, seja por falta de tempo para testar os experimentos, ou espaço próprio, como laboratórios, para a realização das atividades. Motivados por uma turma com rendimento escolar muito abaixo da média, em uma escola particular de Campinas/SP, desenvolvemos neste trabalho um produto educacional que considera aulas teóricas e experimentos investigativos de forma complementar, com o objetivo de tornar as aulas de Física mais dinâmicas para melhorar a interação entre alunos e professores e tornar o aprendizado mais efetivo. Utilizando a metodologia voltada para a investigação o aluno ocupa uma posição mais ativa no processo de construção do conhecimento e o professor passa a ser mediador ou facilitador desse processo. Nossa proposta foi desenvolvida a partir da montagem de dois experimentos: o *pêndulo de elásticos*, o qual foi utilizado para mostrar a dilatação anômala da borracha, e o *motor térmico de elásticos*, utilizado como exemplo de máquina térmica. Com estes experimentos conseguimos trabalhar conteúdos de física que fazem parte do currículo do ensino médio como os conceitos de calor, dilatação térmica, as leis da termodinâmica, máquinas térmicas, torque e centro de massa. Com a aplicação da nossa proposta os alunos participaram de maneira ativa das aulas, questionando e criando hipóteses tendo o professor como mediador. Verificamos com isso que a metodologia utilizada pode ser bastante promissora para o aumento da motivação e rendimento dos alunos nas aulas de Física.

Palavras-chave: Ensino de Física. Experimentação. Investigação. Ensino Médio. Termodinâmica. Mecânica.

ABSTRACT

PEREIRA, André Luiz. Principles of Thermodynamics and Mechanics: The Rubber Bands Heat Engine. 2019. Master's Thesis (Master's degree in Physics Teaching) – Universidade Federal de São Carlos, *campus* Sorocaba, Sorocaba, 2019.

Teaching physics has always been a challenge for teachers. It is usually based on expository lessons and application of mathematical formulas, providing only a process of memorization of contents and resolution of exercises aimed to college admission exams. In this perspective the students usually do not see much use in studying Physics, by further worsening the scenario for lecturing and learning Physics. One of the most widely studied methodologies for Physics teaching is the experimentation. Although scientific experiments attract the attention of students, it is almost not applied in the classroom, either for lack of time to check the capabilities of the experiment or lack of proper space to perform the activities. Motivated by a group of students with below-average grades in a private high school in Campinas city, São Paulo state, we developed in this work an educational product in which we consider both theoretical classes and demonstrative experiments in a complementary way. Our mainly objective is to make Physics learning more effective by providing a better student-teacher interaction. Using the investigation as the procedure conducted in the experimentation the student can play an active role in the process of knowledge construction with the teacher as a mediator. Two experiments were set up for this purpose: a pendulum made of rubber band and a massive weight, which was used to show the anomalous dilatation of rubber, and the rubber band heat engine, cited by Richard Feynman in his lectures, to show how a heat engine works according to the laws of Thermodynamics and Mechanics. With these experiments we worked many concepts such as heat, thermal expansion, the laws of Thermodynamics, heat engines, torque, center of mass and many others. Our proposal was successfully applied. The students were motivated for attending the classes, questioning and creating hypotheses through the supervision of the teacher, showing that the methodology used is promising to improve students' motivation and performance in Physics classes.

Keywords: Physics Teaching. Experimentation. Investigation. High School. Thermodynamics. Mechanics.

LISTA DE FIGURAS

- Figura 2.1: Ilustração dos experimentos utilizados para abordagem de conceitos de termodinâmica e mecânica, mostrando em (A) o pêndulo de elásticos e em (B) o motor térmico de elásticos..... 3
- Figura 3.1: Energia térmica sendo transferida da lâmpada, fonte térmica, para o elástico através do calor..... 10
- 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..... 13
- Figura 3.3: Sistemas A e B separados por uma parede diatérmica evoluindo para o equilíbrio térmico, o qual ocorre quando $T_A = T_B$ 13
- Figura 3.4: Sistemas A e B isolados entre si e em contato térmico com o sistema C. 14
- Figura 3.5: Sistemas A e B em contato térmico e isolados do sistema C..... 14
- Figura 3.6: Eixo de referência adotado para definição do trabalho de uma força variável F_y , causada pela dilatação do elástico..... 15
- 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 16
- 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 $T_2 > T_1$ 17
- 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 $l > l_0$ 18
- Figura 3.10: Dilatação volumétrica do líquido, sendo $\theta > \theta_0$ 20
- Figura 3.11: Gráficos do volume e da densidade da água em função da temperatura. 21
- Figura 3.12: Monômeros C_5H_8 conectados por ligações σ entre carbonos, ao redor das quais podem ocorrer rotações. 22
- 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..... 22
- 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.....24

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}24

Figura 3.16: Representação de uma força F agindo em um ponto localizado a uma distância r de um eixo de rotação. O ângulo entre as direções dos vetores F e r é dado por θ e os vetores F_{\perp} e $F_{//}$ são as componentes perpendicular e paralela do vetor força F , respectivamente.27

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 $r \times F$, ou seja, com os dedos apontando primeiramente na direção de r girando sobre o segundo vetor F28

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.29

Figura 3.19: Roda do motor térmico de elásticos mostrando a localização de um elemento de massa em r com força peso dF para o cálculo do torque resultante da força gravitacional na roda em relação ao seu eixo de rotação, localizado em R . A diferença $r - R$ é o braço de alavanca referente ao elemento de massa considerado.....30

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 do plano da figura.31

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.33

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.34

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_236

Figura 4.1: Imagem animada utilizada para discutir o conceito de energia e suas transformações.	41
Figura 4.12: Imagem inicial da terceira aula que teve como objetivo a explicação do funcionamento mecânico do motor térmico de elásticos.	50
Figura 4.13: Imagem utilizada no início da etapa 4 onde foram trabalhados os conceitos de máquinas térmicas e as leis da termodinâmica.....	53

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

OCDE – *Organização para a Cooperação e Desenvolvimento Econômico*

PISA – *Programme for International Student Assessment*

PEF – *Movimento Harmônico Simples*

MEC – *Ministério da Educação*

USP – *Universidade de São Paulo*

EUA – *Estados Unidos da América*

PSSC – *Physical Science Study Committee*

MNPEF – *Mestrado Nacional Profissional em Ensino de Física*

PROFIS-So – *Programa de Mestrado Profissional em Ensino de Física da Universidade Federal de São Carlos, campus Sorocaba.*

SUMÁRIO

CAPÍTULO 1 - INTRODUÇÃO	1
1.1 UTILIZAÇÃO DE ATIVIDADES INVESTIGATIVAS	2
1.2 O ESTUDO DA TERMODINÂMICA	4
CAPÍTULO 2 - REVISÃO DA LITERATURA E JUSTIFICATIVA	1
2.1 UTILIZAÇÃO DE EXPERIMENTOS NO ENSINO DE FÍSICA.....	1
2.1.1 Breve história sobre o ensino de física com experimentos	3
2.2 JUSTIFICATIVA.....	5
2.2.1 Conteúdos e experimentos trabalhados	5
2.2.2 Demonstrações experimentais investigativas	5
CAPÍTULO 3 - FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA E PREPARAÇÃO DO PRODUTO EDUCACIONAL	8
3.1 CONTEÚDO DE FÍSICA QUE PODE SER ABORDADO COM OS EXPERIMENTOS	8
3.1.1 Calor	9
3.1.2 A Lei Zero da Termodinâmica e o Conceito de Temperatura	11
3.1.3 Trabalho de uma Força Variável	14
3.1.4 Dilatação Linear dos Sólidos	17
3.1.5 Dilatação Superficial dos Sólidos	18
3.1.6 Dilatação Volumétrica dos Sólidos	19
3.1.7 Dilatação Volumétrica dos Líquidos	19
3.1.8 Dilatação Anômala da Água	20
3.1.9 Dilatação Anômala da Borracha	21
3.1.10 Centro de Massa	23
3.1.11 Torque e Centro de Gravidade	26
3.1.12 Primeira Lei da Termodinâmica	32
3.1.13 Máquinas Térmicas	33
3.1.14 Segunda Lei da Termodinâmica	37
3.1.15 Terceira Lei da Termodinâmica	38

CAPÍTULO 4 - DESCRIÇÃO DA METODOLOGIA E APLICAÇÃO DO PRODUTO	40
4.1 ETAPA 1: CRIANDO UMA BASE – CONCEITOS IMPORTANTES	41
4.2 ETAPA 2: FENÔMENOS ANÔMALOS – EXPLICANDO O DIFERENTE.....	45
4.3 ETAPA 3: MOVIMENTO E EQUILÍBRIO – ENTENDENDO A MECÂNICA DO MOTOR TÉRMICO.....	50
4.4 ETAPA 4: MÁQUINAS TÉRMICAS E AS LEIS DA TERMODINÂMICA	52
4.5 FECHAMENTO DAS ATIVIDADES.....	56
CAPÍTULO 5 - CONCLUSÕES E CONSIDERAÇÕES FINAIS	58
REFERÊNCIAS	60
APÊNDICE – PRODUTO EDUCACIONAL	64
ANEXO – QUESTIONÁRIOS.....	110

Capítulo 1

INTRODUÇÃO

É muito comum ouvirmos que o ensino de Física usualmente se resume a aulas expositivas, teóricas, com demonstração de equações matemáticas e resolução de exercícios voltados aos vestibulares e que o recurso mais utilizado é a lousa e giz, seguido de projeções que reproduzem os próprios livros didáticos. Neste processo os alunos copiam o conteúdo, imitam o professor na resolução dos exercícios, decoram as fórmulas e são treinados mecanicamente para realizações de provas com exercícios parecidos com os que resolveram em sala.

Neste tipo de procedimento alguns alunos podem se tornar agentes completamente passivos, sendo indiferentes ao ensino e a aprendizagem, ao conteúdo trabalhado e a metodologia desenvolvida. Com isso não conseguem se envolver com as atividades desencadeando o desinteresse e apatia, não querem pensar, não fazem tarefas, chegam a dormir na sala durante as aulas (LISOWSKI, 2007).

Outro ponto importante, visto como um problema no ensino de física, é a matemática. Como a matemática e a física são indissociáveis, a necessidade do tratamento matemático em algumas situações contribui para agravar ainda mais a situação do ensino e aprendizagem de física. Segundo o PISA (Programa Internacional de Avaliação de Estudantes), a maior parte dos alunos brasileiros possuem uma defasagem muito grande com relação aos conteúdos matemáticos. Em 2015 o PISA mostrou que 70,3% dos alunos brasileiros estão abaixo do nível 2, patamar que a OCDE (Organização para Cooperação e Desenvolvimento Econômico) estabelece como necessário para que jovens possam exercer plenamente a cidadania (PISA, 2015, p.171).

Um recurso que pode ser explorado para ajudar professores e alunos no ensino e aprendizagem de física é a atividade experimental. Esta metodologia, segundo Araujo & Abibi

(2003), vem sendo estudada por muitos pesquisadores de ensino de física e tais pesquisadores apontam o experimento como um recurso promissor.

As atividades experimentais no ensino de física podem ser classificadas como *demonstrativas*, em que o aluno é apenas ouvinte e não participa da análise do fenômeno observado, sendo esta conduzida exclusivamente pelo professor, e *investigativas*, em que os alunos ocupam uma posição mais ativa no processo de construção do conhecimento com o professor sendo mediador ou facilitador desse processo (ARAÚJO, ABIB, 2003). Neste trabalho utilizamos experimentos demonstrativos para a discussão de fenômenos físicos utilizando a metodologia investigativa.

1.1 UTILIZAÇÃO DE ATIVIDADES INVESTIGATIVAS

Na atividade investigativa o aluno não deve dispor de procedimentos automáticos para chegar a uma solução mais ou menos imediata; a solução, na realidade, deve requerer do aluno um processo de reflexão e tomada de decisões sobre a sequência dos passos a seguir (GIL-PEREZ, 2005). O método investigativo tem se revelado eficaz no desenvolvimento de aspectos fundamentais para a educação científica, tais como a possibilidade de fornecer aos alunos oportunidades para o desenvolvimento de habilidades de observação, formulação, teste, discussão, dentre outros (OLIVEIRA, 2010).

No ambiente escolar as aulas são divididas em áreas do conhecimento como ciências da natureza, ciências humanas ou códigos e linguagens. Os professores estão sempre buscando metodologias de ensino mais eficientes para tentar atrair a atenção dos alunos para os conteúdos ensinados nas aulas. Investigação e Compreensão são competências básicas sugeridas nos Parâmetros Curriculares Nacionais (PCN) para que se desenvolvam nos estudantes a aquisição de habilidades para construir e investigar situações-problema, utilizar modelos físicos, avaliar, prever e analisar previsões (BRASIL, 1999).

O Ensino por Investigação é diferente da investigação científica. Na visão de Miranda (2015), investigação científica se refere às diversas maneiras pelas quais os cientistas estudam o mundo natural e propõem explicações baseadas em evidências derivadas de seus trabalhos. O Ensino por Investigação, termo usado para se referir a abordagens pedagógicas, não tem como meta revelar futuros cientistas, mas sim criar a cultura da investigação, que ao realizar

ações que se aproximam do fazer científico, permitam ao aluno criar soluções para os problemas apresentados (MIRANDA *et al*, 2015).

Para Carvalho, o Ensino por Investigação precisa ocorrer em um ambiente investigativo de tal forma que o professor possa ensinar, conduzir e mediar os alunos no processo da investigação e que possam gradativamente ir ampliando sua cultura científica, adquirindo, aula a aula, a linguagem científica e construindo o novo conhecimento (CARVALHO, 2016).

O Ensino por Investigação baseia-se em propor que o aluno não seja um agente passivo do processo de ensino-aprendizagem e sim o agente ativo desse processo, buscando desenvolver habilidades cognitivas e o desenvolvimento da capacidade de argumentação, comunicação e elaboração de estratégias para solucionar problemas. Este, quando bem planejado, objetiva melhorar as ideias prévias dos alunos com o aporte científico apresentado nas aulas de física ao ponto que o discente possa realizar deduções, relações e interpretações sobre o tema trabalhado (CARVALHO; SASSERON, 2015).

Ao trabalharmos na perspectiva investigativa, é necessário abandonar a noção de que o professor é o detentor do saber. Este deve estabelecer uma relação de mediador no processo ensino-aprendizagem. Cabe aos professores a tarefa de mediar o aprendizado científico, instigar a participação dos alunos a partir de uma postura ativa de modo a contribuir para a construção do próprio aprendizado. Nas atividades colaborativas os estudantes formulam e testam as hipóteses levantadas para a solução do problema e discutem seus resultados (COELHO; SOUZA, 2013).

Esse tipo de metodologia pode potencializar o aprendizado porque leva o aluno a pensar, debater, justificar suas ideias e aplicar seus conhecimentos em situações novas. Segundo Azevedo (2004) e Carvalho (2009), outras dimensões de aprendizagens aparecem no processo de ensino por investigação. Além da *aprendizagem conceitual*, que são aquelas que envolvem os principais modelos e teorias da ciência, aparecem ainda, a *aprendizagem procedimental* que envolve o conhecimento e o desenvolvimento de habilidades da prática como medir, calcular, construir dispositivos, questionar, e a *aprendizagem atitudinal*, que envolve o desenvolvimento de posturas em relação ao conhecimento científico e a sala de aula como a motivação para o estudo da ciência, a comunicação científica, o diálogo, o respeito à fala do colega, entre outros.

O papel do professor neste tipo de atividade é de auxiliar os alunos na busca das explicações causais, negociar estratégias para busca das soluções para o problema, questionar as ideias dos alunos, incentivar a criatividade epistêmica em todas as etapas da atividade, ou seja, ser um mediador entre o grupo e a tarefa, intervindo nos momentos em que há indecisão, falta de clareza ou consenso. Apesar de demandar mais tempo e exigir mais atenção e auxílio

do professor, essa forma de organização da atividade experimental captura a atenção dos alunos e melhora seu envolvimento com a mesma (BORGES, 2002).

No nosso trabalho conduzimos as aulas de física utilizando experimentos. Com este procedimento foi possível criar um ambiente de investigação onde os alunos, a partir da observação dos experimentos, foram colocados para refletir sobre os fenômenos físicos observados com o objetivo de criar hipóteses.

1.2 O ESTUDO DA TERMODINÂMICA

Geralmente no estudo da termodinâmica é creditado às transformações de energia e a conversão entre calor e trabalho, o que de certa forma revolucionou o meio de produção humano. Historicamente, o homem sempre buscou recursos para a realização de trabalho, seja através do próprio esforço muscular, do esforço animal, de ferramentas, de máquinas simples e da energia dos ventos e da água (GASPAR, 2000). A partir do final do século XVII, com a criação de máquinas térmicas e a evolução do conceito de calor, o homem se torna capaz de controlar os processos que envolvem a transformação da energia térmica em outras modalidades.

No século XVIII ocorre a primeira revolução industrial que muda radicalmente a história da humanidade. A termodinâmica como ciência começa a surgir a partir do trabalho de Nicolas Léonard Sadi Carnot (1796 – 1832), sobre a melhoria da eficiência de máquinas térmicas, e da lei de conservação e transformação de energia, estabelecida a partir de uma série de trabalhos, entre 1842 e 1850, de pesquisadores como Mayer, Joule, Helmholtz e outros que culminaram na descoberta do equivalente mecânico do calor e trabalho. Como um sistema científico formal, a partir do trabalho de Carnot e da lei de conservação de energia, a termodinâmica aparece pela primeira vez nos anos 50 do século XIX nos trabalhos de Rudolf Clausius (1822 – 1888) e William Thomson, Lord Kelvin (1824 – 1907), nos quais as formulações modernas da segunda lei são fornecidas e conceitos importantes, como entropia e temperatura absoluta, são introduzidos (BAZAROV, 1969, p.xii).

O ensino das leis da termodinâmica e conseqüentemente das máquinas térmicas normalmente está associado à história da ciência, pois traz fatos históricos da revolução industrial e a evolução, por exemplo, do conceito de calor e das máquinas térmicas até

chegarmos nos motores à combustão e refrigeradores, que são equipamentos muito utilizados e úteis atualmente.

Neste trabalho elaboramos um produto educacional que consiste em um guia para a construção dos experimentos utilizados em nossa proposta, o pêndulo de elásticos e o motor térmico de elásticos, e sugerimos uma sequência didática voltada para o tratamento de alguns tópicos da termodinâmica e da mecânica, que são assuntos comuns no currículo de física do ensino médio.

Nosso principal objetivo foi tentar melhorar a interação entre o professor e os alunos, motivando os alunos a se interessarem mais pelas aulas de física e com isso terem uma predisposição para aprender de maneira significativa alguns conteúdos de física trabalhados.

Nos próximos capítulos descreveremos uma breve revisão da literatura, nossa justificativa para o trabalho, assim como os conteúdos de física trabalhados com os experimentos. Por fim, descrevemos os detalhes da aplicação do nosso produto e as observações e resultados obtidos. No anexo estão os questionários utilizados na aplicação do produto e no apêndice encontra-se o produto educacional e a sugestão de sequência didática descritos detalhadamente em uma linguagem acessível para qualquer professor do ensino médio poder utilizar em suas aulas.

Capítulo 2

REVISÃO DA LITERATURA E JUSTIFICATIVA

“O princípio da ciência, quase sua definição, é a seguinte: O teste de todo o conhecimento é o experimento. O experimento é o único juiz da “verdade” científica. Mas qual é a origem do conhecimento? De onde vêm as leis que serão testadas? Experimento, por si só, ajuda a produzir essas leis, no sentido de que nos dão dicas. Mas também é preciso imaginação para criar dessas dicas as grandes generalizações – para adivinhar os padrões belos e simples, mas muito estranhos, que estão por baixo delas e depois experimentar para checar novamente se fizemos as suposições corretas.”

Feynman¹

2.1 UTILIZAÇÃO DE EXPERIMENTOS NO ENSINO DE FÍSICA

Difícilmente encontramos um professor, educador ou pesquisador na área de ensino de física que não concorde que a realização de experimentos nas aulas de física seja importante para a aprendizagem e motivação dos alunos. Araujo & Abibi (2003) apontam que o uso de atividades experimentais, como estratégia de ensino, na disciplina de física tem sido considerado por muitos professores como uma das melhores maneiras para diminuir as dificuldades no ensino e aprendizagem de modo significativo e consistente (ARAÚJO, ABIB, 2003).

Laburú defende que a atividade experimental motiva os alunos a aprender, mas isso irá depender de como o professor propõe a atividade experimental.

¹ FEYNMAN, R. P.; LEIGHTON, R. B.; SANDS, M. “*Lições de Física de Feynman:*” Vol.1. Edição definitiva. Porto Alegre: Bookman, 2008.

