

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

**ANÁLOGO MECÂNICO PARA A DISCUSSÃO DE
CONCEITOS DA TERMODINÂMICA**

RODRIGO DA SILVA

ORIENTADOR: PROF. DR. JAMES ALVES DE SOUZA

Sorocaba - SP
Março de 2021

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

**ANÁLOGO MECÂNICO PARA A DISCUSSÃO DE
CONCEITOS DA TERMODINÂMICA**

RODRIGO DA SILVA

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
Março de 2021

RODRIGO DA SILVA

**ANÁLOGO MECÂNICO PARA A DISCUSSÃO DE CONCEITOS DA
TERMODINÂMICA**

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 23 de dezembro de 2020.

Orientador:



Prof. Dr. James Alves de Souza
UFSCar – Sorocaba

Examinador:



Prof. Dr. Edemar Benedetti Filho
UFSCar – Sorocaba

Examinador:



Prof. Dr. Neilo Marcos Trindade
IFSP – São Paulo

Silva, Rodrigo da

Análogo mecânico para a discussão de conceitos da
Termodinâmica / Rodrigo da Silva -- 2020.
76f.

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

Orientador (a): James Alves de Souza

Banca Examinadora: Edemar Benedetti Filho, Neilo
Marcos Trindade

Bibliografia

1. Termodinâmica. 2. Analogias. 3. Ensino de física. I.
Silva, Rodrigo da. II. Título.

Ficha catalográfica desenvolvida pela Secretaria Geral de Informática
(SIn)

DADOS FORNECIDOS PELO AUTOR

Bibliotecário responsável: Maria Aparecida de Lourdes Mariano -
CRB/8 6979

DEDICATÓRIA

Dedico esta dissertação a Deus, a minha esposa Viviane Roberta da Silva, pela atenção e carinho que me incentivou a continuar escrevendo. Ao meu filho Murilo Silva e Silva que me trouxe alegria em momentos de tensão. A minha mãe que sempre me mostrou o valor do trabalho honesto e digno. Enfim, dedico esta dissertação a todos que contribuíram para o meu desenvolvimento e aprendizado durante o mestrado.

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, sugestões e correções e aos colegas mestrandos Mauro Rodrigues Alves e Bruno Silva pelas frutíferas discussões que possibilitaram o aprimoramento das ideias e o fechamento deste trabalho.

Agradeço à minha família pelo incentivo aos estudos e por reconhecer a importância dessa dissertação no meu desenvolvimento profissional.

Agradeço à UFSCar e aos professores que contribuíram efetivamente nas disciplinas ministradas.

“Não é possível refazer este país, democratizá-lo, humanizá-lo, torná-lo sério, com adolescentes brincando de matar gente, ofendendo a vida, destruindo o sonho, inviabilizando o amor. Se a educação sozinha não transformar a sociedade, sem ela tampouco a sociedade muda.”

Paulo Freire

RESUMO

DA SILVA, Rodrigo. Análogo Mecânico para a Discussão de Conceitos da Termodinâmica. 2020. Dissertação (Mestrado em Ensino de Física) – Universidade Federal de São Carlos, campus Sorocaba, Sorocaba, 2020.

O ensino de Física na educação básica, além de fornecer uma base científica aos alunos para o estudo da natureza, é muito importante para apresentar aos mesmos, oportunidades de carreira em áreas como ciência, tecnologia, engenharia, medicina, entre outras. Diante disso, questões sobre um método otimizado para ensinar e aprender Física têm sido insistentemente feitas por professores e pesquisadores experientes e inexperientes assim como licenciados que estão se preparando para ensinar. Uma resposta universal para estas perguntas é praticamente impossível de ser fornecida devido aos diferentes objetivos e condições de ensino de cada escola ou região. Existem inúmeras abordagens e direções que podem ser tomadas e provavelmente a “melhor forma” de ensinar qualquer disciplina não exista, pois ensinar de maneira efetiva depende de vários fatores, como o professor, os conhecimentos prévios dos alunos, idade, infraestrutura e o currículo da escola, entre outros. Neste trabalho abordamos o ensino da Termodinâmica utilizando analogias, através da estrutura guia do modelo TWA (*Teaching With Analogies*), a partir de um experimento composto por vasos comunicantes e alguns acessórios para simular sistemas termodinâmicos em contato térmico. Com isso foi possível discutir de maneira mais detalhada conceitos como temperatura, calor, energia, trabalho, capacidade térmica e a relação destes com a Lei Zero, a Primeira e a Segunda Leis da Termodinâmica. A proposta foi aplicada em uma escola particular do interior de São Paulo para 40 alunos cursando o 2º e 3º anos do Ensino Médio em 4 aulas de 45 minutos. Nossa sequência didática foi dividida em 3 atividades, sendo a primeira voltada para o mapeamento dos conhecimentos prévios dos alunos, através de uma pesquisa de opinião, a segunda para apresentação e execução do experimento abordando todos os tópicos propostos, utilizando as analogias, e a terceira foi o fechamento das atividades através de um questionário dissertativo. Concluímos que a aplicação de nossa proposta foi bastante satisfatória, pois com o uso das analogias foi possível estabelecer discussões mais coerentes com a realidade física e científica dos sistemas em estudo, proporcionando maior interação entre o professor e os alunos e entre os alunos, com os mesmos realizando as atividades com maior empenho e motivação. Nosso produto educacional é composto pelo experimento dos três vasos comunicantes e uma sequência didática sugestiva para abordar os conceitos da Termodinâmica através das analogias propostas, na tentativa de melhor esclarecer, principalmente, as diferenças entre calor, temperatura e energia, para que estes possam ser definidos e utilizados no dia a dia dos alunos de maneira mais adequada.

Palavras-chave: Termodinâmica. Experimentação. Analogias. Calor. Ensino de Física.

ABSTRACT

DA SILVA, Rodrigo. Mechanical Analog for the Discussion of Thermodynamics Concepts. 2020. Master's Thesis (Master's Degree in Physics Teaching) – Universidade Federal de São Carlos, *campus* Sorocaba, Sorocaba, 2020.

Teaching physics in basic education, in addition to providing a scientific basis for students to study nature, is very important to present to them career opportunities in science, technology, engineering, medicine, among others. Therefore, questions about an optimized method for teaching and learning physics have been insistently asked by both experienced and inexperienced teachers and researchers as well as by students preparing to be a teacher. A universal answer to these questions is practically impossible to provide, owing the different teaching objectives and conditions of each school or region, which are changing dynamically. There are countless approaches and directions that can be taken and probably the “best way” to teach any discipline does not exist. For effective teaching and learning it is necessary to take into consideration several factors such as the teacher, students' prior knowledge, age, the infrastructure and the school curriculum, among others. In this work we approach the teaching of thermodynamics using analogies, through the guide structure of the “Teaching With Analogies” (TWA) model, from an experiment composed of communicating vessels and some accessories to simulate thermodynamic systems in thermal contact. This approach enables us to discuss in more detail concepts such as temperature, heat, energy, work, thermal capacity and their relationship with the Zeroth, the First and the Second Laws of Thermodynamics. The proposal was applied in a private school in the interior of São Paulo for 40 students attending junior and senior years of high school in four classes of forty-five minutes duration. Our didactic sequence was divided into 3 activities, the first focusing on mapping the students' previous knowledge through an opinion survey, the second for presenting and executing the experiment, covering all the proposed topics using the analogies, and in the third an essay questionnaire was provided for the students write about the subject addressed. We concluded that the application of our proposal was successful. By using analogies we established more coherent discussions with the physical and scientific reality of the studied systems, providing greater interaction between the teacher and the students and among students. The students also carried out the activities with greater engagement and motivation. Our educational product is composed by the communicating vessels experiment and a suggestion of how to approach the thermodynamic concepts using the proposed analogies, in an attempt to better clarify mainly the difference among the concepts of heat, temperature and energy, so that they can be defined and used in the students' daily lives more appropriately.

Keywords: Thermodynamics. Experimentation. Analogies. Heat. Physics Teaching.