À vista disso, poderíamos questionar se o problema da motivação encontra-se no aluno que não demonstra interesse e ou no professor que não utiliza estratégias eficientes para provocar a motivação. Certamente que uma parte importante da resposta para essa questão está situada numa certa dependência entre estratégias eficientes e a capacidade das mesmas em potencializar a motivação de grande parte dos alunos. (LABURÚ, 2006, p. 384)

Portanto, uma estratégia que pode motivar de maneira eficiente, deixando os alunos ativos e participativos em sala é o uso de experimentos. Dentro dos tipos de experimentos que podemos levar para a sala de aula, existe o experimento de demonstração investigativo. De acordo com Azevedo (2004), utilizar atividades investigativas como ponto de partida para desenvolver a compreensão de conceitos é uma forma de levar o aluno a participar de seu processo de aprendizagem, sair de uma postura passiva e começar a perceber e agir sobre o seu objeto de estudo, relacionando o objeto com acontecimentos e buscando as causas dessa relação, procurando, portanto, uma explicação causal para o resultado de suas ações e/ou interações (AZEVEDO, 2004).

Devido ao enfoque dado aos vestibulares o pouco uso de experimentos e a exploração de atividades experimentais em sala de aula torna-se comum. Este fato é justificado de várias maneiras, como o tempo curto que os professores têm para cumprir o programa previsto no planejamento das aulas, a falta de materiais, equipamentos adequados e locais apropriados para a realização dos experimentos (GASPAR, 2014).

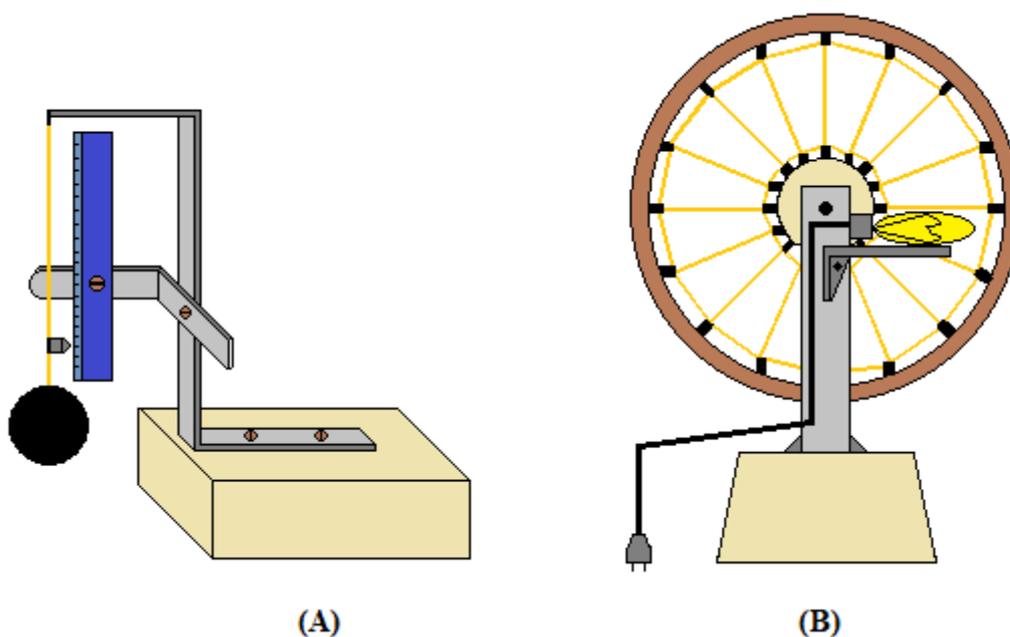
Todos esses fatores nos motivaram a desenvolver um produto educacional que seja utilizado como um guia para o professor para que o mesmo tenha condições de construir os dois experimentos propostos para serem utilizados em sala de aula concomitantemente com as aulas teóricas. O objetivo é que os alunos possam visualizar os fenômenos considerados e interagir mais com o professor para que condições mais propícias para o aprendizado possam ser estabelecidas.

Nosso primeiro experimento foi nomeado de *pêndulo de elásticos* e o segundo é usualmente conhecido como *motor térmico de elásticos*. Uma ilustração dos dois experimentos é apresentada na figura 2.1(A) e 2.1(B), respectivamente. O pêndulo de elásticos foi construído para demonstrar a dilatação anômala da borracha e o motor térmico de elásticos é geralmente utilizado para demonstrar o funcionamento de uma máquina térmica através da dilatação térmica de vários elásticos que compõem as raias de uma roda.

O princípio de funcionamento dos dois experimentos decorre da dilatação anômala da borracha. Quando incidimos luz nos elásticos a partir de uma lâmpada incandescente, energia térmica é transferida aos mesmos através de calor. Com isso a borracha sofre uma dilatação

térmica contraindo-se e trabalho é realizado em uma massa suspensa pelo elástico, fazendo com que a mesma suba. O deslocamento da massa é evidenciado por um cursor posicionado sobre uma régua. No motor térmico de elásticos a lâmpada incandescente fornecerá energia térmica aos elásticos apenas em um lado da roda. A contração dos elásticos aquecidos faz com que o centro de massa da roda seja deslocado de tal forma que o mesmo não coincida mais com o eixo de rotação da roda. Consequentemente, a força peso da roda provoca um torque fazendo a mesma girar, da mesma forma quando penduramos um quadro na parede cujo apoio não passa pela linha que contém o seu centro de massa. Os fenômenos físicos que podem ser abordados com estes experimentos serão descritos no Capítulo 3 desta dissertação e todos os detalhes sobre a construção dos experimentos são fornecidos no Apêndice.

Figura 2.1: Ilustração dos experimentos utilizados para abordagem de conceitos de termodinâmica e mecânica, mostrando em (A) o pêndulo de elásticos e em (B) o motor térmico de elásticos.



Fonte: Elaborada pelo autor.

2.1.1 Breve história sobre o ensino de física com experimentos

No início do século XIX até pelo menos o final dos anos 1950 experimentos de demonstração eram utilizados em todo o mundo. Os equipamentos de demonstração eram operados pelo professor, que na maioria das vezes levavam os aparelhos para a sala de aula.

Por isso, nesta época, quase não existiam laboratórios de Física. Os equipamentos eram construídos artesanalmente com dimensões suficientemente grandes para serem vistos a distância, tornando assim tais equipamentos muito caros. Com isso poucas escolas tinham condições de dispor de um acervo significativo de experimentos (GASPAR, 2014).

As escolas da época, que dispunham de equipamentos experimentais, praticavam a apresentação dos experimentos pelo professor. Estas apresentações continham três características básicas: o professor detinha a autoridade do saber – *magister dixit* (o mestre disse); o aluno se mantinha em atitude passiva, dele se exigia exclusiva e/ou preferencialmente a memorização e a reprodução das palavras do professor ou do livro didático; e privilegiava-se o cumprimento do currículo, que obedecia a uma sequência de conteúdos consagrada pelos próprios livros didáticos ou imposta a eles e às escolas por regulamentações oficiais (GASPAR, 2014, p.14).

Em 1956, nos EUA, foi formada uma comissão por físicos renomados chamada de Comitê de Estudos de Física (*Physical Science Study Committee – PSSC*), para reformular o ensino de Física do país. Após quatro anos de trabalho, essa comissão publicou livros textos, filmes, aparelhos simples de laboratório e um guia de laboratório, primeiramente nos EUA e, mais tarde, em inúmeros países, incluindo o Brasil. O curso foi separado da seguinte forma: Parte I – Introdução geral às noções de física fundamental, amplo quadro do universo (livros textos); Parte II – O estudo da luz (filmes e laboratório); Parte III – Estudo detalhado do movimento (aparelho simples de laboratório) e Parte IV – Eletricidade. Além dos livros a proposta incluía um guia de laboratório e um conjunto de aparatos experimentais modernos e baratos. Em síntese, o plano do PSSC estava centrado em uma nova proposta curricular de física e no entendimento de que o aluno só poderia aprender ciência por si a partir da atividade experimental, como descrito no prefácio do guia de laboratório inserido no texto básico: “*As ideias, os conceitos e as definições só têm, na verdade, um sentido efetivo quando baseados em experiências*” (GASPAR, 2014, p.21).

No Brasil, nessa mesma época foi criado o projeto de ensino de física (PEF), iniciativa do instituto de física da USP em convênio com duas instituições ligadas ao Ministério da Educação e Cultura (MEC): Fundação Nacional de Material Escolar (Fename) e Programa de Expansão e Melhoria do Ensino (Prenome). O PEF era composto de um texto básico em quatro fascículos (mecânica 1, mecânica 2, eletricidade e eletromagnetismo). Junto aos fascículos existia um material experimental e um guia para o professor. O PEF contou com uma equipe de cientistas, os quais eram pesquisadores de física nuclear, e com professores com larga experiência no ensino médio e universitário, além de programadores visuais e jornalistas.

Atualmente, experimentos são utilizados como materiais alternativos para o ensino de ciências e constituem uma das mais importantes ferramentas no ensino de física. Os experimentos vão desde atividades de laboratório tradicionais, nas quais os alunos são treinados no uso de precisos instrumentos de medição e na realização de experimentos controlados e monitorados por instrumentos de laboratório, até àquelas desenvolvidas com aparatos experimentais mais simples, por meio dos quais se busca uma discussão conceitual (SANTOS *et al*, 2009).

Nossa proposta é trabalhar com experimentos demonstrativos utilizando uma metodologia investigativa, como exposto a seguir.

2.2 JUSTIFICATIVA

2.2.1 Conteúdos e experimentos trabalhados

O interesse por trabalharmos com termodinâmica surgiu porque era o conteúdo a ser trabalhado com a turma no semestre em que nossa proposta foi aplicada. O motor térmico de elásticos foi escolhido pois é possível discutir uma variedade de assuntos em termodinâmica como as leis da termodinâmica e o funcionamento de uma máquina térmica. Adicionalmente foi possível discutir o comportamento anômalo de materiais quando aquecidos, como no caso da borracha. Além dos conteúdos de termodinâmica, alguns assuntos sobre mecânica clássica difíceis de serem assimilados pelos alunos, como o torque de uma força, foram abordados para explicar o giro da roda do motor térmico de elásticos.

2.2.2 Demonstrações experimentais investigativas

Os Parâmetros Curriculares Nacionais (PCN) (BRASIL, 1997), apontam o ensino por investigação como sugestão de metodologia em sala de aula. Diferente de reproduzir procedimentos, a investigação possibilita novos questionamentos e interpretação de dados, proporcionando uma atitude ativa no processo ensino aprendizagem. Wilmo *et al* (2008) entendem que a experimentação investigativa circunda na discussão que é feita anterior ao

conceito, ou seja, é a busca de informações que podem promover uma discussão/reflexão mais ampla e abrangente da visão de mundo por intermédio da ciência.

Os trabalhos de pesquisa em ensino mostram que os estudantes aprendem mais sobre a ciência e desenvolvem melhor seus conhecimentos conceituais quando participam de investigação científica, semelhantes às feitas nos laboratórios de pesquisa (HODSON, 1992).

O uso de experimentação baseada na investigação se baseia na resolução de problemas, pois desta forma recorre-se à investigação onde a ação do aluno não deve se limitar apenas ao trabalho de manipular ou observar o experimento. O aluno deve refletir, discutir, explicar e relatar o que foi observado, deixando de ser passivo e tendo uma participação mais ativa e motivada em sala de aula. Isso dará ao trabalho do aluno as características de uma investigação científica (AZEVEDO, 2004).

Temos então, neste tipo de metodologia, que a investigação deve ser fundamentada em resolver um problema, onde o aluno saiba porque a investigação está sendo conduzida. O professor, neste caso, deve apresentar ao aluno o problema como ponto de partida, que será fundamental para a criação de um novo conhecimento. Bachelard (1996) assinala que “todo conhecimento é resposta a uma questão”.

Nossos experimentos trazem questões que dão início a discussões e investigação. O pêndulo de elásticos, por exemplo, traz a questão do porquê o elástico, ao ser aquecido, apresenta uma dilatação anômala, ou seja, sofre contração e não expansão como a maioria dos materiais. Já o motor térmico de elásticos traz a questão do porquê a roda gira quando luz é incidida em um dos lados da mesma, além é claro de fornecer uma aplicação para o comportamento anômalo dos elásticos observado no pêndulo. Estas perguntas levam o aluno a criar hipóteses para que o fenômeno observado seja explicado. Com isso, o professor, com explicações teóricas de alguns fenômenos, faz a mediação para que os alunos consigam chegar a uma resposta científica satisfatória para o problema.

Para Lewin e Lomascólo a situação de formular hipóteses, preparar e realizar experiências, colher dados e analisar resultados favorece fortemente a motivação dos estudantes, fazendo-os adquirir atitudes tais como curiosidade, desejo de experimentar, acostumar-se a duvidar de certas afirmações, a confrontar resultados, a obterem profundas mudanças conceituais, metodológicas e atitudinais (LEWIN & LOMASCÓLO, 1998).

Azevedo (2004) salienta que os experimentos de demonstração investigativa, ligadas à solução de problemas e à argumentação, podem trazer para o ensino de Física as seguintes contribuições:

- percepção de concepções espontâneas por meio da participação do aluno nas diversas etapas da resolução de problemas;
- valorização de um ensino por investigação;
- aproximação de uma atividade de investigação científica;
- maior participação e interação do aluno em sala de aula;
- valorização da interação do aluno com o objeto de estudo;
- valorização da aprendizagem de atitudes e não apenas de conteúdos;
- possibilidade de criação de conflitos cognitivos em sala de aula.

Portanto, justificamos nosso trabalho pelo exposto acima onde mostramos que o uso de experimentos com um viés investigativo pode ser um bom recurso para as aulas de física, pois a partir desta metodologia temos a possibilidade de mudar a dinâmica das aulas, deixando os alunos mais motivados e ativos na construção do conhecimento.

Capítulo 3

FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA E PREPARAÇÃO DO PRODUTO EDUCACIONAL

Nossa proposta é baseada em experimentos de demonstração investigativos concomitante às aulas teóricas. Nas próximas seções apresentamos uma sugestão de tópicos de física que podem ser explorados com os experimentos. Estes foram discutidos na aplicação do produto educacional, porém, o professor que for utilizar este material pode considerar outra forma de abordagem e até mesmo outros tópicos conforme a realidade de sua sala de aula.

Após a apresentação do conteúdo de física explorado apresentamos o que está sendo feito por pesquisadores da área de ensino de física no que concerne a utilização de experimentos com caráter investigativo.

3.1 CONTEÚDO DE FÍSICA QUE PODE SER ABORDADO 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. Tais assuntos são tratados da seção 3.2.1 à seção 3.2.4.

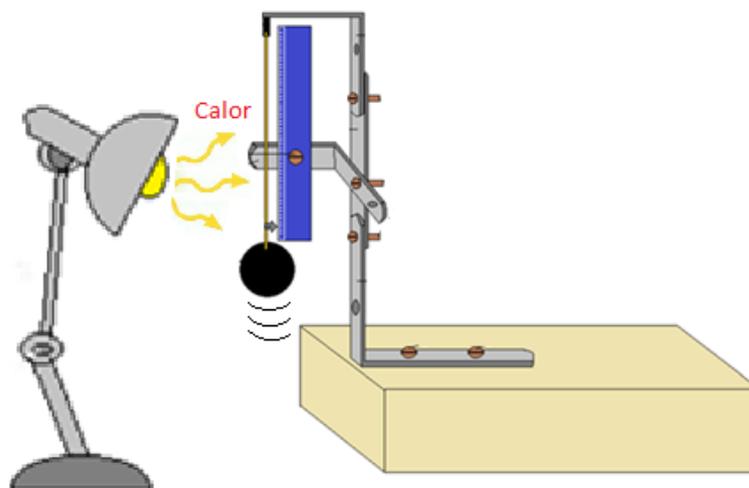
Para o motor térmico de elásticos, que foi o segundo experimento demonstrado em sala, além dos assuntos voltados à termodinâmica como máquinas térmicas e as leis da termodinâmica, é possível tratar alguns tópicos de mecânica, como centro de massa, torque e equilíbrio, pois são importantes para o entendimento do funcionamento do motor. Tais assuntos são trabalhados da seção 3.2.5 à seção 3.2.11.

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 de que o professor de física precisa saber bem a física por trás dos fenômenos que estão sendo estudados. Em algumas situações 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.

3.1.1 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.

3.1.2 A 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.

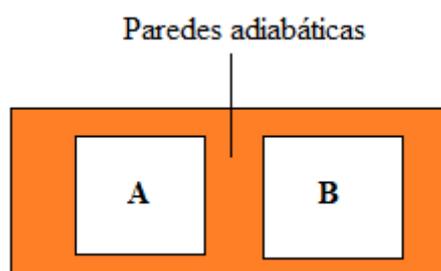
O conceito de temperatura está associado a uma propriedade comum de sistemas em equilíbrio térmico. Sensações subjetivas de temperatura, como o tato, não são confiáveis. Em um dia frio se pisarmos no chão com piso de cerâmica e depois em um piso de madeira, teremos a sensação de que o piso de cerâmica 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.

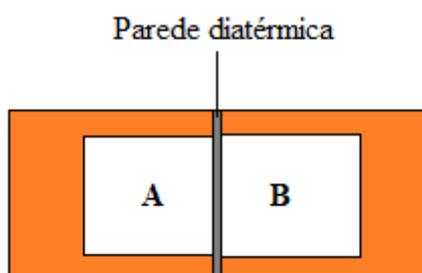
Se substituirmos as paredes que separam os dois sistemas por uma parede diatérmica, como ilustrado na figura 3.3, os sistemas A e B estarão em contato térmico. Com isso os sistemas irão evoluir para um outro estado de equilíbrio dado por $A+B$, que será diferente dos estados iniciais A e B se considerarmos 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.



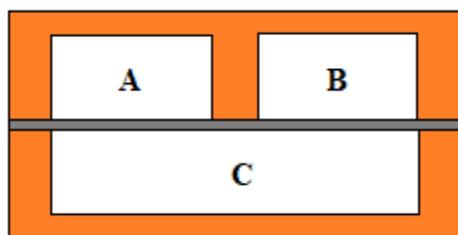
Fonte: Elaborada pelo autor.

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



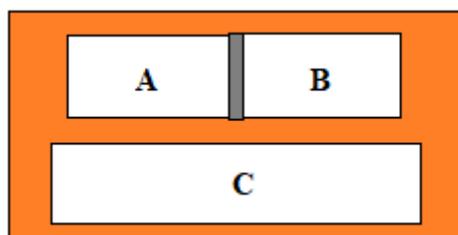
Fonte: Elaborada pelo autor.

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.

3.1.3 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

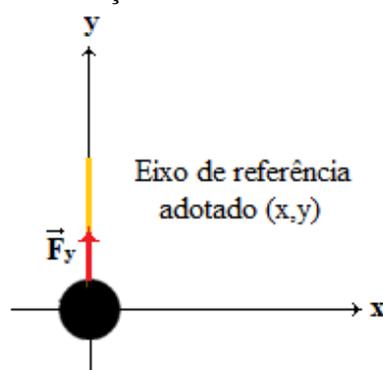
trabalho, assim como o calor, é um método de transmissão de energia, mas neste caso a transmissão de energia se dá através de uma força, causada pela dilatação dos elásticos.

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,

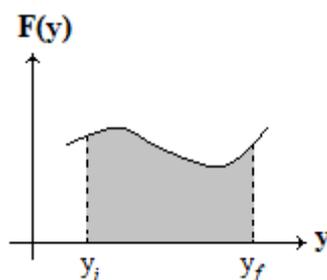
$$W_{y_i \rightarrow y_f} = \lim_{\Delta y_k \rightarrow 0} \sum_k F(y_k) \Delta y_k, \quad (3.3)$$

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.

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 .

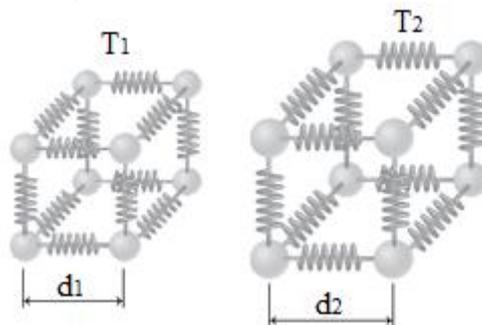


Fonte: Elaborada pelo autor.

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.

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)

3.1.4 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,

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

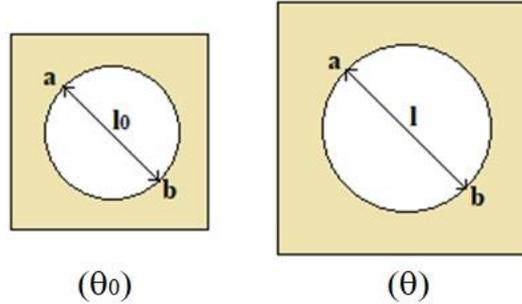
Note que nós mudamos a notação para o parâmetro temperatura de T para θ , pois T é usualmente utilizado para temperatura absoluta, escala Kelvin, enquanto que θ se refere à temperatura empírica do sistema, escala Celsius, por exemplo. A temperatura empírica está relacionada com a substância termométrica 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.

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,

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

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.

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.

3.1.5 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.

3.1.6 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 $V_0 = A_0 l_0$. 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 $\alpha\Delta\theta \ll 1$.

3.1.7 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.