LISTA DE FIGURAS

- Figura 3. 1 – Experimento do nosso produto educacional montado mostrando as três colunas, A e B feitas com mangueiras transparentes de uma polegada e meia ($1\frac{1}{2}$ ”) e C de $\frac{1}{2}$ ”, todas com 40 cm de comprimento. Para fazer o vaso comunicante entre as colunas foi utilizada uma mangueira transparente de $\frac{1}{4}$ ” e 50 cm de comprimento. Dois registros de $\frac{1}{4}$ ”, R_{AB} e R_{BC} , foram instalados entre as colunas AB e BC, respectivamente. Uma fonte de energia elétrica de 12V foi instalada próximo à coluna A junto a um interruptor (1) para acionar a bomba de gasolina (2) responsável por bombear o líquido do sistema para a coluna A. As conexões entre a mangueira que forma o vaso comunicante e as colunas foram feitas com conectores do tipo espigão fixo macho de $\frac{1}{4}$ ” com rosca de $\frac{1}{4}$ ” (3), nos registros e nas colunas A e C, e um do tipo T (4) na coluna B. Todo o dispositivo foi fixado com parafusos em um painel de MDF de 1,0 m de largura por 0,5 m de altura utilizando braçadeiras para tubo em forma de U com dimensões adequadas para cada parte do experimento. Para manter o aparato na vertical foram utilizadas 4 cantoneiras de (50 x 50) mm (5) que funcionaram como pés de sustentação para o experimento. As escalas apresentadas ao lado das três colunas estão todas no mesmo nível e possuem resolução de 1 cm para melhor verificar e comparar a altura das colunas de líquido formadas durante o funcionamento do dispositivo. 14
- Figura 3. 2 - Esquema de um sistema termodinâmico mostrando sua fronteira, sua vizinhança e possíveis forças externas que podem influenciar em suas propriedades. 16
- Figura 3. 3 – (a) Representação de dois sistemas termodinâmicos A e B com paredes adiabáticas, isolados do meio que se encontram e entre si. (b) Contato térmico estabelecido entre os sistemas A e B, mantendo os mesmos isolados do meio por paredes adiabáticas e (c) contato térmico estabelecido entre os sistemas A e C e entre B e C, mantendo A e B separados por paredes adiabáticas. Como o meio externo não exerce nenhuma influência nestes sistemas, os seus estados de equilíbrio são caracterizados pelas temperaturas T_A e T_B em (a), T_{A+B} em (b) e T_{A+B+C} em (c). 17
- Figura 3. 4 – Análogo mecânico do processo realizado na figura 3.3(a) mostrando à esquerda o análogo do contato térmico entre A e B pela abertura do registro R_{AB} mantendo o registro R_{BC} fechado, com E_M (líquido) fluindo espontaneamente da coluna A para a coluna B, pois a altura da coluna líquida de A (T_{MA}) é maior que a da coluna B (T_{MB}), ou seja, $T_{MA} > T_{MB}$. Esta é a condição análoga para a energia térmica fluir espontaneamente do sistema termodinâmico A para o B ($T_A > T_B$) através de calor. À direita mostramos o análogo mecânico do sistema termodinâmico em equilíbrio térmico, ou seja, $T_{MA} = T_{MB} = T_{M(A+B)}$, pois as

colunas líquidas de A e B possuem a mesma altura definidas pela temperatura mecânica $T_{M(A+B)}$	18
Figura 3. 5 – Neste processo mostramos o análogo mecânico do estabelecimento do contato térmico entre os sistemas B e C a partir do estado de equilíbrio obtido para B na figura 3.4. Para isso o registro R_{AB} foi fechado e o registro R_{BC} aberto. Note que as novas temperaturas T_{MB} e T_{MC} são menores que T_{MA} , pois parte da energia total E_{MB} , que inicialmente era igual a E_{MA} , fluiu para o sistema C.	19
Figura 3. 6 – Neste processo os registros R_{AB} e R_{BC} foram mantidos abertos para o estabelecimento do análogo do estado de equilíbrio entre os três sistemas A, B e C, apresentado na figura 3.3(c), caracterizado pela temperatura $T_{MA} = T_{MB} = T_{MC} = T_{M(A+B+C)}$	20
Figura 3. 7 – Máquina térmica invertida, em que trabalho deve ser realizado no sistema para extrair energia da fonte fria para ser transferida para a fonte quente. Este é o princípio de funcionamento de um refrigerador, como uma geladeira ou ar condicionado. Os parâmetros indicados são os análogos das temperaturas das fontes quente e fria, T_1 e T_2 , respectivamente, as energias Q_1 e Q_2 , retirada da fonte fria e transferida para a fonte quente através de calor, respectivamente, e a energia W transferida ao sistema através de trabalho, ou mais usualmente, o trabalho realizado no sistema.	24
Figura 3. 8 – Análogo de uma máquina térmica invertida. Nesta analogia a coluna A é análoga à fonte quente de temperatura T_{M1} da figura 3.7, as colunas B e C a fonte fria de temperatura T_{M2} , sendo $T_{M1} > T_{M2}$, e a eletrobomba o corpo de trabalho. À esquerda mostramos a eletrobomba sendo acionada e o líquido (energia Q_{M2}) sendo retirado das colunas B e C e sendo transferido para a coluna A (energia Q_{M1}) através da realização de trabalho W_M . Após todo o líquido ser bombeado a eletrobomba é desligada e o registro R_{AB} é fechado, como mostrado à direita. .	25
Figura 4.1 - Grau de concordância dos alunos em uma escala do tipo Likert para cada uma das 15 afirmativas apresentadas na atividade 1. Na parte superior apresentamos o percentual de alunos do 2º ano, de um total de 24 alunos, e na parte inferior os alunos do 3º ano, de um total de 16 alunos, que realizaram a atividade.	28
Figura 4.2 - Respostas dos alunos para o questionário final, composto por 10 questões dissertativas. Estas foram comparadas com as respostas esperadas fornecidas pelo professor. Na opção parcialmente prevalece a presença de concepções alternativas nas respostas dos alunos com relação ao tema proposto. Na parte superior apresentamos o percentual de alunos do 2º ano, de um total de 24 alunos, e na parte inferior os alunos do 3º ano, de um total de 16 alunos, que realizaram a atividade.....	32

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

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.*

AMC - *Análogo Mecânico do Calor.*

SUMÁRIO

CAPÍTULO 1 - INTRODUÇÃO	1
CAPÍTULO 2 - REVISÃO DA LITERATURA E JUSTIFICATIVA	5
2.1 – O USO DA TERMINOLOGIA CALOR NO ENSINO DE FÍSICA.....	5
2.2 – O USO DE ANALOGIAS NO ENSINO DE CIÊNCIAS	10
CAPÍTULO 3 - PREPARAÇÃO DO PRODUTO EDUCACIONAL E FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	13
3.1 – LEI ZERO DA TERMODINÂMICA E OS ANÁLOGOS DA TEMPERATURA E DO CALOR.....	15
3.2 - 1ª e 2ª LEIS DA TERMODINÂMICA E OS ANÁLOGOS DA QUANTIDADE DE CALOR E DO TRABALHO.....	21
CAPÍTULO 4 - APLICAÇÃO DO PRODUTO EDUCACIONAL	26
ATIVIDADE 1: MAPEANDO O CONHECIMENTO PRÉVIO DOS ALUNOS.....	27
ATIVIDADE 2: APRESENTAÇÃO DO ANÁLOGO MECÂNICO.....	29
ATIVIDADE 3: QUESTIONÁRIO FINAL	30
CAPÍTULO 5 - CONCLUSÕES E CONSIDERAÇÕES FINAIS	36
REFERÊNCIAS	38
APÊNDICE: PRODUTO EDUCACIONAL	40
A.1. MONTAGEM DO EXPERIMENTO.....	43
A.2. ANALOGIAS UTILIZADAS PARA O ENSINO DE CONCEITOS TERMODINÂMICOS	46
A.3. CONCEITOS DE FÍSICA QUE PODEM SER DISCUTIDOS COM O SISTEMA ANÁLOGO	47
A.3.1. Lei Zero da Termodinâmica e os Análogos da Temperatura e do Calor	47

A.3.2. 1ª e 2ª Leis da Termodinâmica e os Análogos da Quantidade de Calor e do Trabalho	52
A.4. SUGESTÃO DE QUESTIONÁRIOS PARA SEREM APLICADOS JUNTO COM O PRODUTO EDUCACIONAL	57
ANEXO A: PESQUISA DE OPINIÃO	60
ANEXO B: QUESTIONÁRIO FINAL.....	62

Capítulo 1

INTRODUÇÃO

Segundo Moreira (2011) a execução das aulas de Física no ensino médio tem sido conduzida de uma maneira indesejada, com aulas expositivas apenas, livro de texto único (ou apostila única), conteúdos desatualizados, aprendizagem mecânica (“decoreba”) de fórmulas e respostas corretas. Muitos professores e pesquisadores da área de ensino têm observado que os livros didáticos do ensino médio são focados usualmente nos vestibulares, e com isso, as aulas têm ênfase na resolução de exercícios, principalmente através da memorização (NETO e PACHECO, *apud* NARDI, 1998). O tempo de aula é outro problema, pois os professores têm que abordar assuntos sem que haja tempo para a devida reflexão ou até mesmo uma experimentação. Esta situação de tempo limitado obriga os professores a escolherem alguns assuntos a serem trabalhados com os alunos, usando como critério de seleção os vestibulares, como justificativa mais plausível. Na visão de Souza (2002), os livros didáticos dão essa ênfase demasiada nos vestibulares como forma de mostrar a sua preocupação com o futuro do aluno. A utilização dos vestibulares como critério para seleção de conteúdos contribui muito pouco para a formação do indivíduo como cidadão ou para fazer uma escolha de carreira para seguir sua vida profissional (ROSA e ROSA, 2005).