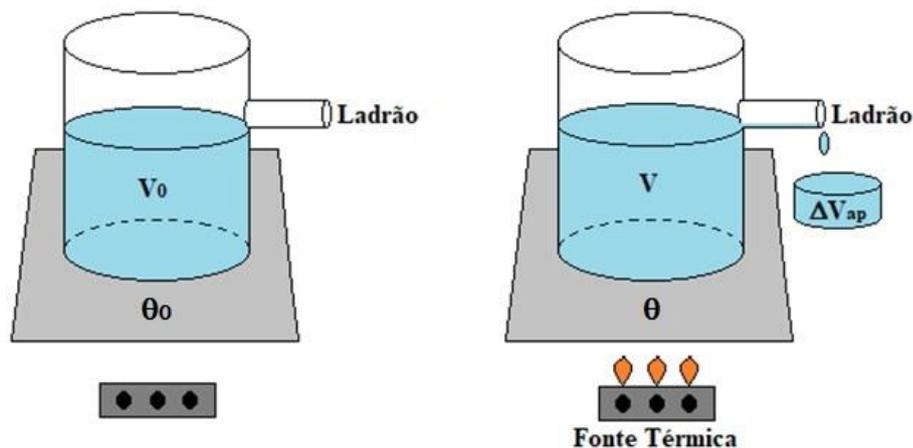
Normalmente a dilatação volumétrica dos líquidos é maior que a dilatação volumétrica dos sólidos, ou seja, o coeficiente de dilatação volumétrica do líquido é maior que o coeficiente de dilatação do sólido.

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

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

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

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

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

Fonte: Elaborada pelo autor.

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

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

Logo,

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

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

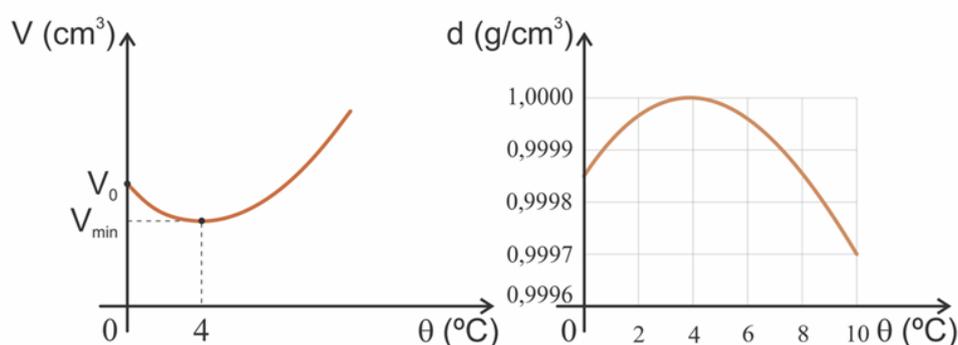
3.1.8 Dilatação Anômala da Água

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 próxima 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.

3.1.9 Dilatação Anômala da Borracha

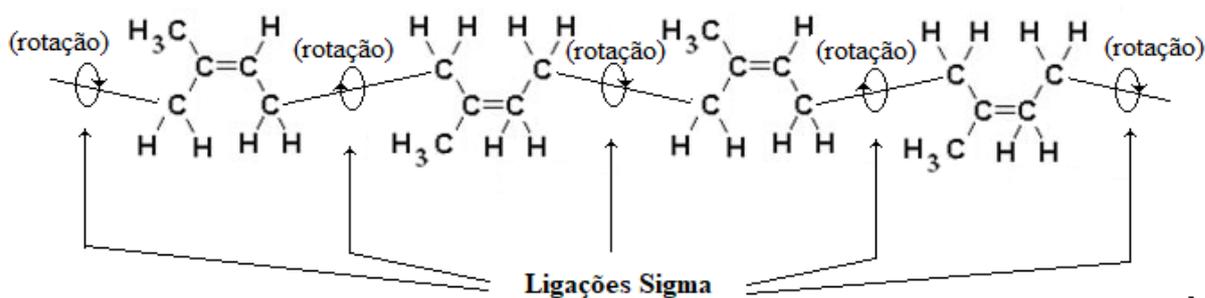
A anomalia discutida na seção anterior não é exclusividade de líquidos. Esta pode acontecer também em um material sólido, como a borracha que constitui os elásticos dos nossos experimentos.

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 anômalo 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).

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

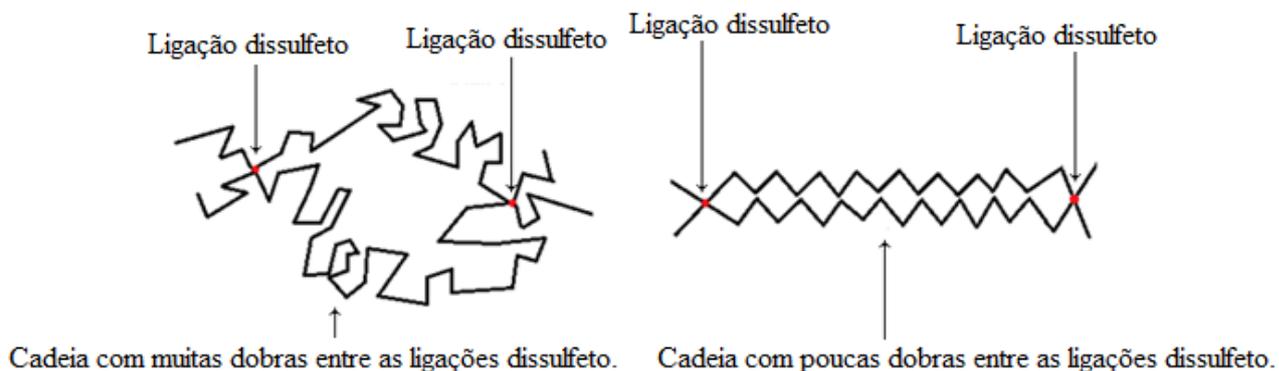
manter a sua forma alinhada. No caso do pêndulo de elásticos a tensão é mantida nos elásticos pela massa pendurada nos mesmos fazendo com que as dobras das cadeias de monômeros fiquem mais alinhadas. Quando os elásticos são aquecidos pela energia térmica proveniente da lâmpada, os seus átomos vibram 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.

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



Fonte: Elaborada pelo autor.

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.

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.

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

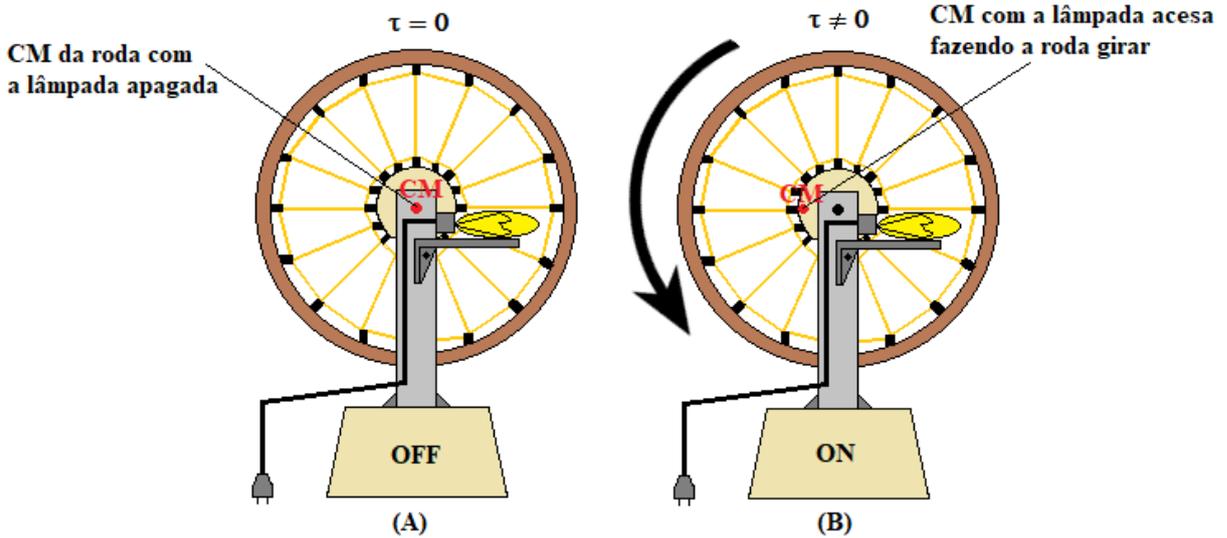
3.1.10 Centro de Massa

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 conseqüentemente 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.

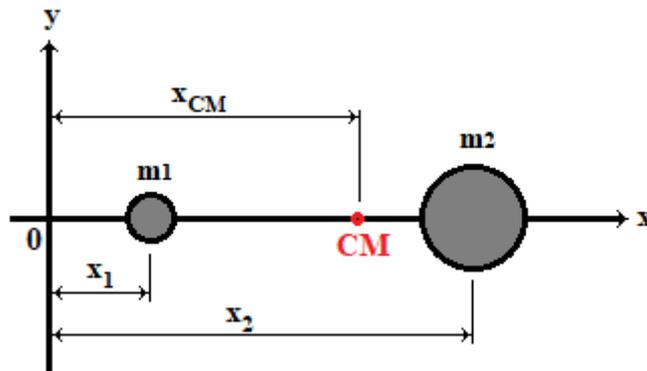
O centro de massa de um sistema de partículas é o ponto que se move como se toda massa do sistema estivesse concentrada nesse ponto (HALLIDAY; RESNICK e WALKER; 2009, p.207). A figura 3.15 ilustra um sistema de duas partículas com suas respectivas coordenadas. Note que se $m_2 > m_1$ o CM do sistema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

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.

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

$$x_{CM} = \frac{m_1 x_1 + m_2 x_2}{m_1 + m_2} \quad (3.11)$$

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,

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

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.

3.1.11 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.

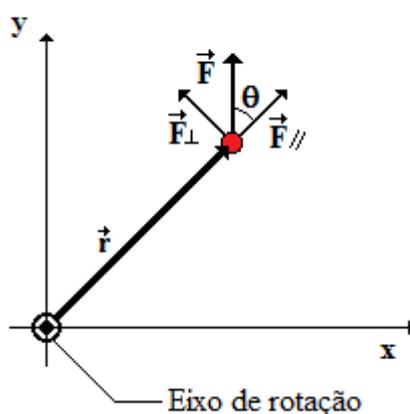
Para entendermos melhor a ação dessa força no movimento da roda vamos definir o que é o centro de gravidade (CG) da roda. O CG é o ponto em que a força da gravidade age em um objeto ou corpo. Usualmente nós consideramos que o campo gravitacional da Terra é uniforme. Nestas condições, como a força gravitacional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

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

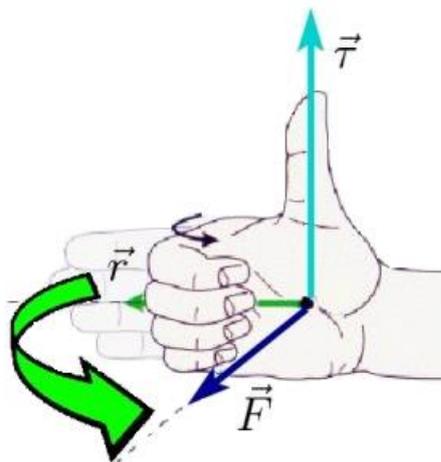
Usualmente a distância entre o ponto de aplicação da força e o eixo de rotação do sistema é chamado de braço de alavanca. Se a direção do vetor força fizer um ângulo θ com a direção do vetor posição, podemos escrever a eq.(19) como,

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

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} .

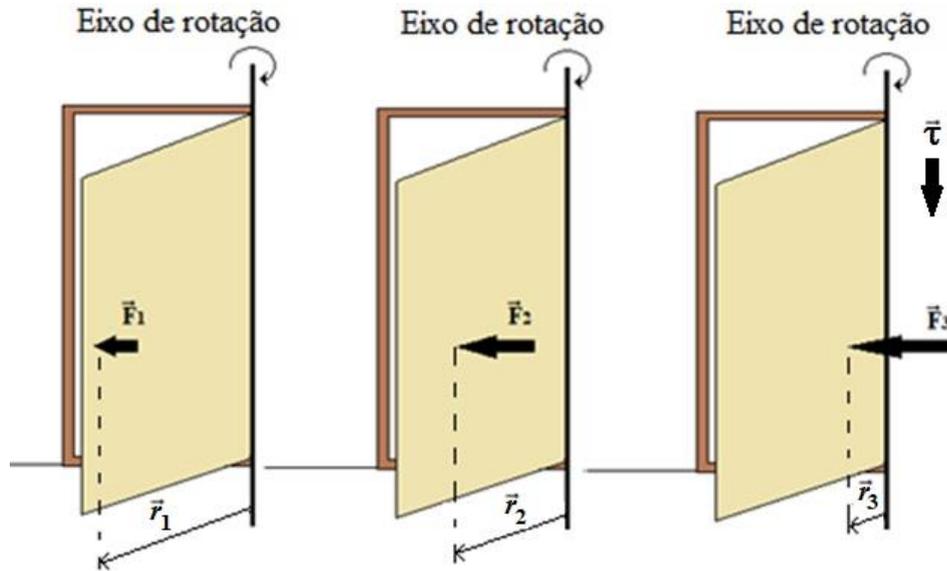


Fonte: OLIVEIRA, I. Cinemática e dinâmica de rotações. “Disponível em:”
<http://propg.ufabc.edu.br/mnpef-sites/leis-de-conservacao/cinematica-e-dinamica-de-rotacoes/>.
 Acesso em: 07 jan. 2019.

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 O 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.

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.

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.

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,

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

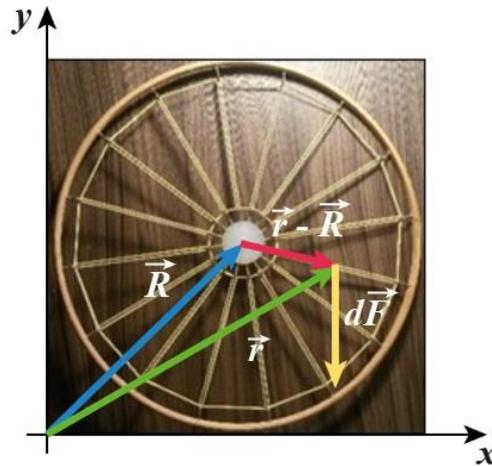
Para calcular o torque dessa força na roda vamos considerar um ponto de referência dado pela posição do eixo de rotação da roda localizado em \vec{R} , veja ilustração na figura 3.19.

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 ser escrito agora como,

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

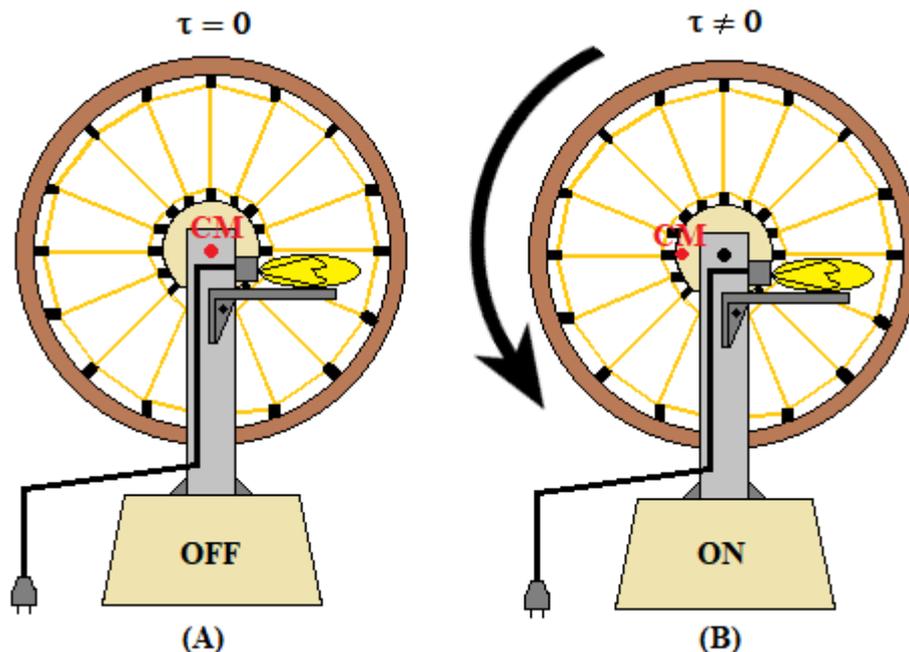
Esta expressão mostra que se $\vec{r} = \vec{r}_{CM}$ obtemos $\int_V (\vec{r} - \vec{r}_{CM}) \rho(\vec{r}) dV = 0$ e consequentemente $\vec{\tau} = 0$. Esta é a situação em que estamos analisando o torque resultante da força gravitacional na posição do CM, o qual coincide com o seu centro de gravidade. 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.

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 do plano da figura.



Fonte: Elaborada pelo autor.

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.

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.

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

3.1.12 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 realize trabalho (W) e eleve a massa.

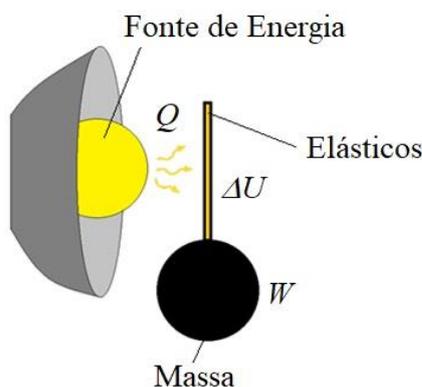
Isso pode ser explorado através da equação da primeira lei da Termodinâmica dada por,

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

se a reescrevermos da seguinte forma $Q = \Delta U + W$. Como descrito no parágrafo anterior, parte da energia total absorvida pelos elásticos 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.

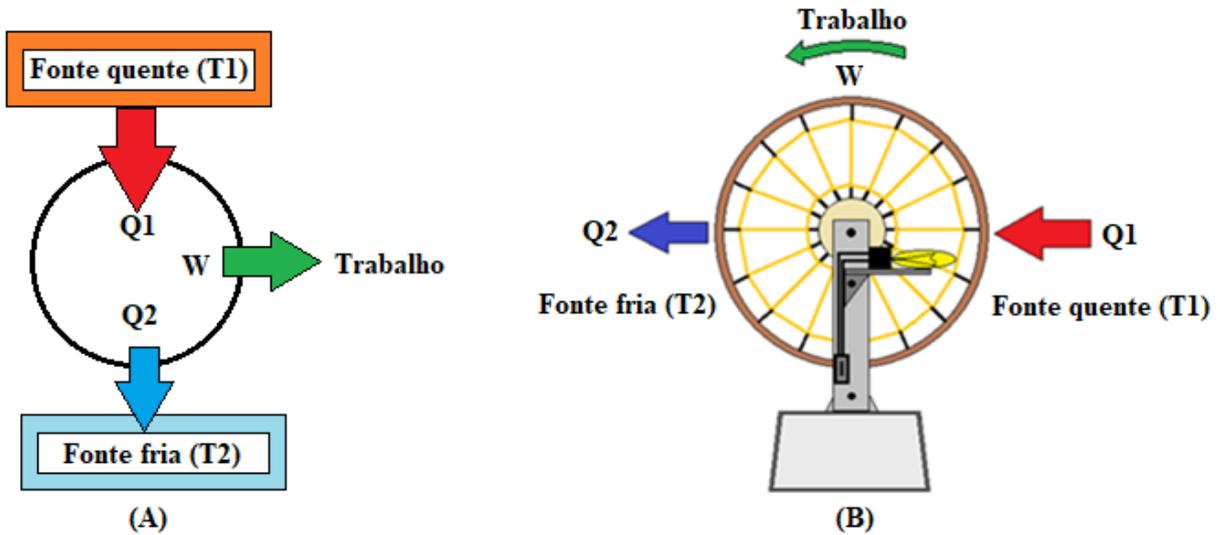
3.1.13 Máquinas Térmicas

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 motor térmico de elásticos.

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.

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,

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

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

Este resultado nos permite obter uma expressão para o rendimento η de uma máquina térmica, 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.

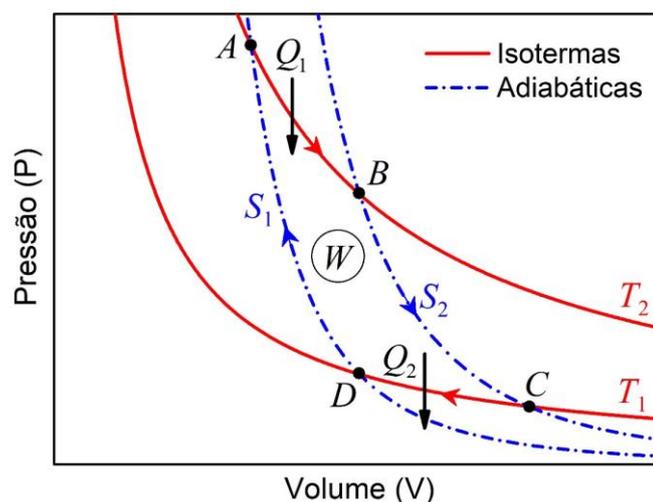
Se o professor quiser ir além e introduzir o conceito de entropia ele pode explorar o fluxo espontâneo de energia através de calor entre as fontes térmicas do motor de elásticos. A entropia é uma medida da irreversibilidade dos processos envolvidos no sistema, como o fluxo espontâneo de calor. Como esse 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 persistam 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 necessária 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.

3.1.14 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.

3.1.15 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.

A metodologia de investigação é promissora para ajudar o aluno a se interessar mais pelas aulas e ser mais ativo no seu aprendizado. No próximo capítulo iremos descrever a metodologia utilizada a partir da descrição da aplicação do nosso produto educacional.

Capítulo 4

DESCRIÇÃO DA METODOLOGIA E APLICAÇÃO DO PRODUTO

Nossa proposta foi aplicada em uma escola da rede particular da cidade de Campinas, Estado de São Paulo, em uma sala de Segunda Série do Ensino Médio. A escolha da rede particular se deu por ser um local de trabalho do professor que aplicou a proposta, o que facilitou a dinâmica do professor e da aplicação do produto educacional.

A escola é de pequeno porte e bem estruturada, contendo salas com computadores para o professor, com acesso à internet, ar condicionado e projetor. Possui também um laboratório para uso dos professores de Ciências da Natureza (Física, Química e Biologia).

Os alunos têm idades entre 15 e 17 anos, de gêneros masculino e feminino e vêm de uma classe social privilegiada (A e B), tendo aulas no período da manhã/tarde, não necessitando de trabalho pois são sustentados pela família.

Optamos pela escolha da metodologia investigativa com o intuito de melhorar a dinâmica entre os alunos e o professor. Nossos experimentos foram utilizados para complementar os conteúdos teóricos discutidos para que a investigação sobre os fenômenos se desse através da realidade e não de abstração considerando o que está nos livros apenas. A visualização dos fenômenos pode favorecer bastante a participação e engajamento dos alunos na busca pelo entendimento de um fenômeno físico.

Nossa proposta foi desenvolvida com a construção e aplicação de dois experimentos que nos possibilitou tratar tópicos de Física relacionados a Termodinâmica e a Mecânica. Um deles é o Motor Térmico de Elásticos utilizado usualmente para discutir as leis da Termodinâmica e o funcionamento de máquinas térmicas. Este experimento foi utilizado pelo físico norte americano Richard Feynman no primeiro volume da coleção *“The Feynman Lectures on*

Physics” que foi traduzido para o português como “Lições de Física” (FEYNMAN, 2008, p.458). O outro experimento é complementar ao primeiro e consiste em um pêndulo feito com elástico para mostrar as propriedades da borracha quando aquecida sob tensão.

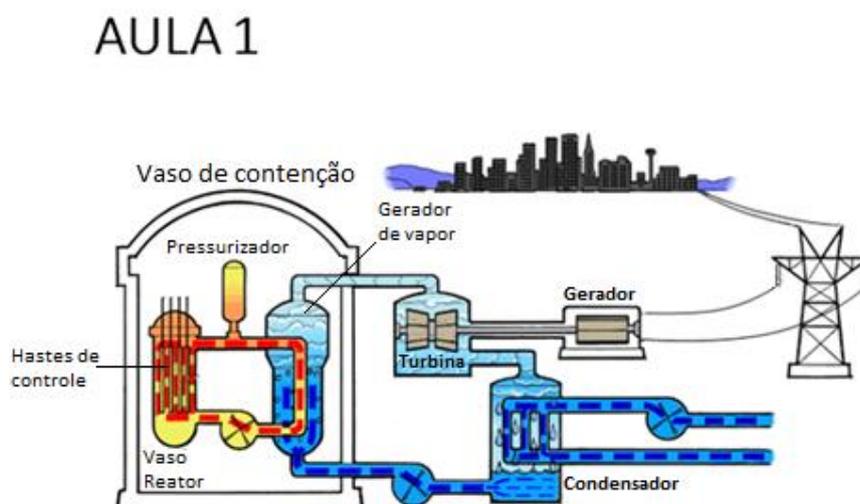
Cabe lembrar que a aplicação das atividades foi facilitada por conta da dinâmica do colégio, pois o professor possui 4 aulas por semana com a turma e a mesma utiliza material não apostilado, o que dá mais flexibilidade para o trabalho.

Dividimos a proposta em 4 etapas, realizadas no primeiro semestre de 2017, as quais foram aplicadas seguindo as etapas apresentadas no nosso produto educacional, ver seção A2 do apêndice. Estas são apresentadas de maneira sucinta a seguir.

4.1 ETAPA 1: CRIANDO UMA BASE – CONCEITOS IMPORTANTES

A primeira etapa da aplicação foi iniciada com a análise de uma figura animada de um reator nuclear, figura 4.1, onde o professor questionou os alunos sobre as etapas das transformações de energia desde a reação das pastilhas até a distribuição da energia elétrica em uma residência se transformando em energia mecânica de movimento de um ventilador, por exemplo. Portanto, a figura teve como objetivo trabalhar a ideia de energia e suas transformações.

Figura 4.1: Imagem animada utilizada para discutir o conceito de energia e suas transformações.



Fonte: Esquema de um reator EWR (animação) – Adaptada pelo Autor. “Disponível em:” <http://energianuclearbr.blogspot.com/2010/10/esquema-de-um-reator-pwr.html>. Acesso em: 10 mai. 2017.

A partir da análise da figura da usina pelos alunos eles responderam questões relacionadas às definições de temperatura, energia, calor e trabalho. Foi deixado claro pelo professor que os alunos tinham que responder tais perguntas com o conhecimento próprio adquirido no ambiente escolar ou fora, sem a preocupação do “certo ou errado” pois a intenção do professor foi de verificar o conhecimento prévio dos alunos. Para que houvesse uma troca de conhecimento os alunos responderam as questões em dupla. Durante as discussões sobre tais questões notamos que os alunos ficaram confusos, pois apesar de serem conceitos do dia a dia, eles não souberam definir e diferenciar tais conceitos.

Este início de aplicação serviu para o professor adquirir informações sobre os conhecimentos prévios dos alunos e assim poder direcioná-los de maneira mais efetiva na investigação dos fenômenos que iriam aparecer posteriormente.

Para o conceito de temperatura, vemos pelas transcrições abaixo que alguns alunos não diferenciam temperatura de calor ou energia. Apenas uma resposta relacionou temperatura com agitação das moléculas.

“Temperatura é uma medida de calor ou de frio.”

“Temperatura é energia transformada em calor.”

“Temperatura é o resultado da agitação das moléculas. Quanto mais agitadas, mais quentes e vice-versa.”

Para a definição de energia tivemos como exemplo as respostas abaixo, onde notamos que os alunos tiveram dificuldades para definir energia e que para eles energia e trabalho são a mesma coisa.

“A energia é o elemento essencial para que ocorra o trabalho.”

“Energia é algo que é produzido através de uma força que atua nela.”

“Energia é o trabalho exercido pela velocidade na reação do calor.”

A penúltima definição solicitada foi a de calor, e alguns exemplos estão nas transcrições a seguir. Vemos novamente que os alunos confundem os conceitos e não diferem calor de temperatura.

“Calor é o resultado do atrito entre dois ou mais corpos em trabalho.”

“Calor é uma sensação, sendo uma sensação térmica causada por movimento em algo.”

“O calor é uma temperatura que pode ser sentida através de algo que projeta calor.”

As últimas respostas dadas são sobre a definição de trabalho e fica claro pelas respostas que os alunos associaram trabalho com força, porém eles respondem que *“Trabalho é uma força...”* na maioria das vezes, mostrando que não têm afinidade com o que é trabalho ou mesmo o que é força.

“Trabalho é uma força resultante de uma energia produzida por um corpo ou uma substância.”

“O trabalho é uma força exercida por algo feito por um indivíduo.”

“Trabalho é uma força exercida pelo esforço de algo ou alguém.”

A conclusão que se tira ao ler as respostas dos alunos referente à temperatura, energia, calor e trabalho é de que a grande maioria das respostas são confusas e que os alunos não têm noção sobre tais definições. Assim o próximo passo desta etapa foi justamente apresentar tais definições para que os alunos diferenciasssem temperatura de calor, principalmente, e verificassem que calor e trabalho são métodos de transmissão de energia.

Após a apresentação e discussão sobre os conceitos acima, foi apresentado o conceito de dilatação térmica dos sólidos, divididos em linear, superficial e volumétrico, onde o professor apresentou as equações das respectivas dilatações,

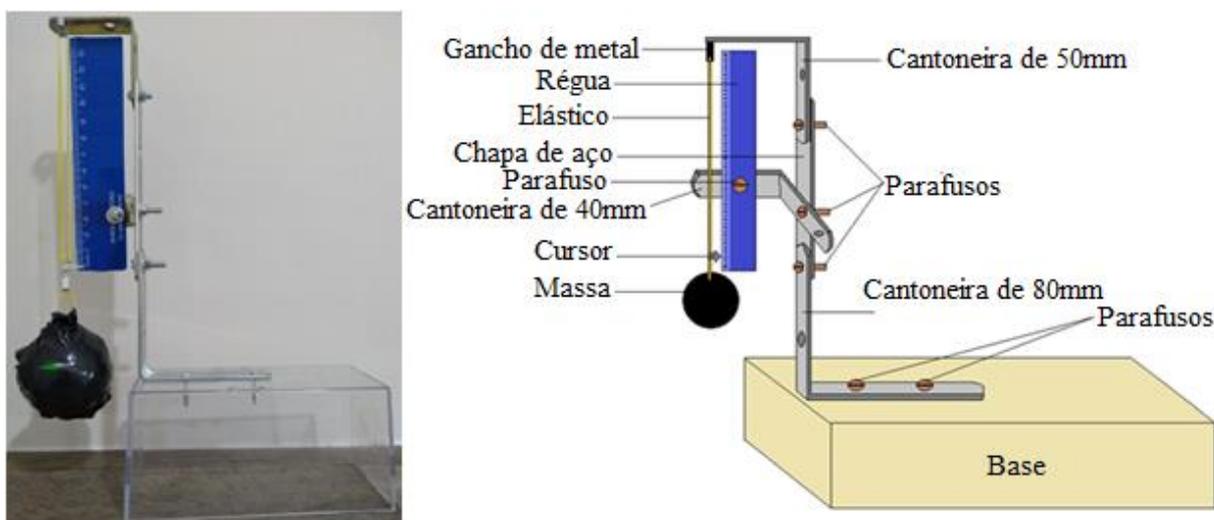
$$\Delta L = L_0 \cdot \alpha \cdot \Delta T \quad (4.1)$$

$$\Delta S = S_0 \cdot \beta \cdot \Delta T \quad (4.2)$$

$$\Delta V = V_0 \cdot \gamma \cdot \Delta T \quad (4.3)$$

O propósito desse momento foi fazer os alunos conhecerem o conceito de dilatação térmica e que tivessem uma ideia de como o fenômeno ocorria. Assim, o professor explicou que para um aumento de temperatura, a maioria dos materiais, sofriam um aumento em suas dimensões, e que para uma diminuição da temperatura, a maioria dos materiais, sofriam uma diminuição em suas dimensões.

Após o professor trabalhar os tipos de dilatação foi apresentado aos alunos o dispositivo da figura 4.2 para que os mesmos observassem a dilatação térmica na prática.

Figura 4.2: Experimento de dilatação térmica do elástico.

Fonte: Elaborada pelo autor.

O objetivo deste experimento foi fazer com que os alunos refletissem para levantar hipóteses sobre a dilatação anômala do elástico, que é o fenômeno causador do giro do motor térmico de elásticos.

Assim, após as observações dos alunos foi pedido, ao final do experimento, que os mesmos respondessem questões (ver o Anexo) sobre as observações feitas e que escrevessem hipóteses sobre o fenômeno observado. Todas as respostas e hipóteses foram feitas em duplas para que os alunos pudessem discutir suas ideias com outro colega para chegarem a um consenso. Exemplos de algumas hipóteses estão a seguir.

“Quando ligamos a fonte de calor as moléculas do elástico se agitam para os lados, aumentando a espessura do elástico e elevando o peso. Quando a luz é apagada, as moléculas voltam ao seu estado natural e o peso desce de novo.”

“Pois quando o material do elástico tem sua temperatura aumentada ele contrai.”

As hipóteses apresentadas foram bem simples, como a segunda resposta acima, mas também foram fornecidas respostas mais elaboradas como a primeira resposta apresentada. É interessante ver que nessa primeira resposta os alunos consideram que as moléculas do elástico vão para o lado e com isso dão lugar a outras que podem subir, fazendo com que o elástico contraia.

A etapa foi finalizada sem que o professor desse as respostas sobre o que os alunos observaram, o que aumentou a curiosidade deles sobre o porquê da contração e fez com que

criassem expectativas para as próximas etapas. Na segunda etapa iniciamos as explicações para o entendimento do fenômeno anômalo do elástico com relação à dilatação térmica.

4.2 ETAPA 2: FENÔMENOS ANÔMALOS – EXPLICANDO O DIFERENTE

Nesta segunda etapa tivemos como objetivo trabalhar o conceito de fenômenos anômalos observados em alguns materiais, dentre eles o próprio elástico dos nossos experimentos e a água, que é essencial para a vida e faz parte do cotidiano dos alunos.

Damos início à aula com uma imagem de várias situações onde havia muitos elementos iguais e apenas um elemento diferente, figura. 4.3, para que os alunos começassem a pensar no diferente, no incomum, no anômalo. A partir daí o professor fez uma série de perguntas para que os alunos refletissem e chegassem na ideia do comportamento anômalo da água.

Figura 4.3: Imagem inicial da segunda etapa para introduzir a ideia do diferente e da anomalia.



Fonte: Figuras disponíveis em (AULA 2).

Os alunos foram questionados do porque o gelo flutuava na água se o mesmo era feito da própria água. Para tal questionamento a resposta foi rápida e precisa, a maioria respondeu que era porque o gelo era menos denso do que a água. Com isso o professor os questionou por

que o gelo era menos denso. Tal questão gerou dúvidas e a sala não soube dizer o motivo. Assim, o professor escreveu a equação da densidade volumétrica d na lousa,

$$d = \frac{m}{V} \quad (4.4)$$

em que m é a massa do material e V o volume ocupado pelo mesmo. Em seguida o professor pediu para que os alunos refletissem sobre tal equação.

Após algum tempo de reflexão sobre a equação acima, o professor discutiu sobre a relação de proporção entre densidade e volume e explicou para os alunos que as duas grandezas são inversamente proporcionais, ou seja, o produto da densidade pelo volume gera uma constante de proporcionalidade dada pela massa m . Dessa forma é necessário aumentar o volume para diminuir a densidade do material ou vice-versa, para que a massa permaneça constante.

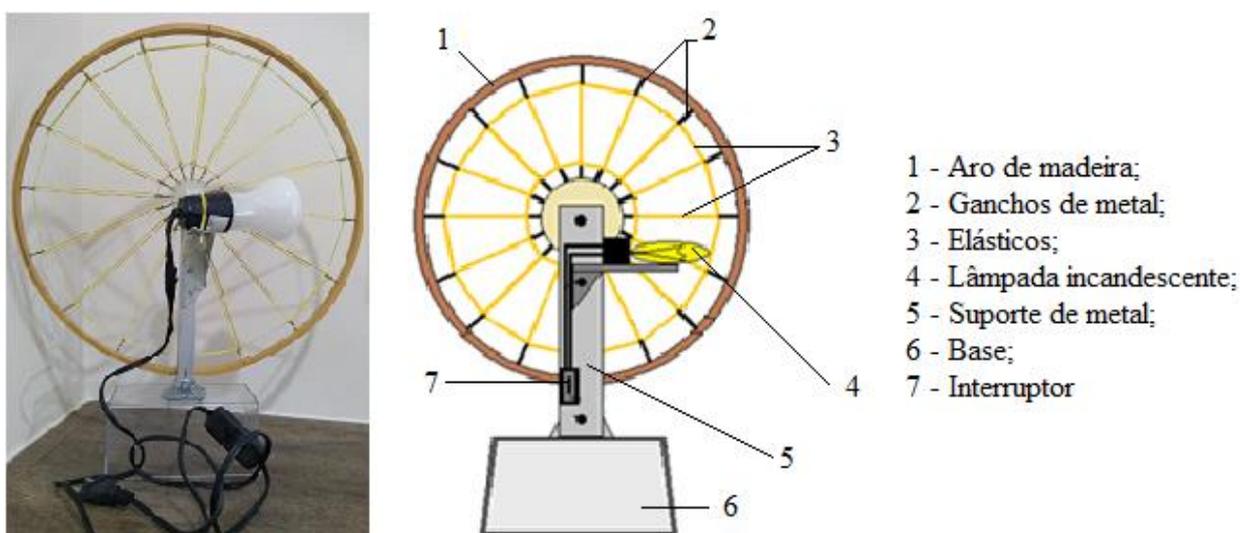
Esta discussão sobre a relação dos parâmetros de um sistema foi importante para a discussão da dilatação térmica de materiais. Usualmente um material, quando submetido a um processo de aquecimento, se dilata aumentando o seu volume e conseqüentemente diminuindo sua densidade. Ou seja, aumento de temperatura causa aumento do volume da maioria dos materiais, de modo que temperatura e volume são diretamente proporcionais. Seguindo esta lógica, se diminuíssemos a temperatura observaríamos diminuição do volume e aumento da densidade do material. Em seguida foi discutido o fenômeno da dilatação anômala da água, onde para temperaturas menores que 4°C a mesma se comporta anormalmente, ou seja, a diminuição da temperatura causa um aumento do seu volume (CUTNELL e JOHNSON, 2006).

Após a apresentação da dilatação anômala da água surgiram algumas questões relacionadas ao próprio cotidiano dos alunos, como uma garrafa contendo um líquido com grande porcentagem de água se quebrar quando deixada por muito tempo no congelador, por exemplo. Após discutir um pouco sobre a questão da água o professor entrou na questão da importância do fenômeno (dilatação anômala) para a vida de espécies que vivem em lagos de regiões com temperaturas muito baixas, onde o gelo forma uma camada isolante e mantém a temperatura da água aproximadamente constante, fazendo com que a vida seja possível. Terminada a discussão sobre a dilatação anômala da água e sua importância para a vida de algumas espécies nós partimos para a explicação da dilatação anômala do elástico.

Para tal explicação o professor teve o auxílio da professora de química que trabalhou alguns conceitos com os alunos, como cadeias carbônicas e pontes de dissulfeto para que os alunos compreendessem melhor o que ocorria com o elástico quando era aquecido ou resfriado.

Com a explicação do comportamento anômalo do elástico ao ser aquecido partimos para o final da etapa, onde demonstramos o motor térmico de elásticos funcionando. O professor montou o experimento da figura 4.4 e começou a demonstração. O experimento, que já havia sido testado, não funcionou na primeira tentativa, ou seja, ao incidir calor em um dos lados da roda do motor o mesmo não girou. O não funcionamento ou o mal funcionamento do dispositivo pode ser justificado por alguns motivos, que podem ser relacionados à fonte de luz pouco potente ou o mal balanceamento da roda, por exemplo. Por isso é muito importante que o professor que estiver utilizando o experimento conheça bem o equipamento, desde a construção até o ajuste e balanceamento da roda. Tais detalhes são apresentados no Apêndice.

Figura 4.4: Motor térmico de elásticos.



Fonte: Elaborada pelo autor.

Após uma análise rápida o professor verificou que o não funcionamento do motor foi causado pela inclinação da mesa que o experimento estava, que fez com que a roda não girasse. Para a roda girar livremente a mesma precisa estar balanceada e em uma superfície plana. Isso proporcionou ao professor uma discussão sobre o *fazer ciência* e que nem sempre as coisas saem como planejadas e que o bom conhecimento teórico daquilo que está sendo discutido faz com que em casos como este, o problema seja resolvido com mais facilidade.

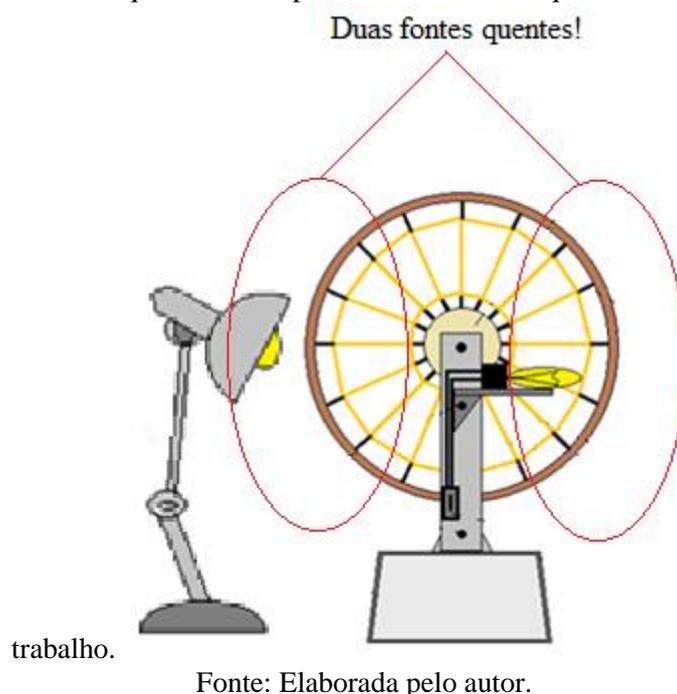
Outras coisas interessantes aconteceram nesta etapa, começando pelo giro não contínuo da roda e depois sobre sua velocidade. Os alunos fizeram tais observações e o professor propôs que eles pensassem em hipóteses para explicarem o porquê dos ocorridos e em possíveis melhorias que poderiam ser feitas no experimento. Para a questão da descontinuidade sugeriram que fossem colocadas mais fontes térmicas em torno da roda e que elas fossem *opostas* para

esquentar os dois lados da mesma igualmente. Já para a questão da velocidade sugeriram que as lâmpadas fossem mais potentes.