A coleta de dados, através de entrevistas, permitiu identificar que a seleção dos conteúdos tem um vínculo direto com um processo específico, voltado para a formação futura em nível de ensino superior desse aluno. Entretanto, esta preocupação não está centrada no desenvolvimento do curso em si, mas no processo de seleção para ingressar neste curso, ou seja, com as provas de seleção na forma de concursos, os vestibulares. Vale lembrar que o processo de seleção, na sua maioria, está muito distanciado daquilo que o aluno necessita para acompanhar o seu curso de graduação. Neste sentido, o sucesso no vestibular não significa que ele estará preparado para cursar sua graduação, ou pelo menos, não representa que o aluno tenha domínio dos conteúdos mínimos necessários para acompanhar as disciplinas deste curso (ROSA e ROSA, 2005, p. 3).

Desde os nossos anos iniciais a memorização é utilizada como técnica de aprendizado. Contudo, se esta for mal conduzida pode acarretar na não aprendizagem do assunto que está sendo abordado. Richard Feynman foi professor no Brasil em alguns momentos nas décadas de 1950 a 1960 e relatou no livro “Só pode ser brincadeira, sr. Feynman” uma condição, que ele diz ser muito estranha, observada nos alunos quando ministrou aulas na Universidade Federal do Rio de Janeiro.

Descobri uma coisa muito estranha: os alunos respondiam imediatamente as perguntas que eu fazia. Mas, quando fazia de novo a pergunta – a mesma pergunta, sobre o mesmo assunto, até onde me lembro –, eles não sabiam responder! [...] Depois de muito investigar, descobri que os alunos tinham memorizado tudo, mas não sabiam o que aquilo significava (FEYNMAN, 2019. p. 246 e 247).

A situação descrita por Feynman, relatada como a memorização sem a devida reflexão do assunto, não ajuda no desenvolvimento do aluno e na compreensão dos conceitos e fenômenos a sua volta. Ainda hoje nota-se algo parecido com o relato de Feynman quando observamos os alunos se preparando para testes avaliativos. Após as provas, usualmente percebe-se que a maioria dos alunos esquecem os assuntos estudados. Feynman também ressaltou o comportamento de muitos alunos que sentem vergonha de demonstrar dúvidas quando estão próximos a outros colegas, perdendo a oportunidade de esclarecer as mesmas e entender os conceitos tratados.

Todos fingem que sabem, porém, se um aluno admite por um momento que alguma coisa está confusa e faz uma pergunta, os demais tomam uma atitude prepotente, agindo como se nada estivesse obscuro e dizendo ao autor da pergunta que ele estava atrasando os demais (FEYNMAN, 2019. p. 250).

Também é importante ressaltar outros problemas que envolvem o ensino de Física, como as condições precárias de trabalho do professor, enfoque demasiado na chamada Física Matemática em detrimento de uma Física mais conceitual e a falta de reflexão e contextualização dos conceitos com o cotidiano dos alunos (BONADIMAN e NONENMACHER, 2007). A experimentação tem se mostrado como uma forte aliada nesse processo, servindo como um instrumento didático que desperta o interesse do aluno e possibilita a interação entre o conceito novo com conhecimentos prévios do aprendiz. No nosso trabalho utilizamos a experimentação de maneira demonstrativa para discutir conceitos da Termodinâmica como trabalho, capacidade térmica, energia, temperatura e principalmente sobre o que é calor. Para isso, o nosso experimento foi construído para servir como uma

analogia mecânica a um sistema termodinâmico para tornar o conceito de calor, principalmente, um pouco mais “palpável” para os alunos, uma vez que a forma que este conceito é abordado em livros didáticos e artigos é tema de muita controvérsia (SILVA; LABURÚ e NARDI, 2008).

Um tratamento mais cuidadoso sobre os conceitos da Termodinâmica no ensino básico é interessante porque esta auxilia os alunos a entenderem toda facilidade de locomoção gerada por veículos automotores, o conforto do ar condicionado, refrigeradores, ventiladores, fornos e outras máquinas que realizam trabalho. A Termodinâmica foi e continua sendo uma das ciências mais importantes para o desenvolvimento tecnológico e a compreensão de fenômenos naturais.

Quando nos deparamos com conceitos que requerem abstração para o seu entendimento, como no caso do calor, o uso de analogias pode ser uma ótima ferramenta de trabalho. Uma analogia é uma comparação entre dois objetos ou sistemas de objetos que destacam aspectos em que são considerados semelhantes (GLYNN, 1995). O sistema conhecido e familiar aos alunos, no caso o nosso experimento, é chamado de *domínio base* ou *análogo*, e o assunto novo que queremos abordar a partir do nosso experimento, nomeadamente o conceito de calor, entre outros, é chamado de *domínio alvo*.

Algumas analogias podem ter aspectos bastante diferentes do assunto alvo, podendo até mesmo induzir os alunos a interpretações indesejadas. Por isso, é muito importante que o desenvolvimento do experimento e a explicação do fenômeno alvo induzam também um raciocínio análogo nos alunos. Apesar dos possíveis erros que podem ocorrer neste processo o uso de analogias pode fornecer melhores resultados que um assunto mal explicado (NARDI, 2009).

Nosso experimento é composto por alguns recipientes no formato cilíndrico com diferentes diâmetros contendo água com corante em alturas diferentes, conectadas por mangueiras e registros de maneira a permitir que o fluido possa circular entre as colunas naturalmente, sob o efeito da gravidade apenas, ou com o auxílio de uma pequena bomba d'água para forçar o fluido a ir de uma coluna a outra quando desejado. Este sistema mecânico foi utilizado como o análogo de um sistema termodinâmico composto por diferentes corpos, com diferentes capacidades térmicas, em contato térmico entre si trocando energia térmica espontaneamente através de calor ou de maneira forçada através da realização de trabalho no sistema.

Tal analogia pode facilitar a aprendizagem dos alunos no ensino dos conceitos citados ajudando-os a assimilar o conhecimento da Termodinâmica através de uma aprendizagem

significativa. Como o sistema análogo é de conhecimento do aluno e de fácil manipulação, este pode ajudá-lo a entender os novos conceitos. Esta abordagem vai de encontro com as teorias de Ausubel (AUSUBEL, 1982; AUSUBEL, 2003) para a aprendizagem, em que a aprendizagem significativa ocorre quando o conceito passa a significar algo para o aluno, e o mesmo passa a ser capaz de resolver problemas e situações com base nos conceitos aprendidos (MOREIRA, 1999). Neste contexto, o análogo mecânico pode ser um material potencialmente significativo, pois usará a analogia como base de ensino para que o aluno aprenda o conceito novo a partir do conhecimento já adquirido.

Durante a aplicação do nosso produto educacional foi possível notar que muitos alunos passaram a demonstrar suas dúvidas com mais interesse, algo que não era observado nas aulas convencionais. As “situações problemas” apresentadas com o análogo mecânico proporcionaram uma maior interação entre os alunos, com mais questionamentos, participação e argumentação sobre os assuntos que foram discutidos, favorecendo uma melhor comunicação entre o professor e os alunos. Este tipo de interação em sala de aula pode ajudar na compreensão dos conceitos abordados, sendo fundamental no processo de ensino e aprendizagem (NARDI e BOZELLI, 2012).

Nosso produto educacional foi desenvolvido para o ensino da Termodinâmica com o intuito de auxiliar os professores em sua prática docente para que os conceitos dessa disciplina possam ser transmitidos de uma maneira mais simples e robusta. Esperamos que este material possa possibilitar uma maior interação entre os alunos e entre os alunos e o professor para favorecer uma melhor discussão e reflexão sobre os assuntos abordados.

Capítulo 2

REVISÃO DA LITERATURA E JUSTIFICATIVA

“Ninguém caminha sem aprender a caminhar, sem aprender a fazer o caminho caminhando, refazendo e retocando o sonho pelo qual se pôs a caminhar”.

Paulo Freire

2.1 – O USO DA TERMINOLOGIA CALOR NO ENSINO DE FÍSICA

O ensino sobre a definição de calor tem se mostrado um desafio para muitos professores devido ao uso incorreto desta terminologia no cotidiano das pessoas e também na maneira que este conceito é descrito nos livros didáticos (NARDI, 2009). De maneira bastante simples, o calor é o método pelo qual energia flui de um corpo para outro devido a uma diferença de temperatura entre eles, ou seja, o calor está relacionado a um processo de transferência de energia, não sendo a energia propriamente dita (ATKINS, 2010). Alguns livros didáticos (NUSSENZVEIG, 2002; HEWITT, 2015), descrevem o calor como a energia transferida entre o sistema e sua vizinhança devido a uma diferença de temperatura entre eles. Essa definição em si já é um pouco confusa, porque dizer que calor é energia em trânsito, pode levar o leitor a acreditar que o calor é uma forma de energia. Essa maneira inadequada de tratar o conceito de calor se torna ainda mais evidente quando outros conceitos da Termodinâmica são abordados. Por exemplo: “A 1ª lei da termodinâmica, como vimos, incorpora o princípio geral da conservação da energia e o reconhecimento de que o calor é uma forma de energia” (NUSSENZVEIG, 2002, p. 205). Nessa frase o calor é explicitamente citado de maneira incorreta como uma forma de energia, pois como já discutido, o calor é o

método pelo qual energia é transmitida e não deve ser confundido com a própria energia. O calor não é uma propriedade física do sistema, portanto, nunca deve ser citado como forma de energia. Esse tipo de abordagem pode induzir vários professores e alunos a definir calor e utilizar o seu conceito de maneira incorreta. Outro exemplo, “*A caldeira fornece um calor Q para vaporizar a água à pressão constante P* ” (NUSSENZVEIG, 2002, p. 183). Note que nesta afirmação o autor descreve que a caldeira fornece calor ao sistema como se o mesmo fosse uma substância. Mesmo no excelente Curso de Física Básica de autoria do professor Moysés Nussenzveig (NUSSENZVEIG, 2002), o qual é reconhecidamente um dos melhores livros de física básica utilizado nos cursos de graduação em Física no Brasil, é possível encontrar expressões inadequadas e imprecisas sobre a definição e a natureza do calor, como calor fluindo, calor cedido, fornecer calor, fluxo de calor, energia na forma de calor, entre outros, mostrando que de fato tal terminologia deve ser considerada com cuidado nas aulas de Termodinâmica em qualquer nível de ensino. Silva, Laburú e Nardi (2008) fornecem outros exemplos de livros de graduação com este mesmo tipo de abordagem sobre o calor:

Entre os livros mais utilizados nos anos iniciais da graduação em física, podem ser encontradas as seguintes definições de calor: Calor é a energia que é transferida entre um sistema e seu ambiente, devido a uma diferença de temperatura que existe entre eles (HALLIDAY *et al.*, 1993, p. 183); Calor é a energia transferida entre um sistema e sua vizinhança, devido exclusivamente a uma diferença de temperaturas entre o sistema e alguma parte de sua vizinhança (KELLER *et al.*, 1999, p. 449); Calor é a energia transferida graças a diferenças de temperatura (TIPLER, 1978, p. 399). Nussenzveig (1990, p. 292) está de acordo com esses autores por confirmar essa definição ao analisar uma situação com a primeira lei da Termodinâmica e dizer que o calor Q representa a energia transferida entre o sistema e sua vizinhança, devido a diferenças de temperaturas (SILVA, LABURÚ e NARDI, 2008, p.387).

Esse tipo de abordagem também é comum nos livros de ensino básico, em que podem ser encontradas expressões como “*O frio e o calor são sensações presentes em nosso cotidiano*” (PIETROCOLA *et al.*, p.162), podendo levar o leitor a confundir calor com temperatura ou considerá-lo erroneamente como uma sensação térmica. Ainda nesta referência o calor é citado como uma forma de energia: “*Abordamos esse tema no capítulo 6, no qual deixamos claro que o calor é uma forma de energia ligada a agitação de moléculas ou átomos que constituem a matéria e que a temperatura é a medida dessa agitação*” (PIETROCOLA *et al.*, p. 216). Outros exemplos, “*Calor é energia em trânsito de um corpo a uma temperatura mais alta para outro a uma temperatura mais baixa. Uma vez transferida, a energia deixa de ser calor*” e “*Quando uma substância absorve ou cede calor, a sua energia*

interna, correspondentemente, aumenta ou diminui” (HEWITT, 2015, p. 287 e 288). A confusão nestes dois últimos trechos é ainda maior, pois no primeiro o autor diz que, enquanto houver fluxo de energia, esta é calor e após o fluxo cessar a energia deixa de ser calor, e no segundo trecho o autor deixa evidente que calor pode ser absorvido ou cedido, ou seja, como se o calor fosse uma substância presente no corpo. Esse tipo de confusão remete à teoria do calórico, que era tratado como a causa do calor, ou seja, o calórico era visto como uma quantidade mensurável do calor.

A relação do calor com a sensação térmica de quente ou como uma substância são concepções espontâneas naturais entre as pessoas, sendo comuns expressões como “*hoje está muito calor*”, para fazer referência a altas temperaturas durante o dia, e “*o calor não passa pela madeira*”, como se o calor fosse uma propriedade de um corpo (AMARAL e MORTIMER, 2001). Relatos de formas inadequadas do uso do conceito de calor nos livros didáticos também são comumente encontrados em artigos como,

[...] em muitos livros, principalmente os de Química e de Física introdutória, são utilizadas expressões infelizes, referindo-se, por exemplo, ao calor de um corpo como se o calor fosse uma propriedade do corpo; ou ainda empregam termos como energia térmica, por meio de um conceito indefinido, muitas vezes obscuro e ambíguo (CINDRA e TEIXEIRA, 2004, p. 179).

Aguiar Junior (1999) fala sobre a necessidade de uma consciência do uso de determinadas terminologias da Termodinâmica, como o calor e a temperatura, frente ao senso comum das pessoas da seguinte forma:

Nos parece fundamental à didática em ciências e à formação docente a consciência de que falamos de coisas distintas quando usamos as mesmas expressões utilizadas pela linguagem cotidiana [...]. A indiferenciação de conceitos, a substancialização do calor, a atribuição de propriedades de “atração” e “repulsão” ao calor e ao frio e a ideia de que a temperatura revela a “quantidade de calor” existente em um corpo são alguns traços característicos do pensamento de senso comum acerca dos processos térmicos (AGUIAR JR, 1999, p. 75).

Mesmo quando estudos são apresentados com a participação ativa dos alunos visando contrapor suas concepções espontâneas sobre o calor, observa-se o mau uso de tal terminologia:

O calor, por sua vez, é a energia em movimento. Quando um corpo, a uma certa temperatura, é colocado em contato com um segundo corpo, com uma segunda temperatura, eles atingirão uma temperatura final de equilíbrio. E

isso se dá porque o corpo de maior temperatura irá fornecer calor para o de menor temperatura. A energia irá fluir do mais quente para o mais frio, e a este movimento de energia damos o nome de calor (MARTINEZ e FERREIRA, 2019, p. 1632).

Ao dizer que o “*calor é a energia em movimento*”, “*o corpo de maior temperatura irá fornecer calor para o de menor temperatura*” e que “*a este movimento de energia damos o nome de calor*” os alunos podem ser levados a acreditar que o calor é a própria energia térmica do sistema.

As citações mencionadas mostram a necessidade da adaptação de estratégias de ensino com a definição e considerações sobre o calor para melhorar o seu entendimento. Fazer com que as pessoas superem as concepções espontâneas é um grande desafio que precisa de recursos adicionais que vão além dos exemplos e esquemas apresentados na lousa durante uma aula.

O maior desafio de um professor de Física é fazer com que um aluno possa ultrapassar esse obstáculo, entre a espontaneidade e o conhecimento científico, porém, tal objetivo dificilmente será conquistado ao utilizar unicamente o quadro de giz em suas aulas (VIEIRA, PEREIRA e MACKEDANZ, 2011, p. 48).