O aumento de potência da lâmpada não implica necessariamente em aumento de potência do motor de elásticos, fazendo-o girar mais rápido, por exemplo. O sistema está limitado pela substância de trabalho, composta pelos elásticos, os quais possuem uma deformação máxima, limitando dessa forma o seu funcionamento. A explicação dos alunos para a continuidade do giro também é equivocada, pois a adição de novas fontes não implicará na continuidade do movimento. A descontinuidade no giro da roda, assim como sua velocidade de rotação, está associada ao tempo de aquecimento e resfriamento dos elásticos, chamado de tempo de relaxação ou de resposta do elástico. Para modificar tais características seria necessário utilizar elásticos produzidos com materiais diferentes. O importante aqui é que os alunos se posicionaram diante das observações realizadas no sentido de melhorar o desempenho do dispositivo.

A ideia de colocar duas fontes opostas, figura 4.5, foi interessante para mostrar aos alunos que dessa maneira o motor não funcionava.

Figura 4.5: Duas fontes térmicas posicionadas nos dois lados da roda para testar uma hipótese dos alunos. Essa configuração faz com que o motor térmico não funcione, pois de acordo com a segunda lei da Termodinâmica, uma máquina térmica precisa de uma fonte quente e uma fonte fria para realizar



Como o motor térmico de elásticos é uma máquina térmica, é necessário que haja, obrigatoriamente, duas fontes térmicas para a realização de trabalho e produção de movimento,

uma fonte quente e uma fonte fria. Neste caso, toda a roda é aquecida de modo que não é possível observar a atuação de uma fonte fria para que a máquina apresentasse algum rendimento. Nesta configuração, não há o deslocamento do centro de massa da roda, pois os elásticos em ambos os lados sofrem dilatação devido a energia térmica transferida pelas lâmpadas incandescentes. Esse procedimento sugerido por eles mesmos foi útil para aumentar a curiosidade deles para saber como o motor funcionava, motivando-os a continuar discutindo o assunto nas próximas aulas.

Esta etapa foi finalizada com o professor pedindo para os alunos responderem a um questionário (Anexo A) contendo algumas perguntas que já tinham sido abordadas na primeira etapa, como o que é calor, energia, trabalho e temperatura e também novas questões relacionadas às observações feitas do motor térmico de elásticos funcionando, para eles exporem suas hipóteses sobre tal funcionamento.

Tais hipóteses, até este momento da aplicação da proposta, foram bem simples e a maioria relacionou o funcionamento do motor com o aquecimento dos elásticos e a dilatação anômala dos mesmos, sem citar nada sobre o funcionamento mecânico do experimento. Alguns exemplos das respostas dos alunos são apresentados abaixo.

“O elástico quando aquecido ele contrai, com isso o elástico faz com que a roda gire.”

“A contração dos elásticos, a partir da alta temperatura, faz com que a roda se mova.”

“A lâmpada aquece o elástico, fazendo ele dilatar e a roda girar até o elástico esfriar, então o processo se repete.”

Como mencionado, as respostas foram simples e limitaram-se ao fato do elástico sofrer dilatação térmica. Em nenhuma resposta foi mencionado algum conceito sobre mecânica, como aparecimento de forças, por exemplo, para a roda do motor começar seu movimento. Isso nos levou a preparar a terceira etapa da aplicação do produto para discutir os conceitos de movimento e de mecânica envolvidos no funcionamento do motor térmico de elásticos.

4.3 ETAPA 3: MOVIMENTO E EQUILÍBRIO – ENTENDENDO A MECÂNICA DO MOTOR TÉRMICO

A terceira etapa da aplicação do nosso produto serviu para os alunos entenderem e terem suporte teórico de alguns conceitos sobre movimentos e as condições para tais movimentos ou para o equilíbrio estático de alguns sistemas. Tal suporte teórico está relacionado aos conceitos de movimentos de translação, rotação e os conceitos de equilíbrio, centro de massa e torque de uma força. É interessante trabalhar esse conteúdo para que o aluno entenda o funcionamento mecânico do motor térmico de elásticos.

A aula teve início com a imagem da figura 4.12 mostrando algumas situações de equilíbrio, o que nos permitiu discutir o que é movimento. Foram feitas as seguintes perguntas aos alunos: *O que é movimento de translação? Dê um exemplo; O que é movimento de rotação? Dê um exemplo; e, O que é equilíbrio?*

Figura 4.2: Imagem inicial da terceira aula que teve como objetivo a explicação do funcionamento mecânico do motor térmico de elásticos.



Fonte: Figuras disponíveis em (AULA 3).

Para a primeira pergunta tivemos respostas do tipo:

“Quando o objeto gira em torno de outro corpo. O exemplo é o planeta em torno do sol.”

“Movimento de translação é o que gira em torno do sol. Ex: o ano.”

Vemos que a ideia de translação dos alunos está associada ao movimento da Terra em torno do sol. Os alunos não forneceram nenhum exemplo fora desse contexto, sem contar que o termo *“gira em torno do sol”* está equivocado com relação ao conceito de translação.

A segunda pergunta foi respondida de forma semelhante à primeira, ou seja, os alunos pensam apenas no movimento de rotação do planeta Terra e não tentam imaginar outros movimentos de rotação. Exemplos de respostas são:

“Movimento de rotação é a Terra girando em torno do seu próprio eixo. Ex: dia e noite.”

“É quando algo gira no seu próprio eixo, como a Terra que gira em torno dela mesma.”

O que nos chamou a atenção, em mais de uma resposta, foi que os alunos escreveram que a Terra gira em torno dela mesma. Diante das discussões em sala essa resposta está relacionada à Terra girar em torno do próprio eixo e não em torno dela mesma. Isso mostra que os alunos possuem dificuldades em expressar suas ideias através da escrita.

Com relação à questão sobre equilíbrio tivemos respostas como:

“É algo balanceado, com proporções iguais.”

“É quando algo se encontra num ponto estável.”

“Quando o objeto está estático.”

Para esta questão obtivemos respostas mais satisfatórias em comparação com as duas primeiras questões. Vemos, por exemplo que algumas palavras-chave aparecem, como, *“ponto estável”* e *“estático”*, ou seja, os alunos têm ideia sobre o equilíbrio estático, mas não tinham noção ou pelo menos não expressaram qualquer entendimento sobre equilíbrio dinâmico. Estar equilibrado é sinônimo de estático, parado, para eles.

Em seguida o professor deu início às devidas explicações dos movimentos de translação e rotação, equilíbrio, centro de massa, torque e as condições para que um objeto esteja em equilíbrio. Após a exposição desses conceitos pedimos novamente para que os alunos tentassem explicar o funcionamento do motor térmico de elásticos. Lembramos que as hipóteses anteriores à aula de mecânica, sobre o funcionamento do experimento, foram somente voltadas para a dilatação dos elásticos e não continha nenhum elemento de mecânica nas explicações.

Segue algumas respostas apresentadas pelos alunos:

“Antes de a luz ser acesa a roda estava em equilíbrio, após a luz acesa a temperatura aumenta gerando calor (transmitindo energia). Com o calor o elástico terá uma dilatação térmica anômala que fará diminuir de tamanho perdendo o equilíbrio e fazendo o centro de massa alterar.”

“A partir do momento em que a luz foi acesa gerou calor fazendo com que o elástico dilatasse mas como ele é um polímero ele tem um comportamento anômalo que quando é aquecido ele contrai fazendo com que o ponto de equilíbrio saia do meio e com o ponto de equilíbrio não estando no meio vai girar.”

“Quando liga a lâmpada emite calor que faz uma dilatação térmica no elástico, que quebra o equilíbrio pois muda o centro de massa fazendo ela entrar em movimento. É uma máquina térmica pois é necessário subir a temperatura do elástico.”

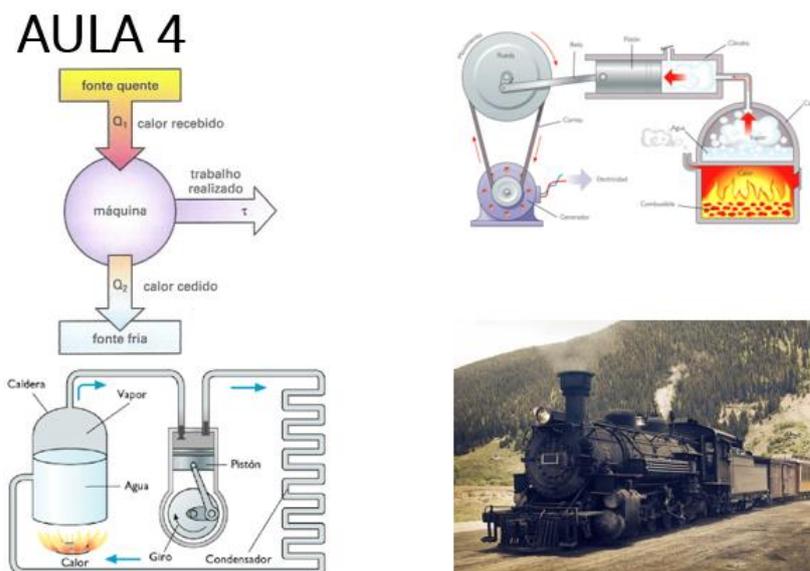
Vemos pelos exemplos que os alunos citam a dilatação anômala dos elásticos e que tentam explicar o movimento a partir do deslocamento do centro de massa ou do ponto de equilíbrio da roda. Pelas respostas vemos que os alunos tentam usar os conceitos vistos em aula, mas não podemos inferir que houve aquisição desses conhecimentos pelos alunos, mesmo porque os assuntos estavam muito recentes. Nas respostas analisadas faltaram o uso do conceito de torque, nenhuma dupla relacionou o torque da força resultante, sendo diferente de zero para o movimento de rotação da roda do motor.

À medida que as etapas foram avançando os alunos conseguiram, de maneira sucinta, explicar o funcionamento do experimento. No decorrer das aulas o motor térmico foi ligado e desligado várias vezes para que os alunos observassem o movimento e tentassem aprimorar suas hipóteses. Na próxima etapa visamos trabalhar os conceitos de termodinâmica com os alunos concluindo que o experimento proposto é uma máquina térmica.

4.4 ETAPA 4: MÁQUINAS TÉRMICAS E AS LEIS DA TERMODINÂMICA

Nesta etapa nosso objetivo foi trabalhar conceitos físicos relacionados à termodinâmica. Iniciamos com as três leis da termodinâmica seguida do estudo das máquinas térmicas. Similarmente às outras etapas nós começamos a aula com uma imagem, representada pela figura 4.13, para que pudéssemos refletir sobre o tema.

Figura 4.3: Imagem utilizada no início da etapa 4 onde foram trabalhados os conceitos de máquinas térmicas e as leis da termodinâmica.



Fonte: Figura superior esquerda extraída de (TOFOLLI), figura superior direita extraída de (LIMA); figura inferior esquerda extraída de (JORGE) e figura inferior direita extraída de (TEIXEIRA).

Como o tema principal foi máquina térmica iniciamos a aula com uma introdução histórica, apresentando exemplos e ressaltando a importância do tema para o desenvolvimento industrial na Europa, com a primeira revolução industrial, e também nos dias atuais. Como trabalhamos com a metodologia experimental investigativa, o motor térmico sempre esteve presente nas aulas, com exceção da etapa 1, para que os alunos observassem o experimento, refletissem e criassem hipóteses sobre o seu funcionamento. É interessante observar que a medida que os assuntos foram trabalhados, as explicações eram direcionadas para tais assuntos.

Começamos com a primeira lei da termodinâmica, onde o professor questionou os alunos sobre a energia térmica emitida pela lâmpada. Foi perguntado se toda a energia emitida pela lâmpada era absorvida pelos elásticos. As respostas foram rápidas e os alunos disseram que não, pois a lâmpada emitia luz em todas as direções e, portanto, parte dessa energia não iria para os elásticos. Com isso, o professor pôde trabalhar a ideia de conservação de energia e enunciar a primeira lei da termodinâmica.

A primeira lei da termodinâmica está relacionada com o princípio de conservação de energia onde parte da quantidade de energia absorvida pela máquina através de calor (Q_1) era dissipada através de calor (Q_2) para a fonte fria, atribuída ao ambiente, e parte era convertida no movimento de rotação da roda através de trabalho (W), ou seja,

$$Q_1 = Q_2 + W \quad (4.5)$$

Após discutirmos sobre a primeira lei nós continuamos com a segunda lei da termodinâmica. A segunda lei diz que o rendimento (η) de uma máquina térmica não pode ser de 100%, ou seja, é impossível converter integralmente o calor da fonte quente (Q_1) em trabalho (W). O rendimento da máquina térmica é definido pela razão entre a energia útil transferida à vizinhança através de trabalho (W) e a energia total fornecida pela fonte quente (Q_1),

$$\eta = \frac{W}{Q_1} = \frac{Q_1 - Q_2}{Q_1} = 1 - \frac{Q_2}{Q_1}, \quad (4.6)$$

sendo $Q_2 < Q_1$ tem-se que $\eta < 1$, ou seja, o rendimento é menor que 100%.

Mostramos aos alunos uma comparação esquemática do nosso experimento e uma máquina térmica típica, figura 3.22, para que os parâmetros termodinâmicos introduzidos fossem reconhecidos em nosso dispositivo.

Continuamos com a explicação da terceira lei da termodinâmica partindo do rendimento máximo obtido em uma máquina de Carnot, onde no ciclo da máquina contêm dois processos isotérmicos e dois adiabáticos. Apresentamos a equação do rendimento da máquina de Carnot, eq.(3.25), sem qualquer demonstração matemática. Apenas mostramos que este dependia apenas das temperaturas das fontes térmicas da máquina.

Como o argumento da segunda lei de que o rendimento de uma máquina térmica não pode ser 100% nós utilizamos a equação de rendimento para afirmar a impossibilidade de atingirmos o zero absoluto, ou seja, $T_2 = 0$. Isso também pode ser demonstrado como uma consequência do teorema do calor de Nernst, usualmente referido como a terceira lei da termodinâmica.

Após a apresentação das leis partimos para o conceito de *Máquinas Térmicas*. É importante que o aluno consiga reconhecer os fundamentos de uma máquina e saiba fazer a comparação do nosso experimento com uma máquina típica, assim como é feito na figura 3.22. Ao final das explicações, comparações e reflexões foram conduzidas para que os alunos respondessem a um questionário sobre os conceitos apresentados nessa etapa.

Na primeira questão foi perguntado o que é uma máquina térmica, ou seja, qual o seu princípio de funcionamento. Veja algumas respostas:

“Uma máquina térmica usa calor para produzir trabalho, tem a função de converter calor em trabalho.”

“Máquina térmica transforma energia térmica em energia mecânica.”

“É uma máquina que utiliza calor para gerar energia mecânica.”

Pela análise das respostas vemos que os alunos compreenderam a principal função da máquina térmica, que é um dispositivo que produz trabalho transformando energia térmica em energia mecânica através de calor, operando ciclicamente. Mas vemos também que não há uma precisão nos termos quando aparecem palavras do tipo “*produzir*” ou “*gerar*”, pois a máquina não produz e nem gera nenhuma energia e sim a transforma, lembrando que ENERGIA é uma propriedade do sistema que não pode ser criada, nem destruída, mas sim, transformada de uma modalidade em outra.

Outra questão se referiu à explicação de cada uma das leis da Termodinâmica. Para esta pergunta tivemos apenas respostas discursivas sobre o que tratavam as leis, sem nenhuma explicação matemática ou exemplos sobre as mesmas. Todas as respostas apresentadas foram próximas ou iguais às apresentadas abaixo:

“1ª lei da termodinâmica: a energia total do universo permanece constante;

2ª lei da termodinâmica: uma máquina nunca vai ter 100% de rendimento; e

3ª lei da termodinâmica: É impossível chegar no zero absoluto.”

A última questão sobre os temas da quarta etapa está relacionada com a comparação entre a máquina térmica convencional e a máquina térmica de elásticos. Esperávamos para essa pergunta que o aluno conseguisse enxergar as fontes quente e fria e conseguisse relacionar o trabalho com o giro da roda. Dois exemplos de respostas são dados abaixo:

“A máquina térmica precisa de uma fonte quente e uma fonte fria e o experimento da roda de elástico precisa de uma fonte quente como a lâmpada para o elástico se contrair e girar a roda.”

“Assim como uma máquina térmica o experimento transforma a energia térmica em energia mecânica e também existe uma energia dissipada (perdida).”

Pelas respostas expostas e as que não expomos vemos que os alunos perceberam que a função da máquina é transformar energia e que para que ela funcione há a necessidade de uma fonte quente e uma fonte fria. Isso nos permitiu discutir com os alunos o porquê do não funcionamento do experimento quando colocamos duas fontes de calor atingindo toda a extensão da roda, na etapa 2.

4.5 FECHAMENTO DAS ATIVIDADES

Finalizamos a aplicação do produto fazendo uma análise discursiva do material, sobre os fenômenos discutidos e a metodologia utilizada. Vale ressaltar que a turma que aplicamos nosso produto foi uma turma com rendimento abaixo da média e com uma apatia muito grande pela Física. Isso nos levou a escolher essa turma para fazer um trabalho diferenciado, quando comparado com as aulas de memorização de fórmulas e resolução de exercícios, para que os mesmos tivessem mais motivação para aprender física.

Além da análise discursiva do material passamos também um questionário (Anexo) sobre a aplicação do produto para que os alunos avaliassem as aulas e a metodologia utilizada. Foi satisfatório verificar a partir das respostas que os alunos gostaram da proposta e que se sentiram mais dispostos e motivados para aprender física.

Pelas respostas dadas pelos alunos entendemos que para eles a física não passava de uma disciplina cheia de contas e que não tinha significado algum. Dois dos alunos escreveram:

“Sim, gostei de poder ver que a física não é somente contas e teorias, mas também a prática.”

“A aula ficou mais dinâmica e mais fácil para entender os conceitos da física vendo acontecer na minha frente. O que mais gostei foi dos experimentos.”

Sobre a metodologia utilizada e se gostariam de ter mais aulas desse tipo, algumas respostas foram:

“Sim, muito melhor ter aula com experimento do que fazer contas, apesar de gostar um pouco de números, achei bem mais interessante.”

“Sim, muito melhor aula com experimento do que aula teórica, ficou bem mais dinâmica.”

“Sim a utilização de experimentos facilita a compreensão”.

Vemos pelas respostas que as aulas podem se tornar mais agradáveis aos alunos quando utilizamos experimentos. Para esta turma que a proposta foi aplicada, foi algo diferente, interessante e que chamou a atenção deles. Sobre o papel do experimento em aula os alunos comentaram o seguinte.

“Sim, tiveram um papel importante pois deu para visualizar melhor os fenômenos. Chamou muito minha atenção pois vi como a máquina funcionava através dos conceitos físicos.”

“Os experimentos foram cruciais pois além de aumentar o interesse e o foco na aula, eles facilitaram a explicação da teoria. Eles chamam a atenção pois o conteúdo é visto acontecendo na sua frente.”

O empenho e participação dos alunos foi importante, pois foi a dinâmica das aulas que fizeram a diferença. Mesclar teoria, prática e investigação foi algo novo para os alunos dessa turma e isso os motivou, deixando as aulas menos maçantes. Foi uma experiência nova também para o professor, pois em sua prática a dinâmica das aulas se resumia em passar conteúdos na lousa e resolver exercícios para preparar os alunos para o vestibular e não focar na aprendizagem dos alunos para que pudessem observar, criticar e analisar os fenômenos observados na prática.

Finalizamos nossa proposta com uma excelente impressão e satisfeitos com os resultados observados, pois atingimos nosso objetivo principal, que foi chamar a atenção dos alunos, tornando as aulas mais dinâmicas e prazerosas, mostrando aos alunos que a física pode ser fascinante e interessante de ser estudada.

Capítulo 5

CONCLUSÕES E CONSIDERAÇÕES FINAIS

As atividades realizadas e expostas nesta dissertação foram baseadas na experiência do professor com a turma escolhida para a aplicação do produto. O baixo rendimento e a falta de motivação dessa turma com relação ao aprendizado de física motivaram o professor a tentar algo diferente.

Esta proposta foi inteiramente aplicada em uma escola particular de Campinas – SP em uma sala pequena de segunda série do ensino médio, contendo apenas 16 alunos. Vimos que no início da aplicação os alunos não sabiam diferenciar conceitos como calor, temperatura, trabalho, etc. mesmo que alguns conceitos já tivessem sido vistos por eles em momentos anteriores, como é o caso de temperatura e calor. Apesar de toda desmotivação e apatia dos alunos para com os assuntos trabalhados não esperávamos encontrar os alunos com tantas defasagens.