Dessa forma, o desenvolvimento e uso de recursos que auxiliem os professores a tratar de forma mais simples, mas robusta, conceitos termodinâmicos em sala de aula com uma terminologia adequada é muito importante. Nesse contexto, esperamos que o nosso produto educacional, o qual consiste em considerar uma analogia através de um experimento simples que pode ser conduzido em sala de aula ou através de um vídeo, forneça condições ao professor para que os alunos entendam de uma maneira mais clara que o calor é o processo ou método pelo qual energia é transferida de um corpo de maior temperatura para outro de menor temperatura.

Nossa proposta se torna ainda mais importante e interessante se considerarmos que o ensino de Física nas escolas tem enfrentado muitas dificuldades devido a vários fatores, como desinteresse dos alunos, aulas sem o devido preparo, com ênfase demasiada na matemática e ambiente inadequado ao ensino da Física (VIEIRA, PEREIRA e MACKEDANZ, 2011). Para que ocorra o processo de ensino e aprendizagem é de suma importância considerar o cotidiano dos alunos e os fenômenos vivenciados por eles, bem como seus questionamentos e curiosidades.

Conduzir nosso análogo experimentalmente é outro ponto relevante da nossa proposta para a melhoria do processo de ensino e aprendizagem, pois os experimentos têm se mostrado como fortes aliados nesse processo, servindo como um instrumento didático que desperta o

interesse do aluno e possibilita a interação entre o conceito novo com o conhecimento prévio do aprendiz (ATAÍDE, 2010, *apud* ATAÍDE e SILVA, 2011). Muitos professores acreditam que os experimentos facilitam a aprendizagem dos alunos, porém, poucos se aventuram na realização de atividades experimentais. De acordo com Ataíde (2010) os principais aspectos para as justificativas da não realização de experimentos nas escolas são:

[...] de natureza filosófica (a realização de atividades experimentais de forma livre ou sem orientação); natureza cognitiva (a adequação ou não das atividades experimentais às habilidades dos estudantes na escola) e de natureza pedagógica (espaço físico como os laboratórios, condições dos materiais como vidrarias, reagentes e preparação de professores) (ATAÍDE, 2010, p. 23).

De forma geral a formação de professores dispõe de pouca ou nenhuma experimentação, sendo concentradas em aulas conteudistas baseadas no desenvolvimento de teorias e resolução de exercícios, de modo que esta prática acaba sendo repassada aos alunos dos professores formados nos níveis fundamental e médio.

Nas escolas que trabalho, todo o conteúdo deve ser tratado de forma objetiva e rápida. Nestas condições tenho observado que os alunos têm pouco tempo para assimilar os conceitos transmitidos e na maioria das vezes, quando é discutido algum assunto de forma mais aprofundada, observa-se pouca compreensão do conteúdo. Usualmente utiliza-se material apostilado com a explicação única do conteúdo, sendo finalizada a aula com resolução de exercícios de vestibulares. Os alunos até conseguem realizar cálculos, compreender algumas propriedades e aplicação de fórmulas, mas é possível observar que dúvidas conceituais básicas prevalecem.

Com a abordagem experimental dada nas aulas de Termodinâmica a partir do nosso produto educacional foi possível facilitar o entendimento de alguns conceitos como calor, temperatura, capacidade térmica, lei zero, primeira lei da Termodinâmica, entre outros, em um tempo de 4 aulas de 45 minutos em sala de aula, além de promover maior reflexão entre os alunos sobre os assuntos abordados, em pleno acordo com Biasoto e Carvalho (2007):

No processo de enculturação científica, as atividades que proporcionam interações e argumentações entre os alunos devem ser encorajadas, pois estas propiciam que os alunos levantem e discutam suas hipóteses. Neste contexto, a resolução de problemas experimentais, se bem conduzidos, cumpre bem este papel (BIASOTO e CARVALHO, 2007, p. 9).

2.2 – O USO DE ANALOGIAS NO ENSINO DE CIÊNCIAS

O ensino da Termodinâmica é repleto de conceitos que os alunos consideram de difícil assimilação como calor, temperatura, trabalho e energia, por exemplo. A relação entre estes, como visto na seção anterior, também é um problema podendo levar os alunos e até mesmo os autores de livros didáticos a confundir calor com temperatura ou com energia. Neste contexto, o uso das analogias pode facilitar significativamente a compreensão destes conceitos a partir da visualização de seus análogos em sistemas mais simples e menos abstratos.

Promover o raciocínio analógico no ensino de ciências pode fazer com que o estudante comece a criar relações entre o que é trabalhado na disciplina de Física, por exemplo, com outras áreas do conhecimento como Química, Biologia, Engenharias, etc., pois este envolve a transferência de informações sobre algo que já existe na memória do aluno, referido usualmente como o domínio de origem ou base (análogo), para a explicação e entendimento de novos conceitos, referido como o domínio alvo (VOSNIADOU and ORTONI, 1989).

Isso significa que as semelhanças ou analogias entre os processos observados em nosso experimento mecânico, que é de simples manipulação e entendimento, pode mudar a forma como pensamos sobre o conceito de calor, por exemplo, no sistema termodinâmico que pretendemos explorar, facilitando a definição do próprio conceito de calor e de outros, como a temperatura, de maneira a evitar a confusão entre os mesmos.

De acordo com Gentner (1989) uma analogia é uma forma de focar na relação das semelhanças entre dois sistemas, no nosso caso os processos e parâmetros dos sistemas mecânico e termodinâmico, independentemente dos objetos em que estas relações estão inseridas, ou seja, no sistema mecânico verificamos a transferência de um líquido entre vasos comunicantes devido à diferença de altura entre eles e no sistema termodinâmico, completamente diferente do primeiro, discutimos a transferência de energia entre dois sistemas devido à diferença de temperatura entre eles. Na interpretação desta analogia buscamos, juntamente com os alunos, estabelecer uma relação de um para um dos parâmetros dos dois sistemas para obtermos a máxima semelhança estrutural entre eles. Isso significa que nós buscamos a analogia não só entre os parâmetros dos dois sistemas, mas também nos processos físicos envolvidos nos mesmos.

O uso de analogias está dentre as muitas estratégias de Ensino de Ciências existentes e vem ganhando espaço no Brasil desde a década de 1990.

A investigação sobre o uso de analogias e metáforas especificamente em livros didáticos de Física ganhou maior atenção no Brasil após os meados da década de 1990, impulsionada pela aprovação da LDB em 1996 e pela adoção, por parte do MEC, de critérios de avaliações dos livros didáticos no mesmo ano. Leite, Garcia e Rocha (2011) identificaram 4 artigos sobre o tema nas 6 principais revistas de ciências do país entre os anos de 1996 e 2000. Já Silva e Almeida (2009) localizaram 11 artigos sobre o uso de linguagem analógica em Física 3 em 8 revistas brasileiras entre os anos de 1979 e 2007, sendo 8 deles após 1996 e 6 após 2000. Na pesquisa bibliográfica do trabalho aqui apresentado, foram encontrados, em revistas nacionais publicadas entre 2000 e 2017, 9 artigos sobre analogias e/ou metáforas em livros didáticos de Física, além de alguns artigos publicados por brasileiros em revistas estrangeiras e mais uma dezena de artigos publicados em anais de eventos. O que comprova o crescente interesse pelo tema (KOPP e ALMEIDA, 2019, p.73).

Apesar de existir um crescente uso de analogias em Física, apenas alguns conteúdos contemplam trabalhos utilizando tal recurso. De acordo com Kopp e Almeida (2019, p. 74) “[...] analogias aparece nos capítulos de *Eletromagnetismo* (33,3%), *Física Moderna* (28,5%) e *Óptica* (28,5%)”. Esta condição demonstra claramente a carência do uso de analogias para o ensino da Termodinâmica, que é o tema do nosso trabalho.

As analogias podem ser de grande serventia se aplicadas adequadamente, porém, se estas forem conduzidas sem que seus objetivos, características e limitações sejam devidamente explicitados, as analogias podem reforçar ou gerar concepções alternativas e errôneas com relação ao conceito alvo (RAMOS e MOZZER, 2018).

As diretrizes utilizadas neste trabalho para utilizar de maneira adequada as analogias do nosso experimento para ensinar os conceitos termodinâmicos no sistema proposto é devido a Glynn (1995). O modelo proposto por Glynn é chamado de *Teaching With Analogies* (TWA), “Ensinando com Analogias”, comumente conhecido como modelo TWA. Para aplicação deste modelo é proposto o uso de seis passos (GLYNN, 1995).