Nas aulas em que houve a aplicação dos experimentos os alunos passaram a participar das atividades e questionar o professor sobre o que estava sendo exposto. A motivação e interesse pelas aulas aumentou e as aulas ficaram mais dinâmicas.

Durante os dias de aplicação do produto vimos uma sala diferente da que estávamos acostumados, os alunos esperavam as aulas com expectativas sobre o que iria acontecer e com muitas perguntas sobre a aula anterior. Alunos que antes viam a física como uma disciplina chata cheia de contas e sem fundamentos passaram a enxergar com outros olhos a disciplina.

A partir das respostas de alguns conceitos físicos dadas pelos alunos e observações em sala de aula, podemos concluir que a aplicação da nossa proposta foi satisfatória fazendo com

que os alunos assimilassem parte do conteúdo transmitido e se sentissem mais motivados para as aulas de Física.

Esperamos que o material seja útil para os professores do ensino básico e que o mesmo possa motivar não somente os alunos, mas também os professores a realizarem atividades experimentais em sala de aula. O uso de experimentos em sala de aula pode contribuir de fato para tornar as aulas mais dinâmicas, com maior participação dos alunos, fazendo com que eles se interessem mais pelo assunto discutido.

REFERÊNCIAS

ALVARENGA, B.; MAXIMO, A. Curso de Física. Vol.2. São Paulo: Harbra, 1980.

ARAÚJO M. S. T.; ABIB M. L. V. S. Atividades Experimentais no Ensino de Física: Diferentes Enfoques, Diferentes Finalidades. Revista Brasileira de Ensino de Física, vol. 25, no. 2, Junho, 2003.

AULA 2. Figura superior à esquerda. “Disponível em:” <http://www.osmais.com/index.php?ver=MTM0MjE=>; Figura superior à direita “Disponível em:” https://pt.pngtree.com/freebackground/the-yellow-umbrella-black-umbrella-creative-business-poster_582788.html; Figura inferior à esquerda. “Disponível em:” <http://www.mulherbeleza.com.br/wp-content/uploads/2012/01/5-dicas-para-ser-diferente>; Figura inferior à direita. “Disponível em:” <http://igrejakairos.com/pregacoes/coragem-para-ser-diferente/>.

AULA 3. Figura superior à esquerda. “Disponível em:” <https://revistaautoesporte.globo.com/Noticias/noticia/2016/03/o-que-e-torque.html>; Figura superior à direita “Disponível em:” <https://umacameraviagens.wordpress.com/2016/04/18/pedras-empilhadas/>; Figura inferior à esquerda. “Disponível em:” <https://you-are-what-you-read.com/the-perils-of-extreme-balance/>; Figura inferior à direita. “Disponível em:” <http://www.jaimevera.tecnoies.com/mecanismos/palancas.html>.

AULA 4. Figura superior à esquerda. “Disponível em:” <https://www.infoescola.com/fisica/maquina-termica/>; Figura superior à direita “Disponível em:” <http://www.antoniolima.web.br.com/arquivos/maquinastermicas.htm>; Figura inferior à esquerda. “Disponível em:” <https://segundotrimestre.webnode.es/las-maquinas/las-maquinas-y-sus-usos/>; Figura inferior à direita. “Disponível em:” <https://brasile scola.uol.com.br/fisica/historia-das-maquinas-termicas.htm>.

AZEVEDO M. C. P. S. Ensino por investigação: Problematizando as atividades em sala de aula. IN: CARVALHO A. M. P. (Org). Ensino de Ciências: Unindo a pesquisa e a prática. São Paulo: Thomson, 2004. p. 19 – 33.

BACHELARD, G. A. A formação do espírito científico: contribuição para uma psicanálise do conhecimento. Rio de Janeiro: Contraponto. 1996.

BAZAROV, I. P. Thermodynamics. Translated by F. Immirzi. Oxford, New York, Pergamon Press, 1964.

BONFIM, E. Componentes de uma usina hidrelétrica. “Disponível em:” <http://eletronicapro.blogspot.com/2010/11/componentes-de-uma-usina-hidreletrica.html>. Acesso em: 10 mai. 2017.

BORGES, A. T. Novos rumos para o laboratório escolar de ciências. Cad. Brás. Ens. Fís., v. 19, n.3: p.291-313, dez. 2002.

BRASIL, Secretaria de Educação Fundamental. Parâmetros Curriculares Nacionais. 3º e 4º ciclos. Apresentação em Temas transversais. Brasília: MEC/SEF, 1997.

BRASIL. Ministério da Educação. Secretaria da Educação Média e Tecnológica. PCN: Parâmetros Curriculares Nacionais - ensino médio: ciências da natureza, matemática e suas tecnologias. Brasília: MEC. 1999.

CARVALHO, A. M. P. O Ensino de Ciências e a proposição de Sequências de Ensino Investigativas. In: CARVALHO, A. M. P. (org). Ensino de ciências por investigação: condições para implementação em sala de aula. São Paulo: Cengage Learning, 2016. Cap. 1 p. 01-20.

CARVALHO, A. M. P.; SASSERON, L. H. Ensino de Física por Investigação: referencial teórico e as pesquisas sobre as sequências de ensino sobre calor e temperatura. Ensino em Revista, [s.l.], v. 22, n. 2, p.249-266, 15 dez. 2015.

COELHO, G. R.; SOUZA D. R. J. Ensino por investigação: problematizando as aprendizagens em uma atividade sobre condutividade elétrica. Atas do IX Encontro Nacional de Pesquisa em Educação em Ciências – IX ENPEC Águas de Lindóia, SP. 2013.

CUTNELL, J. D.; JOHNSON, K. W. Física vol.1. 6º ed. Rio de Janeiro: LTC, 2006.

ERTHAL, J. P. C. e GASPAS, A. Atividade experimentais de demonstração para o ensino de corrente alternada ao nível do ensino médio. Cad. Bras. Ens. Fís., v. 23, n. 3: p. 345-359, dez. 2006.

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.

FEYNMAN, R. P.; LEIGHTON, R. B.; SANDS, M. Lições de Física de Feynman: Vol.1. Edição definitiva. Porto Alegre: Bookman, 2008.

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

GASPAS, A. Atividades experimentais no ensino de Física: uma visão baseada na teoria de Vigotski. São Paulo: Editora Livraria da Física, 2014.

GIL-PEREZ, D. A Necessária renovação do ensino das ciências / António Cachapuz...[et al.], (organizadores). — São Paulo : Cortez, 2005.

HALLIDAY D.; RESNICK R. e WALKER J. Fundamentos de Física: gravitação, ondas e termodinâmica. Vol. 1. 8ed. Rio de Janeiro: LTC, 2009.

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

HODSON, D. In Search of a Meaningful Relationship: an exploration of some issues relating to integratin in Science and Science educacion. International Journal os Science, 1992.

JESUS, G. B. O.; SANTOS, I. A; SILVA, J. G.; SANTOS, V. S.; PIRES, W. S. Repensando a metodologia do ensino tradicional de Física nas escolas públicas: um estudo de caso do centro integrado de educação Navarro de Brito em Vitória da Conquista/BA. Seminário Gepráxis, Vitória da Conquista – Bahia – Brasil, v. 6, n. 6, p 1477-1489, 2017

JORGE. Las Máquinas Térmicas. “Disponível em:” <https://segundotrimestre.webnode.es/las-maquinas/las-maquinas-y-sus-usos/>. Acesso em 22 fev. 2019.

LEWIN, A. M. F. e LOMÁSCOLO, T. M. M. La metodologia científica em la construcción de conocimientos. Enseñanza de las ciências, 20 (2), p. 147-1510, 1998.

LIMA, A. G. G. Máquinas Térmicas. “Disponível em:” <http://www.antoniolima.web.br.com/arquivos/maquinastermicas.htm>. Acesso em 22 fev. 2019.

LISOWSKI, L. F. F. A indiferença do aluno frente à aprendizagem: Possíveis formas de amenizá-la. “Disponível em:” <http://www.diaadiaeducacao.pr.gov.br/portals/pde/arquivos/1044-4.pdf>. Acesso em 20/05/2019.

MIRANDA, M. S.; MARCONDES, M. E. R.; SUART, R. C. Promovendo a alfabetização científica por meio de ensino investigativo no ensino médio de química: Contribuições para a formação inicial de docente. Ensaio Pesquisa em Educação em Ciências (belo Horizonte), [s.l.], v. 17, n. 3, p.555-583, dez. 2015.

MONTEIRO, I. C. C. Atividades experimentais de demonstrações em sala de aula: uma análise segundo o referencial da teoria de Vigotski. 2002. 129 p. Dissertação (Mestrado) FC/UNESP, Bauru.

MOREIRA, M. A. Uma abordagem cognitiva ao ensino de física. Porto Alegre: Editora da Universidade, 1983.

NUSSENZVEIG, H. M. Curso de Física Básica: Mecânica. Vol.1. 4ed. São Paulo: Edgard Blücher, 2002.

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

OLIVEIRA, J. R. S. Contribuições e abordagens das atividades experimentais no ensino de ciências: reunindo elementos para a prática docente. Acta Scientiae, v.12, n.1, jan./jun. 2010

RODRIGUES M.; REIS D. F.; OLIVEIRA M. BORGES A. PSSC: Resumo. “Disponível em” https://edisciplinas.usp.br/pluginfile.php/126988/mod_resource/content/1/PSSC_Resumo_Mo_nalisa_Mario_Danilo_Andre.pdf. Acesso em 14 jan. 2019.

SANTOS, T. P.; AZEVEDO, H. L.; MONTEIRO, F. N. J.; CARLOS, J. G.; TANCREDO, B. N. O uso do experimento no Ensino da física: tendências a partir do levantamento dos artigos em periódicos da área no Brasil. VII Encontro Nacional de Pesquisa em Educação em Ciência, Florianópolis, 2009.

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

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.

TEIXEIRA, M. M. História das Máquinas Térmicas. Brasil Escola. “Disponível em:” <https://brasilescola.uol.com.br/fisica/historia-das-maquinas-termicas.htm>. Acesso em 22 fev. 2019.

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

TOFFOLI, L. Máquina Térmica. “Disponível em:” <https://www.infoescola.com/fisica/maquina-termica/>. Acesso em 22 fev. 2019.

WILMO, E. FRANCISCO JR; FERREIRA, L. H; HARTWIG, D. R. Experimentação problematizadora: Fundamentos teóricos e práticos para aplicação em salas de aula de ciências. Rev. Química Nova na Escola, Nº 30, 2008.

Apêndice

PRODUTO EDUCACIONAL

MNPEF
Mestrado Nacional
Profissional em
Ensino de Física

MNPEF Mestrado Nacional
Profissional em
Ensino de Física
Polo UFSCar Sorocaba

SBF
SOCIEDADE BRASILEIRA DE FÍSICA

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

A.1 FABRICAÇÃO DOS EXPERIMENTOS.....	67
A.1.1 Pêndulo de Elástico.....	67
A.1.1 Motor Térmico de Elásticos.....	69
A.2 APLICAÇÃO DO PRODUTO EDUCACIONAL.....	75
A.3 CONTEÚDOS DE FÍSICA QUE PODEM SER ABORDADOS COM OS EXPERIMENTOS.....	79
A.3.1. Calor.....	80
A.3.2 Lei Zero da Termodinâmica e o Conceito de Temperatura.....	82
A.3.3 Trabalho de um Força Variável.....	85
A.3.4 Dilatação Linear dos Sólidos.....	87
A.3.5 Dilatação Superficial dos Sólidos.....	89
A.3.6 Dilatação Volumétrica dos Sólidos.....	89
A.3.7 Dilatação Volumétrica dos Líquidos.....	90
A.3.8 Dilatação Anômala da Água.....	91
A.3.9 Dilatação Anômala da Borracha.....	92
A.3.10 Centro de Massa.....	93
A.3.11 Torque e Centro de Gravidade.....	96
A.3.12 Primeira Lei da Termodinâmica.....	103
A.3.13 Máquinas Térmicas.....	104
A.3.14 Segunda Lei da Termodinâmica.....	107
A.3.15 Terceira da Termodinâmica.....	109

A.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.

A.1.1 Pêndulo de Elástico

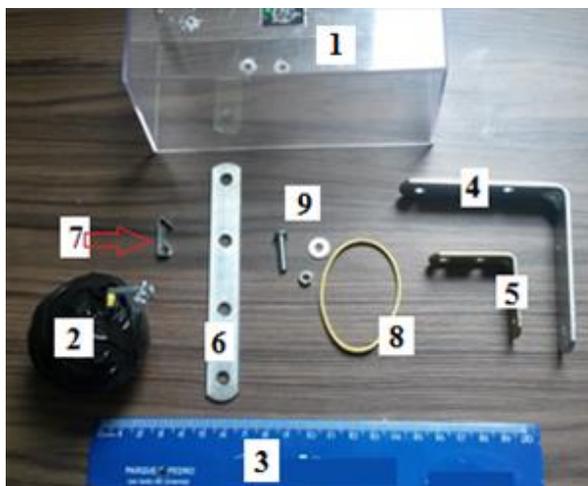
Começaremos pelo pêndulo de elástico por ser o experimento mais simples. Para a construção deste dispositivo serão necessários os seguintes materiais:

- ✓ 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 A1.1 apresentamos os materiais necessários para a construção do aparato experimental para melhor visualização.

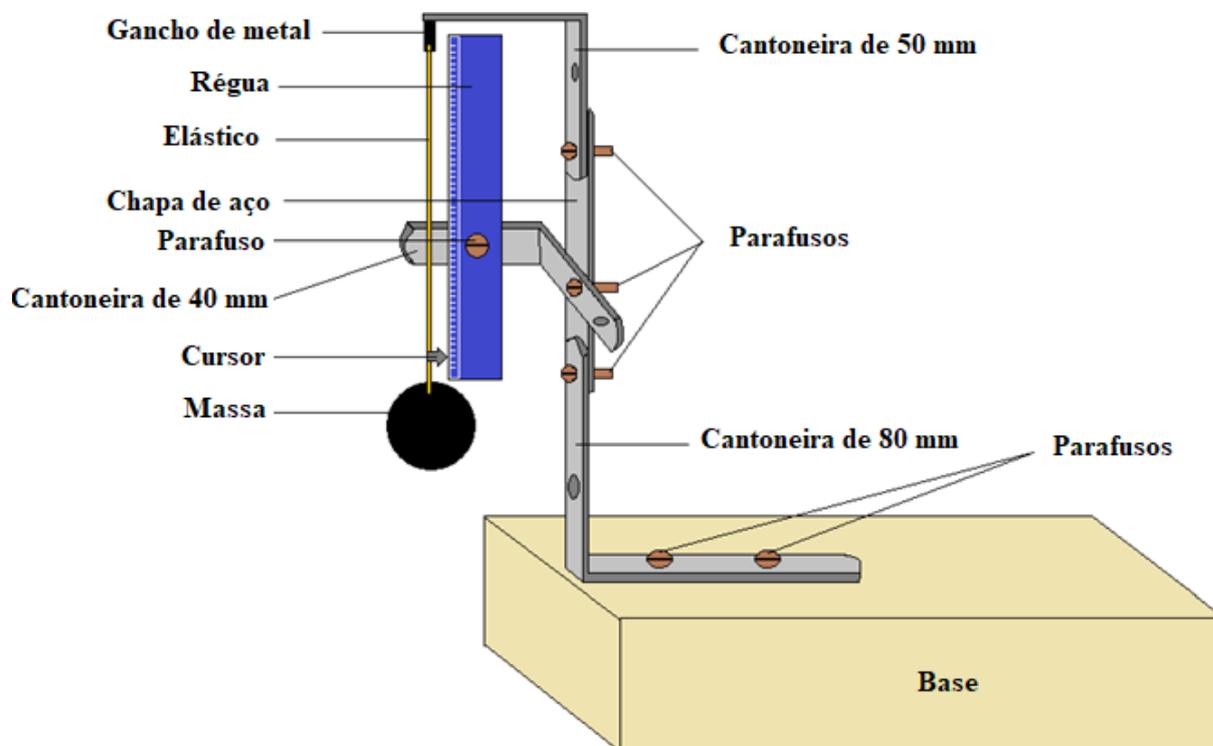
Para a montagem do experimento, faça primeiramente a junção com parafusos das cantoneiras de 80mm e 40mm com a união reta para que tome o formato de um "Z", depois fixe a cantoneira de 80mm à base de acrílico. No segundo furo da união, de baixo para cima, fixe a outra cantoneira de 40mm para servir de suporte para a régua, veja esquema apresentado na figura A1.2.

Figura A1.1: 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 A1.2: 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 A1.3. 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 A1.2 e na foto do dispositivo apresentado da figura A1.3.

Figura A1.3: Pêndulo de elástico montado.



Fonte: Elaborada pelo autor.

A.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 A1.4.

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 A1.5(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 A1.5(B).

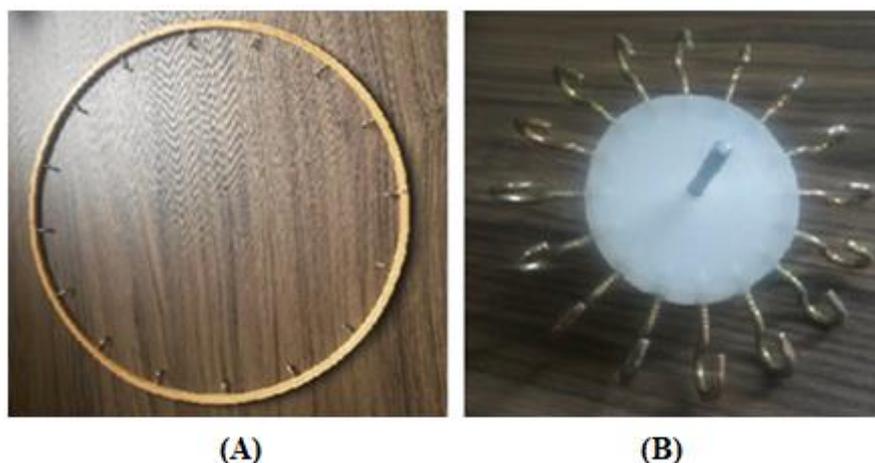
Feita a divisão e fixação dos ganchos de metal, deve-se unir as peças com os elásticos, de acordo com o formato da figura A1.6(A). Esta configuração é necessária para proporcionar um melhor balanceamento da roda. Prendendo os 16 elásticos entre o aro de madeira e o disco de nylon, a roda do motor deve ter a configuração mostrada na figura A1.6(B).

Figura A1.4: 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 A1.5: (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.

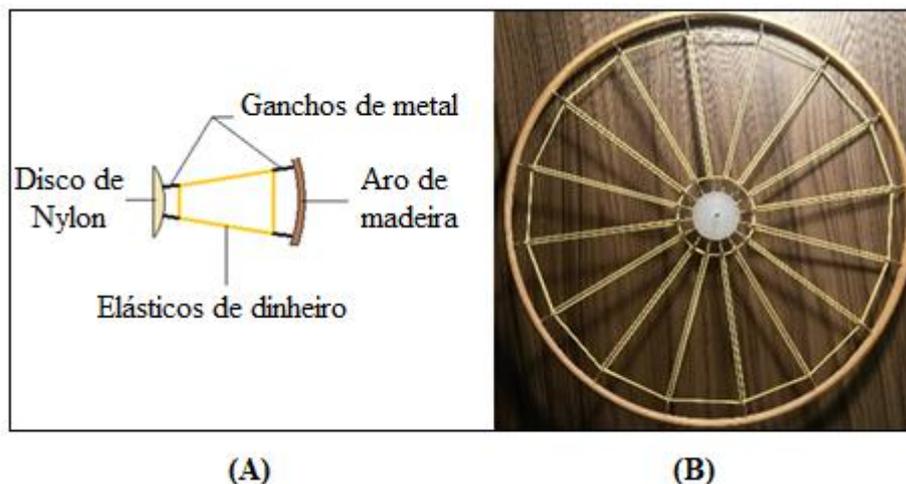


(A)

(B)

Fonte: Elaborada pelo autor.

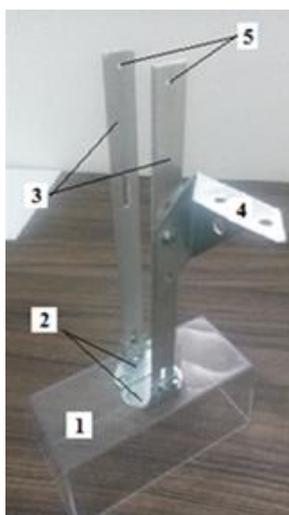
Figura A1.6: (A) Formato de cada elástico ligando o disco de nylon ao aro de madeira e (B) Roda do motor de elásticos.



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 A1.7. Este conjunto irá deixar a roda suspensa e livre para girar.

Figura A1.7: 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.