1. *Introduzir o conceito alvo;*
2. *Rever o conceito análogo;*
3. *Identificar as características relevantes do alvo e análogo;*
4. *Mapear as semelhanças;*
5. *Identificar onde analogia falha;*
6. *Tirar conclusões.*

É importante ressaltar que a estrutura do modelo TWA funciona como um guia para favorecer o uso de analogias pelo professor para o ensino de Ciências. Em nosso trabalho foi

possível contemplar e identificar todos os passos da metodologia. Além da introdução dos conceitos e o estabelecimento do análogo, também identificamos as limitações da analogia.

No próximo capítulo fornecemos todos os detalhes dos passos da metodologia TWA em nosso trabalho.

Capítulo 3

PREPARAÇÃO DO PRODUTO EDUCACIONAL E FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

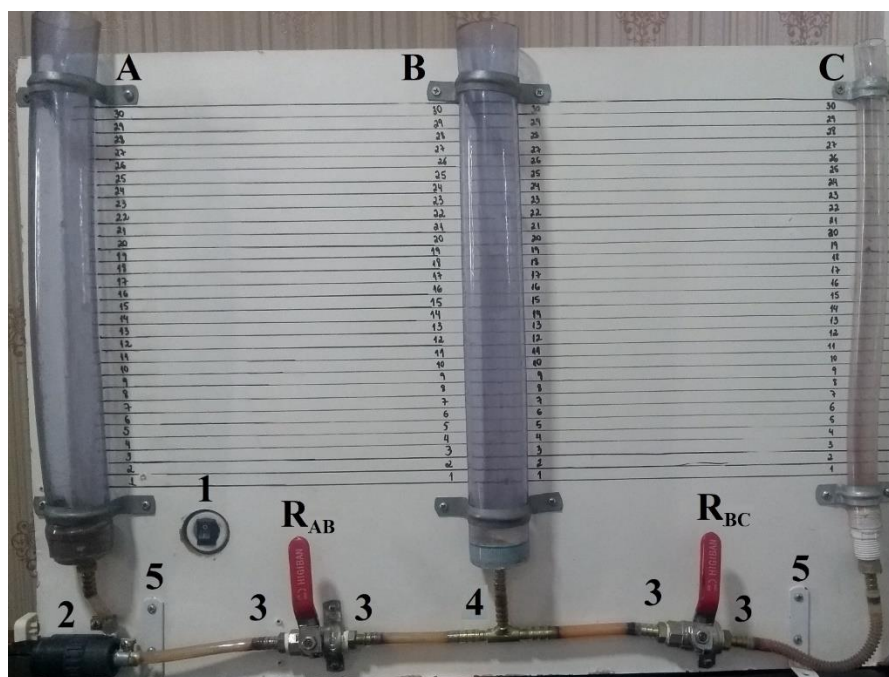
A natureza do calor e seus aspectos tem sido tema de grande discussão filosófica ao longo dos anos e é a base para o desenvolvimento da Termodinâmica. Nosso principal objetivo neste trabalho é auxiliar o professor de física na definição de conceitos como calor, temperatura, capacidade térmica, energia e a relação destes com a Lei Zero, a Primeira e Segunda Leis da Termodinâmica através de um análogo mecânico de simples montagem e manipulação.

Nosso produto educacional foi construído utilizando vasos cilíndricos comunicantes, que nós chamamos de colunas, com diferentes alturas e diâmetros, registros para controlar o fluxo do líquido entre as colunas, uma eletrobomba de gasolina para partida a frio de 12V, acionada com um interruptor para bombear o líquido do sistema para uma das colunas, conexões, parafusos, cantoneiras e um painel de fibra de madeira (MDF – *Medium-density Fibreboard*) para fixação do experimento. A vedação da parte inferior das colunas pode ser feita com materiais alternativos como tampas plásticas de potes, isopor, etc. No nosso experimento foi utilizado cap tampão, silicone, veda rosca e abraçadeiras. Todos os materiais utilizados e suas especificações está descrito abaixo podem ser visualizados na imagem do experimento montado e pronto para ser utilizado apresentado na figura 3.1.

Para acionar o experimento é necessário inserir um fluido, como água, de preferência com um corante para melhor visualização, no interior de uma das colunas ou em todas as colunas no nível desejado pelo professor. Com os registros abertos o fluido tende sempre a permanecer no mesmo nível em todas as colunas independentemente de suas dimensões e até

mesmo do seu formato. O processo de transferência do fluido entre as colunas foi utilizado para ser análogo ao processo de transferência de energia térmica através de calor e trabalho entre as partes de um sistema termodinâmico composto por até três corpos em contato térmico.

Figura 3. 1 – Experimento do nosso produto educacional montado mostrando as três colunas, A e B feitas com mangueiras transparentes de uma polegada e meia (1.½”) e C de ½”, todas com 40 cm de comprimento. Para fazer o vaso comunicante entre as colunas foi utilizada uma mangueira transparente de ¼” e 50 cm de comprimento. Dois registros de ¼”, R_{AB} e R_{BC} , foram instalados entre as colunas AB e BC, respectivamente. Uma fonte de energia elétrica de 12V foi instalada próximo à coluna A junto a um interruptor (1) para acionar a bomba de gasolina (2) responsável por bombear o líquido do sistema para a coluna A. As conexões entre a mangueira que forma o vaso comunicante e as colunas foram feitas com conectores do tipo espigão fixo macho de ¼” com rosca de ¼” (3), nos registros e nas colunas A e C, e um do tipo T (4) na coluna B. Todo o dispositivo foi fixado com parafusos em um painel de MDF de 1,0 m de largura por 0,5 m de altura utilizando braçadeiras para tubo em forma de U com dimensões adequadas para cada parte do experimento. Para manter o aparato na vertical foram utilizadas 4 cantoneiras de (50 x 50) mm (5) que funcionaram como pés de sustentação para o experimento. As escalas apresentadas ao lado das três colunas estão todas no mesmo nível e possuem resolução de 1 cm para melhor verificar e comparar a altura das colunas de líquido formadas durante o funcionamento do dispositivo.



Fonte: Elaborado pelo autor.

A analogia dos parâmetros de controle do experimento construído foi feita em uma relação de um para um com os parâmetros do sistema termodinâmico proposto, descritos resumidamente por:

- O volume do líquido no cilindro representa a quantidade de energia térmica de um corpo;
- A transferência ou fluxo do fluido de uma coluna para outra será análoga ao processo de transferência ou fluxo de energia térmica entre os corpos que compõem o sistema termodinâmico.
- O registro entre as colunas, por ser o método ou forma pela qual o fluido (energia térmica) é transferido de um corpo para outro devido a uma diferença de altura (temperatura), será o análogo do calor.
- O nível do líquido em cada coluna representa suas respectivas temperaturas;
- A capacidade de armazenamento de cada cilindro será o análogo da capacidade térmica de um corpo, sendo maior nos cilindros de maior volume.
- A eletrobomba, responsável por retirar o líquido de todo o sistema bombeando-o para a coluna A, será o análogo de um agente externo realizando trabalho no sistema termodinâmico.

Nesta etapa do trabalho já é possível o professor identificar os passos 3 e 4 da estrutura do modelo TWA, pela identificação das características relevantes do sistema mecânico (análogo) e do sistema alvo (termodinâmico) e pelo mapeamento das características semelhantes dos sistemas, ou seja, das analogias.

Nas próximas seções as analogias serão descritas detalhadamente para cada parâmetro e conceito termodinâmico abordado neste trabalho.

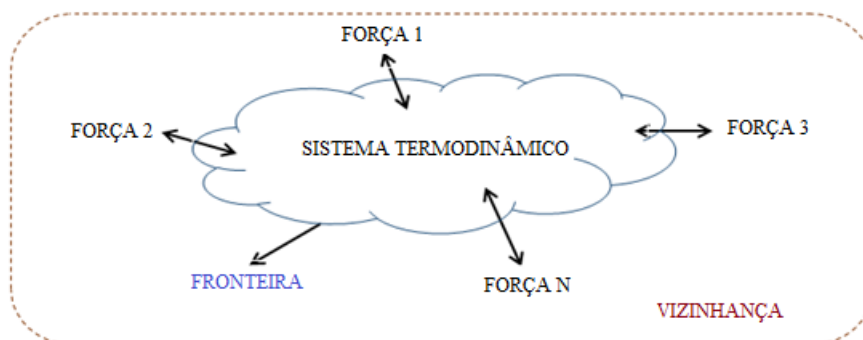
3.1 – LEI ZERO DA TERMODINÂMICA E OS ANÁLOGOS DA TEMPERATURA E DO CALOR

A Termodinâmica estuda principalmente propriedades gerais e fenômenos causados pela ação combinada de um número muito grande de partículas que se movem continuamente. Este movimento desordenado das partículas é usualmente chamado de movimento térmico. Um sistema termodinâmico é macroscópico, finito e suas propriedades são analisadas usualmente quando o mesmo está em equilíbrio. O sistema ocupa uma região do espaço delimitada por uma fronteira, podendo ser afetado pela sua vizinhança através da ação de forças externas, como ilustrado na figura 3.2, dependendo da natureza da fronteira.