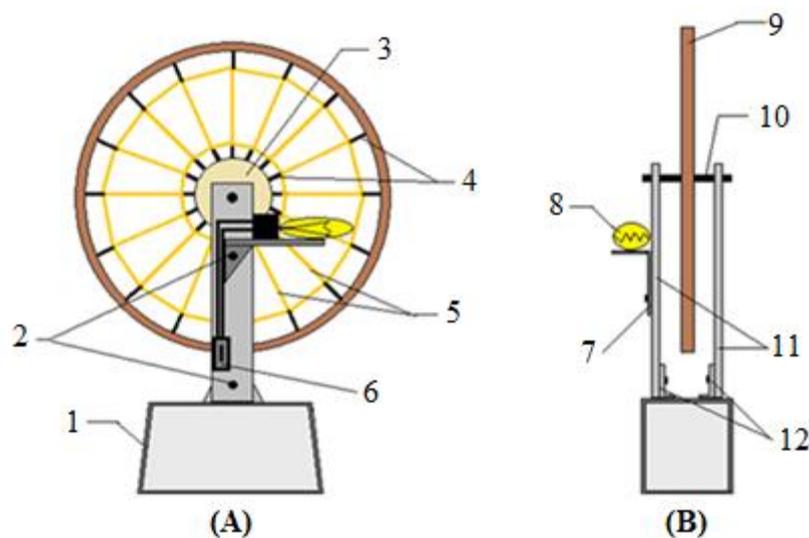


Fonte: Elaborada pelo autor.

O último passo da montagem é a união da roda com o conjunto da figura A1.7 para que a roda fique girando livremente. Na figura A1.8 é apresentada uma ilustração da montagem do

motor de elásticos para se ter uma visão geral do experimento e a figura A1.9 mostra uma fotografia do experimento montado e finalizado.

Figura A1.8: 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 A1.9: Motor de elásticos montado.

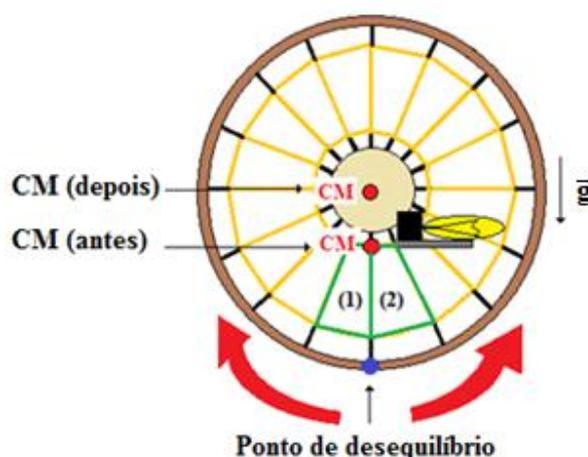


Fonte: Elaborada pelo autor.

A.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 A1.6(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 A1.10 mostra um exemplo das regiões (1) e (2) onde foram adicionados os elásticos.

Figura A1. 1: 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.

A.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 elásticos 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.

A2.1 Etapas da Aplicação do produto educacional

ETAPA 1: Duas aulas de 50 minutos cada.

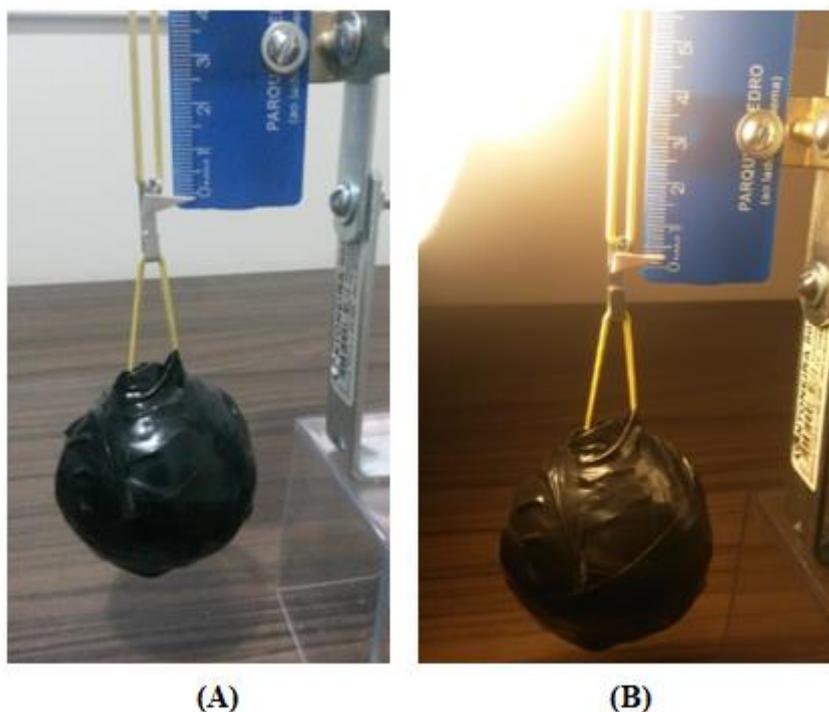
Objetivos:

- 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 A2.1(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 A2.1(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.

Figura A2.1: 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.

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.

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.

ETAPA 2: 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.

ETAPA 3: 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.

ETAPA 4: 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 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.

ETAPA 5: 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.

A.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.

A.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 A3.1.

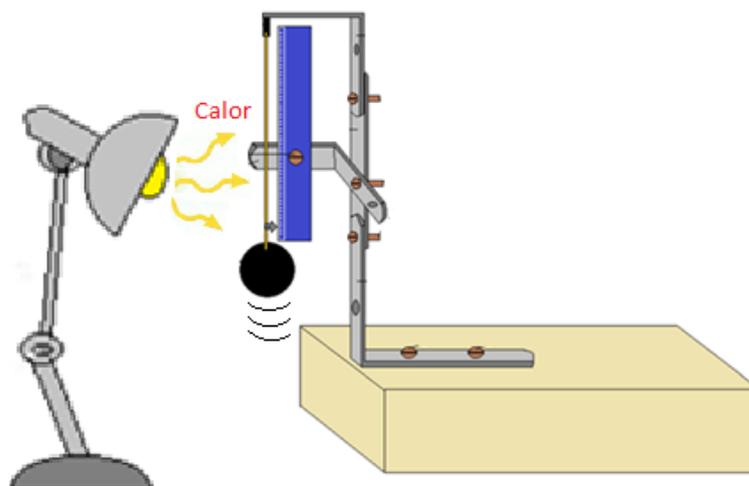
Neste momento o professor pode também fornecer uma contextualização histórica sobre a natureza do calor.

Existiam duas hipóteses alternativas sobre a natureza do calor no final o 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

atrato, exemplificada pelo “método do escoteiro” para acender uma fogueira ou pelo aquecimento de um ferro martelado por 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).

Figura A3.1: Energia térmica sendo transferida da lâmpada, fonte térmica, para o elástico através do calor.



Fonte: Elaborada pelo autor.

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.

A.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.

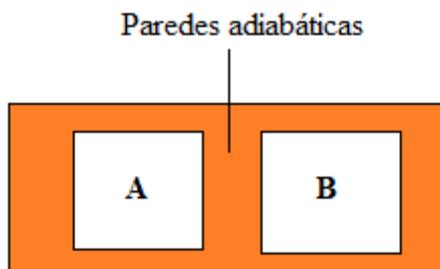
Quando dois sistemas estão separados por uma parede diatérmica dizemos que os sistemas estão em contato térmico e quando dois sistemas estão separados por uma parede adiabática dizemos que os sistemas estão isolados um do outro termicamente. Este isolamento pode ser realizado de forma geral, de modo 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 A3.2. 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.

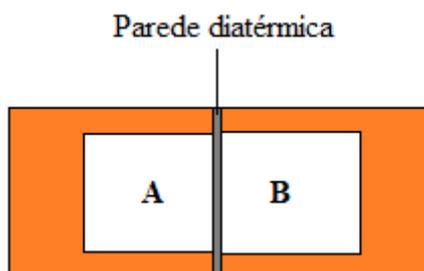
Se substituirmos as paredes que separam os dois sistemas por uma parede diatérmica, como ilustrado na figura 3.3, os sistemas A e B estarão em contato térmico. Com isso os sistemas irão evoluir para um outro estado de equilíbrio dado por A+B, que será diferente dos estados iniciais A e B se considerarmos 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 A3.2: 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.

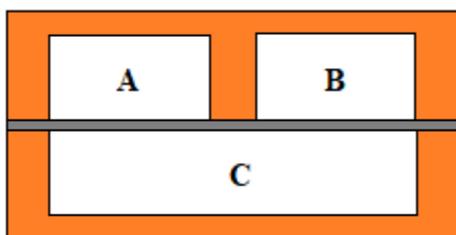
Figura A3.3: Sistemas A e B separados por uma parede diatérmica evoluindo para o equilíbrio térmico, o qual ocorre quando $T_A = T_B$.



Fonte: Elaborada pelo autor.

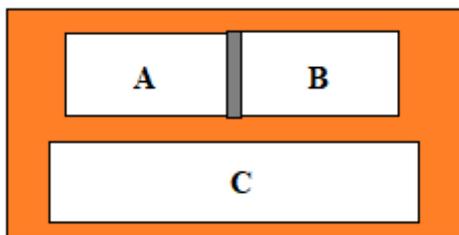
Vamos agora considerar uma situação com três sistemas (A, B e C) onde A e B estão em contato com C e isolados entre si, como ilustrado na figura A3.4.

Figura A3.4: 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 A3.5?

Figura A3.5: Sistemas A e B em contato térmico e isolados do sistema C.

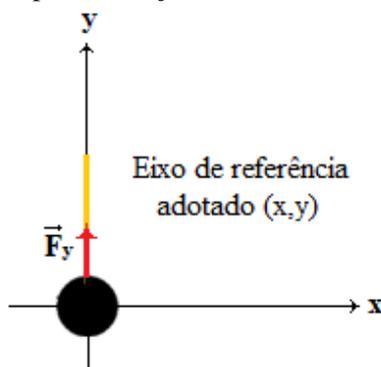
Fonte: Elaborada pelo autor.

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.

A.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.

Figura A3.6: Eixo de referência adotado para definição do trabalho de uma força variável F_y , causada pela dilatação do elástico.

Fonte: Elaborada pelo autor.

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:

$$F = F(y) \quad (\text{A3.1})$$

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

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

$$\Delta W_k \approx F(y_k)\Delta y_k \quad (\text{A3.2})$$

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.(A3.2). Fazendo o limite da somatória de todas as contribuições para $\Delta y_k \rightarrow 0$, ou seja,

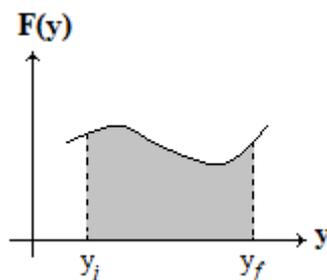
$$W_{y_i \rightarrow y_f} = \lim_{\Delta y_k \rightarrow 0} \sum_k F(y_k)\Delta y_k, \quad (\text{A3.3})$$

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

$$W_{y_i \rightarrow y_f} = \int_{y_i}^{y_f} F(y)dy. \quad (\text{A3.4})$$

Esta representa a área sob a curva de $F(y)$, na região que vai de y_i até y_f , como ilustrado na figura A3.7.

Figura A3.7: O trabalho realizado pela força é dado pela área do gráfico $F(y)$ vs y da posição y_i até y_f .



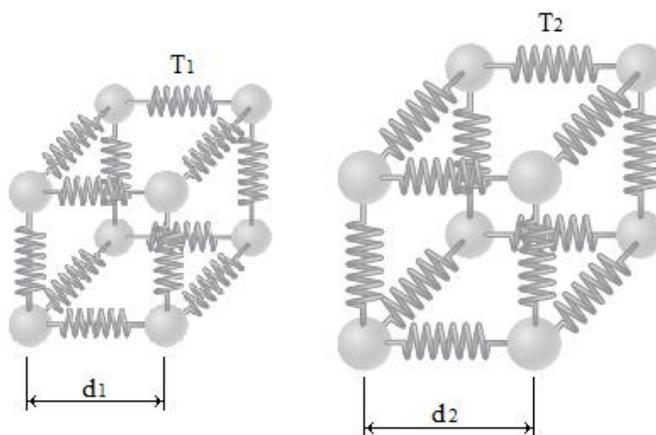
Fonte: Elaborada pelo autor.

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.

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 A3.8 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 A3.8: 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)

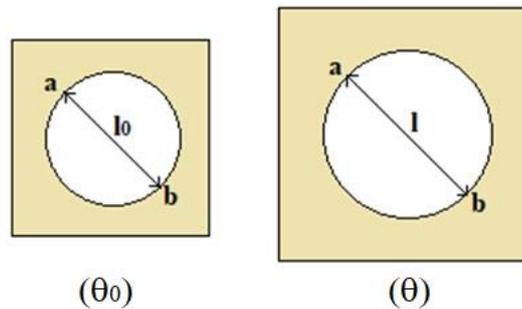
A.3.4 Dilatação Linear dos Sólidos

Considerando uma lâmina de um material sólido com um furo circular de diâmetro inicial $d = l_0$, como ilustrado na figura A3.9, 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,

$$\Delta l = \alpha l_0 \Delta \theta. \quad (\text{A3.5})$$

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 A3.9: 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 a região de temperatura que estamos trabalhando α é constante.

Sendo $\Delta l = l - l_0$ e $\Delta \theta = \theta - \theta_0$ a eq.(A3.5) pode ser reescrita como,

$$l = l_0[1 + \alpha(\theta - \theta_0)]. \quad (\text{A3.6})$$

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.

A.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,

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

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,

$$A = A_0(1 + \beta \Delta \theta), \quad (\text{A3.7})$$

em que o coeficiente $\beta = 2\alpha$ é 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.

A.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 $V_0 = A_0 l_0$. Utilizando o mesmo raciocínio anterior e as eqs.(A3.6) e (A3.7), o volume V do cilindro após o aquecimento é dado por,

$$\begin{aligned} V &= Al = A_0(1 + 2\alpha \Delta \theta)l_0(1 + \alpha \Delta \theta), \\ V &= A_0 l_0 [1 + \alpha \Delta \theta + 2\alpha \Delta \theta + 2(\alpha \Delta \theta)^2], \\ \therefore V &\cong V_0(1 + \gamma \Delta \theta), \end{aligned} \quad (\text{A3.8})$$

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

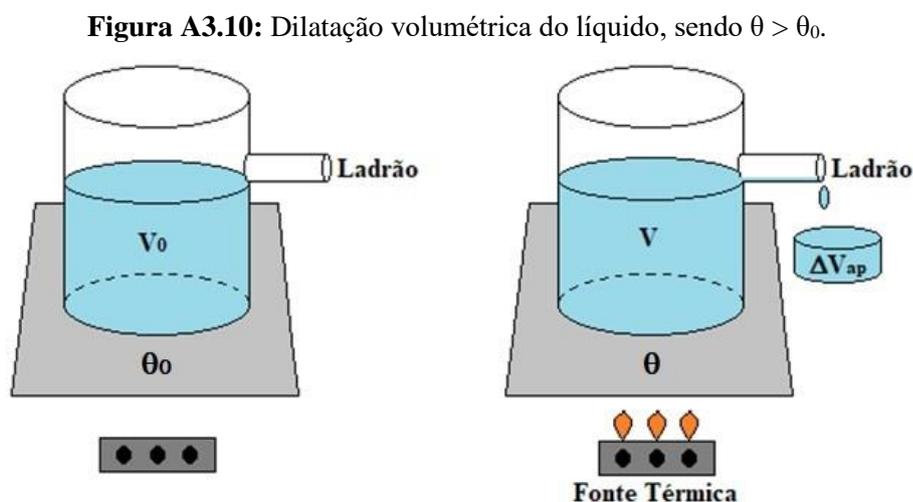
A.3.7 Dilatação Volumétrica dos Líquidos

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 A3.10.



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:

$$\Delta V_{\text{real}} = \Delta V_{\text{aparente}} + \Delta V_{\text{recipiente}} \quad (\text{A3.9})$$

A expressão da variação do volume de um líquido é a mesma daquela obtida para um sólido isotrópico, eq.(A3.8), 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,

$$\gamma_{real} = \gamma_{aparente} + \gamma_{recipiente}, \quad (A3.10)$$

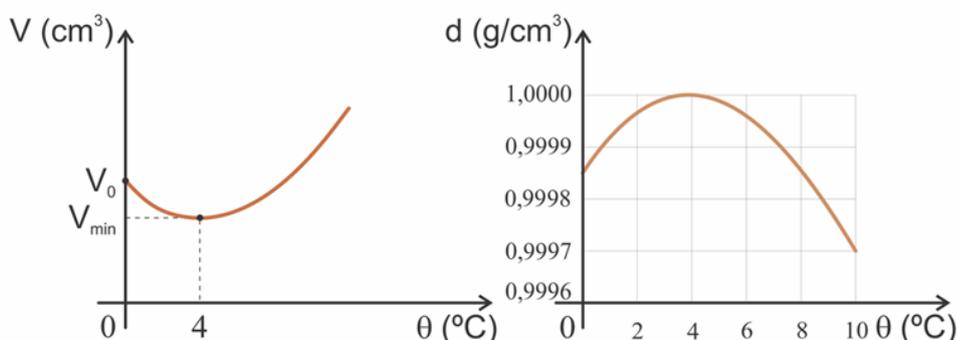
mostrando que a dilatação volumétrica real de um líquido é maior do que aparenta ser, devido à dilatação do recipiente.

A.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 A3.11. 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 A3.11: 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>.

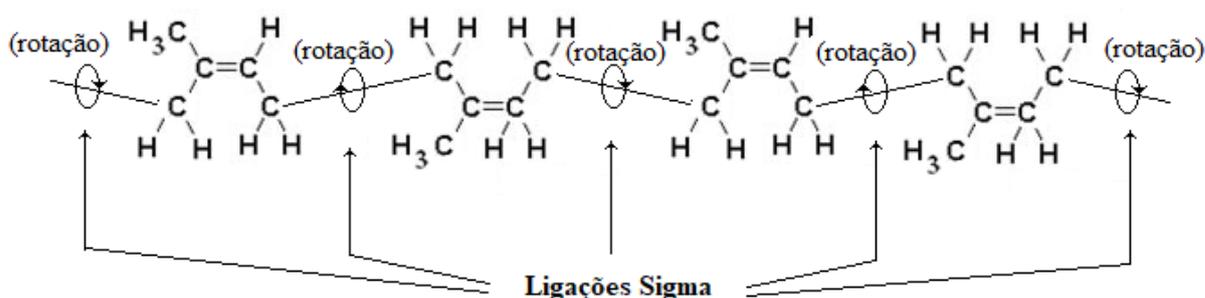
Acesso em: 07 jan. 2019.

A.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 A3.12) 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 A3.12: Monômeros C_5H_8 conectados por ligações σ entre carbonos, ao redor das quais podem ocorrer rotações.



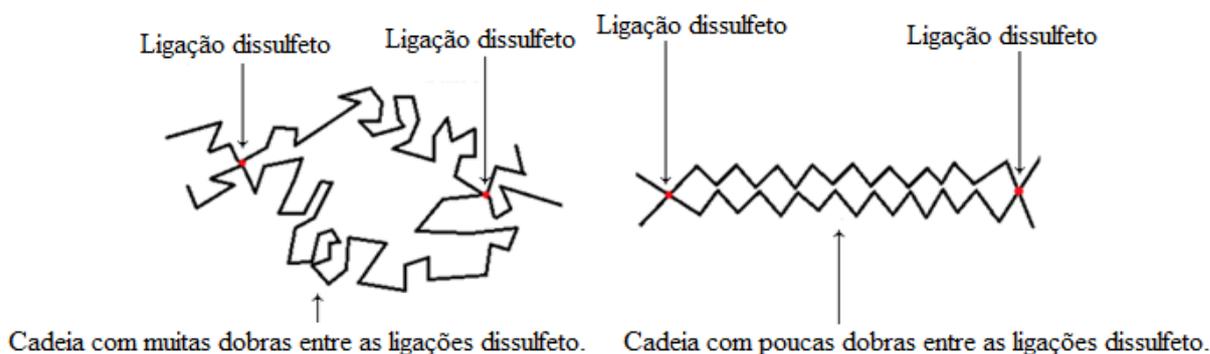
Fonte: Elaborada pelo autor.

Na figura A3.13 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 A3.13: 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 à Mecânica e a Termodinâmica.