A fronteira pode ser composta por paredes diatérmicas, que permitem a transmissão de energia térmica através do calor, ou paredes adiabáticas, as quais não permitem que essa troca

de energia, especificamente, seja estabelecida entre o sistema e sua vizinhança. Apenas estes dois tipos de fronteira foram explorados no análogo proposto em nosso produto educacional.

Figura 3. 2 - Esquema de um sistema termodinâmico mostrando sua fronteira, sua vizinhança e possíveis forças externas que podem influenciar em suas propriedades.



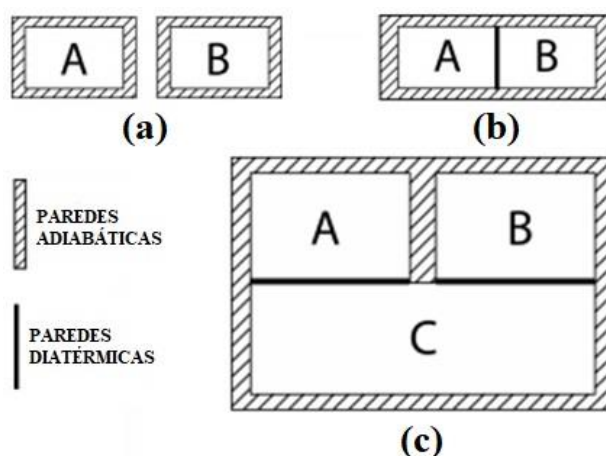
Fonte: Elaborado pelo autor.

Se considerarmos dois corpos A e B sem qualquer contato térmico entre si, compostos por paredes adiabáticas, conforme ilustrado na figura 3.3(a), o estado termodinâmico de cada corpo não afetará o estado do outro, ou seja, cada sistema permanece em seu estado de equilíbrio isoladamente e é caracterizado por uma temperatura T_A e T_B , as quais podem ser diferentes a princípio. Considerando uma nova situação, como a mostrada na figura 3.3 (b), em que o contato térmico entre os sistemas A e B é estabelecido através de uma parede diatérmica que permite a troca de energia térmica apenas entre A e B, teremos um novo estado de equilíbrio interno A + B caracterizado por um única temperatura T_{A+B} . Isso ocorre em decorrência da troca de energia térmica entre os dois corpos através do calor, assumindo que $T_A \neq T_B$, com a energia fluindo espontaneamente do corpo de maior temperatura para o de menor temperatura até que as mesmas se igualem $T_A = T_B = T_{A+B}$. Quando a temperatura em todas as partes do sistema atinge o mesmo valor, dizemos que o sistema está em equilíbrio térmico. No caso em que $T_A = T_B$ antes do contato térmico entre A e B ser estabelecido, não haverá um fluxo resultante de energia entre os dois sistemas e o novo estado de equilíbrio será o mesmo dos sistemas A e B anteriores. Neste caso não faz sentido falar em calor, pois este está associado ao processo de transmissão de energia de um sistema para outro devido a diferença de temperatura entre eles.

Considerando ainda uma terceira situação, como a ilustrada na figura 3.3 (c), em que é estabelecido o contato térmico de A e B com um terceiro corpo C, caracterizado por uma temperatura $T_C \neq T_A$ e $T_C \neq T_B$, um novo estado de equilíbrio dado por A + B + C e

caracterizado por uma única temperatura T_{A+B+C} é observado, pois tanto A quanto B trocam energia térmica entre si através do corpo C.

Figura 3.3 – (a) Representação de dois sistemas termodinâmicos A e B com paredes adiabáticas, isolados do meio que se encontram e entre si. (b) Contato térmico estabelecido entre os sistemas A e B, mantendo os mesmos isolados do meio por paredes adiabáticas e (c) contato térmico estabelecido entre os sistemas A e C e entre B e C, mantendo A e B separados por paredes adiabáticas. Como o meio externo não exerce nenhuma influência nestes sistemas, os seus estados de equilíbrio são caracterizados pelas temperaturas T_A e T_B em (a), T_{A+B} em (b) e T_{A+B+C} em (c).



Fonte: Elaborado pelo autor.

É interessante notar que em todas as situações ilustradas anteriormente os novos estados de equilíbrio entre os sistemas A, B e C são determinados pelo parâmetro temperatura T , pois os sistemas permanecem isolados de sua vizinhança em todos os processos. Vemos com isso que a temperatura caracteriza o estado de equilíbrio interno de um sistema. Portanto, se o contato térmico entre vários sistemas é estabelecido, os valores de suas temperaturas serão igualados com o passar do tempo como resultado da troca de energia térmica entre eles através de calor e suas temperaturas permanecerão as mesmas enquanto o contato térmico for estabelecido ou mesmo após este ser interrompido, considerando que os sistemas individuais não estabelecerão contato térmico com nenhum outro sistema, permanecendo em equilíbrio térmico.

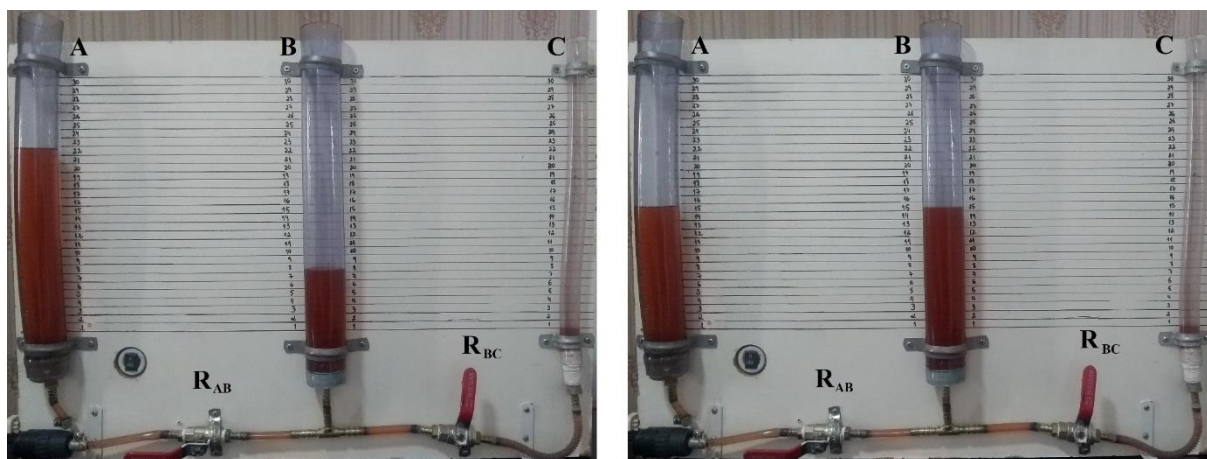
Este resultado é usualmente referido como a Lei Zero da Termodinâmica, a qual estabelece que: “dois sistemas em equilíbrio térmico com um terceiro estão em equilíbrio térmico entre si”.

Com o nosso produto educacional é possível demonstrar de maneira análoga todos os processos que levam ao estabelecimento da Lei Zero da Termodinâmica e os conceitos de

temperatura e calor. Para isso consideramos as três colunas A, B e C do dispositivo como sendo os três corpos termodinâmicos ilustrados na figura 3.3.

Para representar a energia térmica que fluirá espontaneamente entre os sistemas devido a uma diferença de altura (temperatura mecânica T_M) entre as colunas, nós utilizamos água com um corante vermelho para facilitar a visualização do processo, veja figura 3.4.

Figura 3. 4 – Análogo mecânico do processo realizado na figura 3.3(a) mostrando à esquerda o análogo do contato térmico entre A e B pela abertura do registro R_{AB} mantendo o registro R_{BC} fechado, com E_M (líquido) fluindo espontaneamente da coluna A para a coluna B, pois a altura da coluna líquida de A (T_{MA}) é maior que a da coluna B (T_{MB}), ou seja, $T_{MA} > T_{MB}$. Esta é a condição análoga para a energia térmica fluir espontaneamente do sistema termodinâmico A para o B ($T_A > T_B$) através de calor. À direita mostramos o análogo mecânico do sistema termodinâmico em equilíbrio térmico, ou seja, $T_{MA} = T_{MB} = T_{M(A+B)}$, pois as colunas líquidas de A e B possuem a mesma altura definidas pela temperatura mecânica $T_{M(A+B)}$.