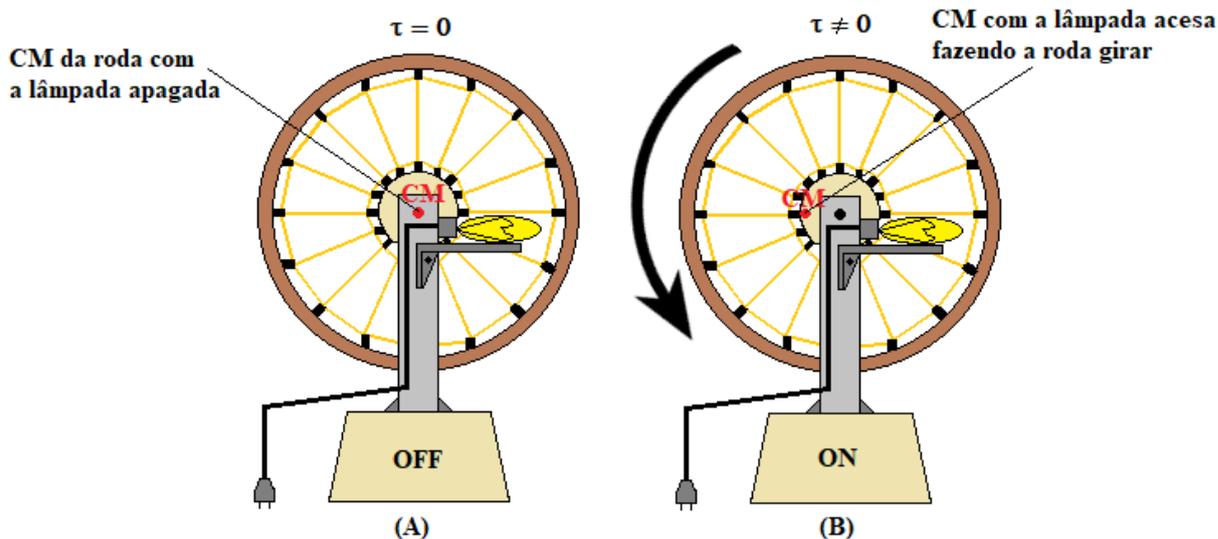
A.3.10 Centro de Massa

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 conseqüentemente 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, 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 do CM, pois é a partir da mudança dele que a roda perde o equilíbrio e começa a girar, veja ilustração na figura A3.14. Isso será melhor explicado na próxima seção. Nesta vamos apenas discutir como podemos localizar o CM de um sistema.

Figura A3.14: (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 A3.15 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 A3.15, é definida por:

$$x_{CM} = \frac{m_1 x_1 + m_2 x_2}{m_1 + m_2} \quad (\text{A3.11})$$

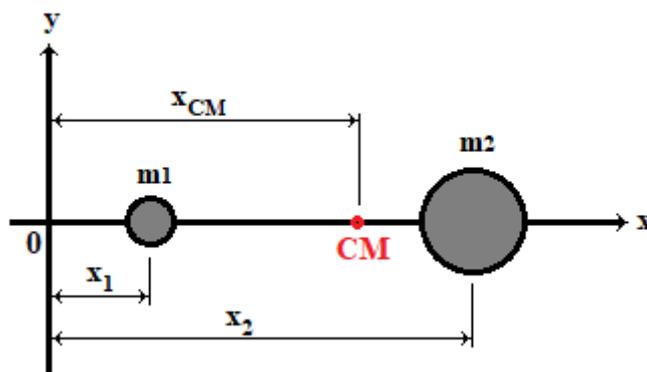
Para um sistema com n partículas ao longo do eixo- x a massa total é dada pela soma das massas,

$$M = m_1 + m_2 + m_3 + \dots + m_n \quad (\text{A3.12})$$

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

$$x_{CM} = \frac{m_1x_1 + m_2x_2 + m_3x_3 + \dots + m_nx_n}{M} \quad (\text{A3.13})$$

Figura A3.15: 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.(A3.13) pode também ser escrita de forma compacta utilizando o sinal de somatório como:

$$x_{CM} = \frac{1}{M} \sum_{i=1}^n m_i x_i \quad (\text{A3.14})$$

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:

$$\vec{r}_{CM} = \frac{1}{M} \sum_{i=1}^n m_i \vec{r}_i \quad (\text{A3.15})$$

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.(A3.15) passa a ser escrito como uma integral e a coordenada do centro de massa fica,

$$\vec{r}_{CM} = \frac{1}{M} \int_0^M \vec{r} dm. \quad (\text{A3.16})$$

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

$$\rho(\vec{r}) = \frac{dm(\vec{r})}{dV} \rightarrow dm(\vec{r}) = \rho(\vec{r})dV. \quad (\text{A3.17})$$

Substituindo a eq.(A3.17) na eq.(A3.16), obtemos para um caso geral,

$$\vec{r}_{CM} = \frac{1}{M} \int_V \vec{r} \rho(\vec{r})dV, \quad (\text{A3.18})$$

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 A3.15 ou corpos simétricos com densidade constante. Nestes casos o CM de massa coincidirá com o centro geométrico, ou centroide, do corpo.

A.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

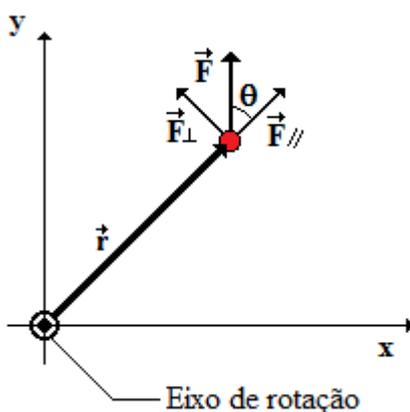
mesmo. Portanto, quando a roda começa a rotacionar significa que uma força está agindo sobre ela. Mas que força é essa? É a força devido ao campo gravitacional da Terra, ou seja, é a força da gravidade.

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 A3.16 mostra o ponto de aplicação de uma força \vec{F} a uma distância \vec{r} do eixo de rotação de um sistema.

Figura A3.16: 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,

$$\vec{\tau} = \vec{r} \times \vec{F}. \quad (\text{A3.19})$$

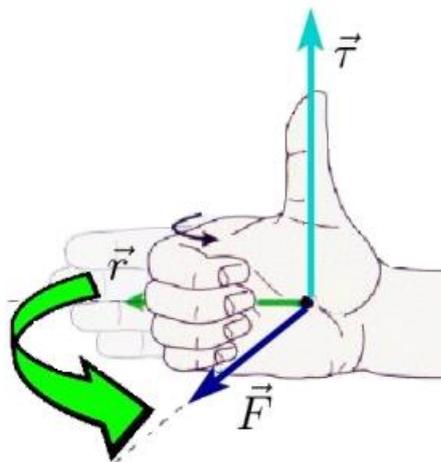
Usualmente a distância entre o ponto de aplicação da força e o eixo de rotação do sistema é chamado de braço de alavanca. Se a direção do vetor força fizer um ângulo θ com a direção do vetor posição, podemos escrever a eq.(A3.19) como,

$$\vec{\tau} = rF \text{sen}\theta (\hat{r} \times \hat{F}) \quad (\text{A3.20})$$

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 A3.17.

Figura A3.17: 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} .



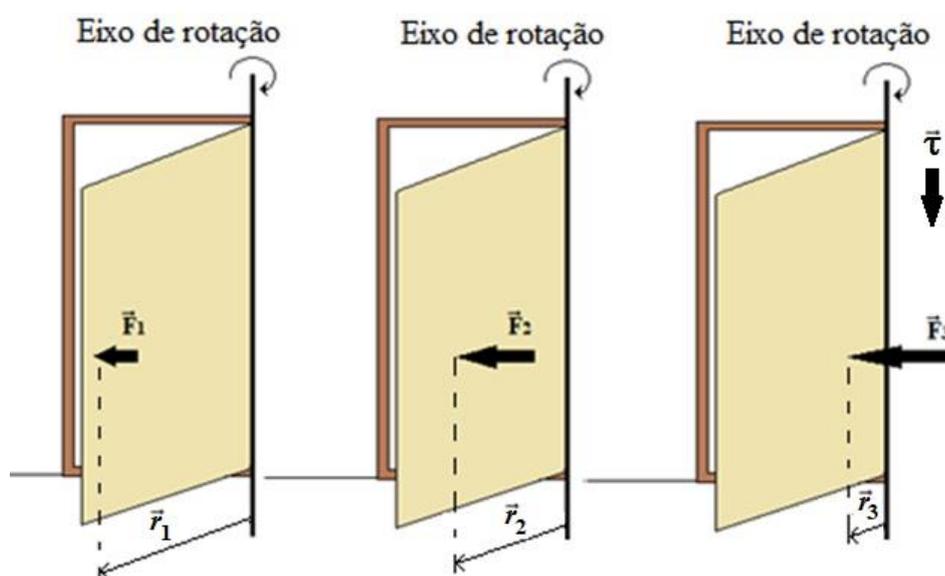
Fonte: OLIVEIRA, I. Cinemática e dinâmica de rotações. “Disponível em:”
<http://prog.ufabc.edu.br/mnpef-sites/leis-de-conservacao/cinematica-e-dinamica-de-rotacoes/>.
 Acesso em: 07 jan. 2019.

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 A3.18. 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.(A3.20) 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 A3.18 possui direção vertical para baixo.

Figura A3.18: Exemplo de torque e obtenção de maior eficiência de uma força no dia a dia dos alunos. Vemos que quanto maior a distância d 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 o campo gravitacional, 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.(A3.17) e escrever a força gravitacional resultante na roda como,

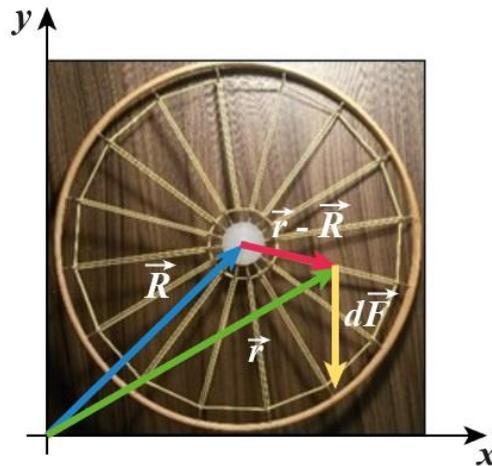
$$\vec{F} = \int_V \rho(\vec{r}) \vec{g} dV. \quad (\text{A3.21})$$

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 A3.19. 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 A3.19: 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,

$$\therefore \vec{\tau} = \left[\int_V (\vec{r} - \vec{r}_{CM}) \rho(\vec{r}) dV \right] \times \vec{g}. \quad (\text{A3.22})$$

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.(A3.22) 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.(A3.22), 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 A3.20.B.

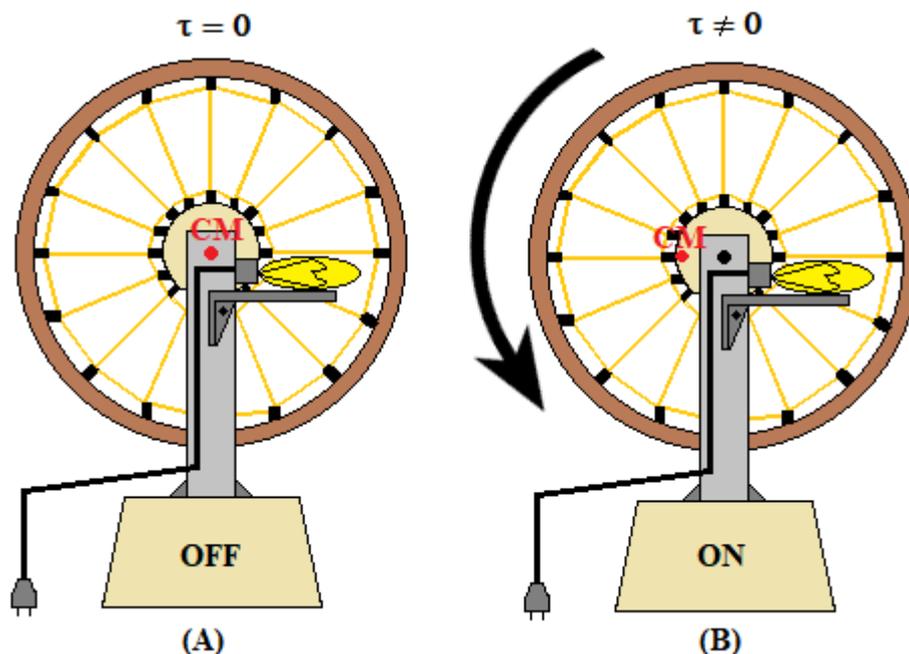
Concluimos então que o equilíbrio estático da roda do motor térmico de elásticos só é garantido se a somatória das forças e dos torques das forças forem iguais a zero.

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.

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.

Figura A3.20: 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.

A.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.

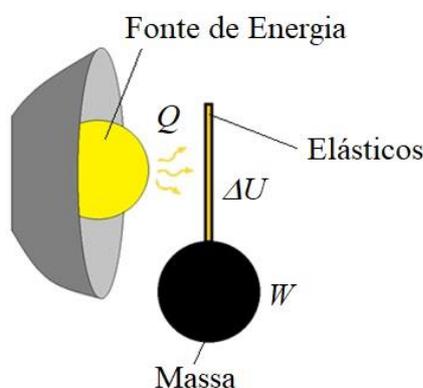
Vamos analisar a situação do pêndulo elástico, representado na figura A3.21, onde a lâmpada fornece energia ao elástico através do calor (Q). Com isso, parte desta energia servirá para alterar a temperatura do elástico e conseqüentemente alterar sua energia interna (ΔU). A outra parte da energia faz com que os elásticos realizem trabalho (W) e eleve a massa.

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

$$\Delta U = Q - W, \quad (\text{A3.23})$$

se a reescrevermos da seguinte forma $Q = \Delta U + W$. Como descrito no parágrafo anterior, parte da energia total absorvida pelos elásticos, 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 pelos elásticos pela realização de trabalho W .

Figura A3.21: Quando a lâmpada é acesa energia é transferida aos elásticos 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.

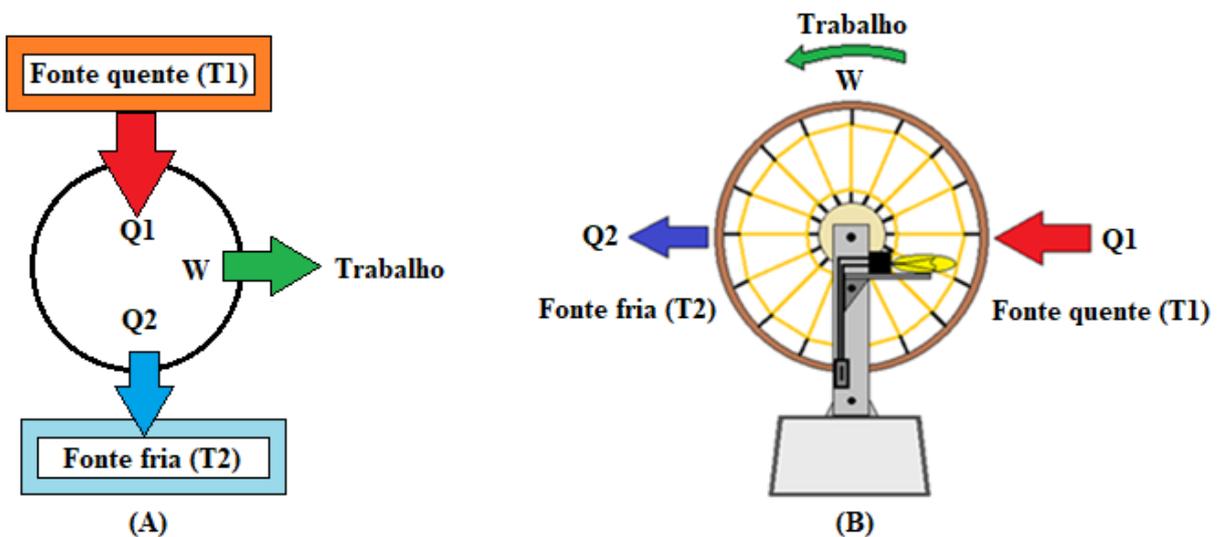
A.3.13 Máquinas Térmicas

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 A3.22 (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.

Figura A3.22: 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.

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.(A3.23) nos permite escrever,

$$\begin{aligned} 0 &= (Q_1 - Q_2) - W \\ \therefore Q_1 &= Q_2 + W. \end{aligned}$$

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,

$$\eta = \frac{W}{Q_1} = \frac{Q_1 - Q_2}{Q_1} \quad \rightarrow \quad \eta = 1 - \frac{Q_2}{Q_1} \quad (\text{A3.24})$$

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.

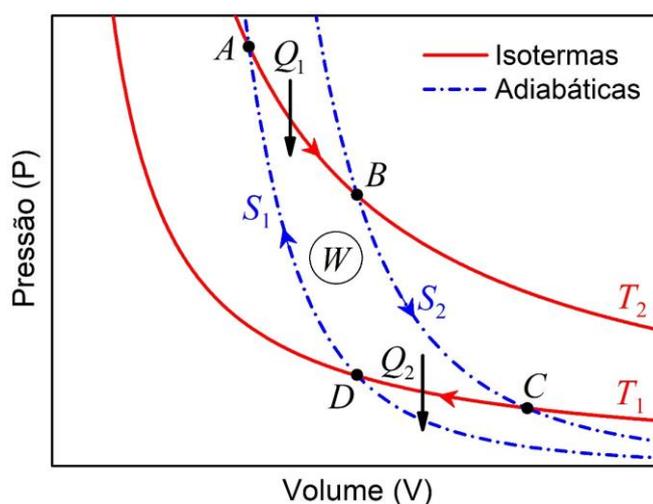
Se o professor quiser ir além e introduzir o conceito de entropia ele pode explorar o fluxo espontâneo de energia através de calor entre as fontes térmicas do motor de elásticos. A entropia é uma medida da irreversibilidade dos processos envolvidos no sistema, como o fluxo espontâneo de calor. Como esse 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 A3.23.

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 A3.23: 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:

$$\eta = 1 - \frac{T_2}{T_1} \quad (\text{A3.25})$$

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.(A3.26) 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.

A.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.

A.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.

ANEXO

QUESTIONÁRIOS

Questões (Aula 1)

Questionário para a verificação dos conhecimentos prévios dos alunos. Este deve ser passado no início da aula, antes da apresentação da imagem da usina nuclear.

Q.01 – Defina o que é Temperatura.

Q.02 – Defina o que é Energia.

Q.03 – Defina o que é Calor.

Q.04 – Defina o que é Trabalho.

Questionário para a verificação das observações e hipóteses dos alunos com relação ao experimento do pêndulo de elásticos.

Q.01 – No experimento do pêndulo, o que você observou após a lâmpada ser acesa?

Q.02 – No experimento do pêndulo, o que você observou após a lâmpada ser apagada?

Q.03 – Qual a sua hipótese sobre a(s) causa(s) do fenômeno observado?

Q.04 – O fenômeno observado pode ser considerado uma dilatação térmica? Explique.

Questões (Aula 2)

Questionário para a verificação dos conhecimentos adquiridos pelos alunos na aula 1. Este deve ser passado no início da aula, antes do início da segunda aula.

Q.01 – Defina o que é Temperatura.

Q.02 – Defina o que é Energia.

Q.03 – Defina o que é Calor.

Q.04 – Defina o que é Trabalho.

Q.05 – Houve realização de trabalho no experimento do pêndulo que demonstramos na aula anterior? Explique.

Questionário para a verificação das observações e hipóteses dos alunos com relação ao experimento do motor térmico de elásticos.

Q.01 – O que você observou após a lâmpada ser acesa?

Q.02 – Qual a sua hipótese sobre o funcionamento do motor térmico de elásticos? Tente explicar, através das observações feitas, como ele funciona.

Questões (Aula 3)

Questionário para a verificação dos conhecimentos prévios dos alunos – Deve ser passado no início da aula, antes da explicação dos conteúdos.

Q.01 – O que é movimento de translação? Dê um exemplo.

Q.02 – O que é movimento de rotação? Dê um exemplo.

Q.03 – O que é equilíbrio?

Questionário para a verificação das observações e hipóteses dos alunos com relação ao experimento do motor térmico de elásticos. O objetivo, com este questionário, é que os alunos criem hipóteses utilizando os conceitos de mecânica como torque e descrever as condições para que haja equilíbrio. A pergunta deve ser feita no final da aula.

Q.01 – Crie uma hipótese para descrever o funcionamento do motor térmico de elásticos considerando os efeitos térmicos e os fenômenos mecânicos.

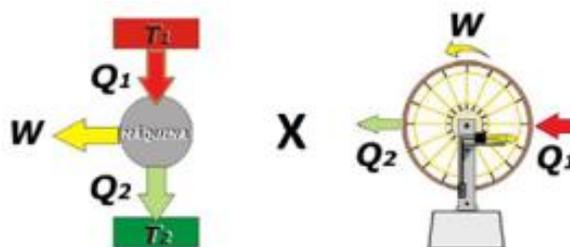
Questões (Aula 4)

Questionário para ser passado no final da aula sobre máquinas térmicas.

Q.01 – O que é uma máquina térmica? Qual a sua função?

Q.02 – Foram discutidas três leis da termodinâmica. Explique o que é cada uma das leis.

Q.03 – Faça uma comparação com uma máquina térmica e o experimento do motor térmico de elásticos.



Questões (Final da Aplicação)

Este questionário foi passado alunos para que tivéssemos a impressão deles com relação a metodologia e aplicação de nossa proposta.

Q.01 – Você gostou das aulas utilizando experimentos? O que você mais gostou?

Q.02 – O método utilizado pelo professor facilitou o entendimento dos fenômenos físicos?

Q.03 – Os experimentos tiveram um papel importante para o entendimento dos conceitos estudados? Eles chamaram sua atenção? Porquê?

Q.04 – Você gostaria de ter mais aulas deste tipo? Porquê?

Q.05 – Você tem alguma sugestão de melhoria para as aulas?