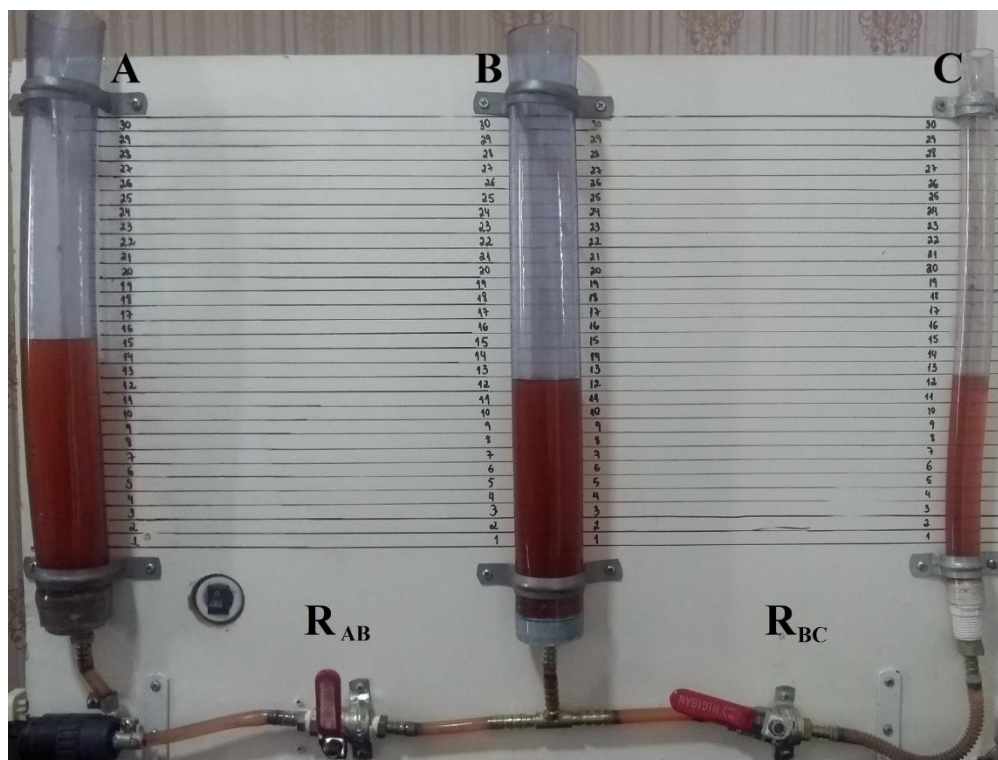


Fonte: Elaborado pelo autor.

Como no caso do análogo da temperatura, nós representaremos o análogo do parâmetro energia do nosso experimento como E_M , com o índice M fazendo referência ao análogo mecânico. Para demonstrar de maneira análoga os sistemas isolados termicamente A e B um dos outros, como se todos possuísem paredes adiabáticas como na figura 3.3 (a), é necessário deixar os dois registros R_{AB} e R_{BC} fechados. Dessa forma as colunas A e B permanecerão na mesma altura, caracterizando as temperaturas mecânicas T_{MA} e T_{MB} . Para estabelecer o contato térmico entre os sistemas mecânicos A e B, como na figura 3.3 (b), simulando paredes diatérmicas, basta abrir o registro R_{AB} . Dessa forma, se a altura das colunas A e B, equivalente às temperaturas T_{MA} e T_{MB} , forem diferentes, a energia E_M irá fluir espontaneamente da coluna de maior altura para a de menor altura até que a altura do líquido se torne a mesma nas duas colunas, ou seja, até que $T_{MA} = T_{MB}$, como mostrado na figura 3.4. Esta nova altura é o análogo da temperatura de equilíbrio do sistema A + B, ou seja, $T_{M(A+B)}$.

Caso o professor desejar isolar adiabaticamente o sistema mecânico B do sistema A e estabelecer o análogo do contato térmico entre B e C, basta fechar o registro R_{AB} e abrir o registro R_{BC} , como mostrado na figura 3.5.

Figura 3.5 – Neste processo mostramos o análogo mecânico do estabelecimento do contato térmico entre os sistemas B e C a partir do estado de equilíbrio obtido para B na figura 3.4. Para isso o registro R_{AB} foi fechado e o registro R_{BC} aberto. Note que as novas temperaturas T_{MB} e T_{MC} são menores que T_{MA} , pois parte da energia total E_{MB} , que inicialmente era igual a E_{MA} , fluiu para o sistema C.



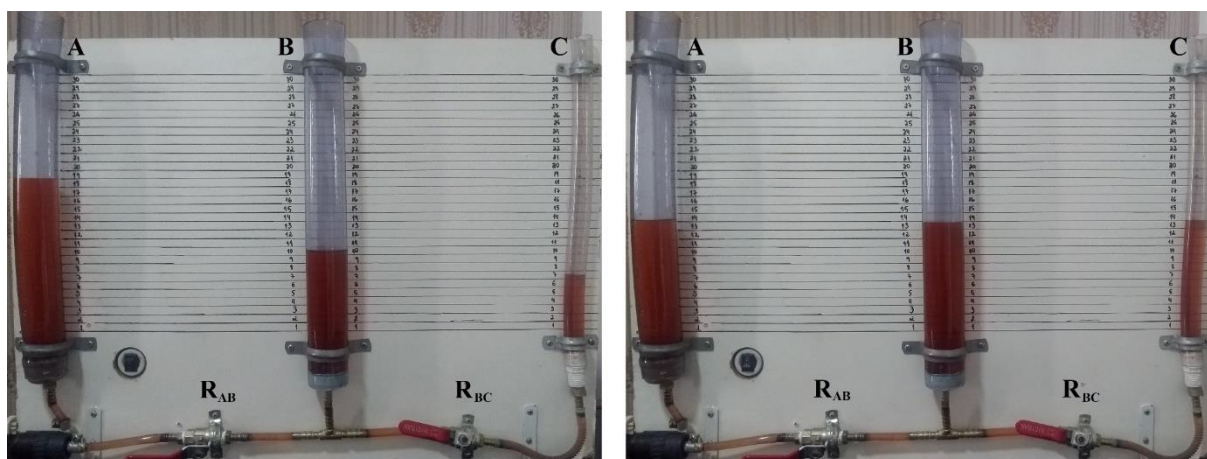
Fonte: Elaborado pelo autor.

O análogo do processo estabelecido na figura 3.3 (c) é realizado abrindo-se os dois registros R_{AB} e R_{BC} . Novamente, a energia E_M do sistema que tiver maior temperatura T_M irá fluir espontaneamente até que uma nova temperatura $T_{M(A+B+C)}$ (altura), igual para as três colunas, seja estabelecida com o tempo, como mostrado na figura 3.6. Dessa forma o sistema atingirá o estado de equilíbrio análogo a $A + B + C$, caracterizado pela temperatura T_{A+B+C} na figura 3.3 (c).

Mas como é possível observar o análogo do calor nestes processos? Como já discutido, o processo de transferência do líquido de uma coluna para outra devido a uma diferença de altura entre as colunas é o análogo do processo de transferência de energia de um corpo para outro devido a uma diferença de temperatura entre eles. Lembrando que o calor é o método pelo qual energia térmica é transferida de um corpo para outro, qual seria o método ou a forma pela qual o líquido é transferido de uma coluna para outra? Qual a parte do

dispositivo que permite essa transferência? Analisando os experimentos acima observa-se que é o registro, ou seja, o registro é o análogo do calor. Mas o registro não seria o análogo do contato térmico? Sim, mas não é só isso, pois é possível estabelecer contato térmico entre dois corpos sem que haja uma transferência resultante de energia térmica entre eles, ou seja, sem que tenhamos calor. Neste caso o fluxo de energia de um sistema para outro se mantém estacionário. Isso é possível se considerarmos o contato entre dois sistemas já em equilíbrio térmico um com relação ao outro.

Figura 3. 6 – Neste processo os registros R_{AB} e R_{BC} foram mantidos abertos para o estabelecimento do análogo do estado de equilíbrio entre os três sistemas A, B e C, apresentado na figura 3.3(c), caracterizado pela temperatura $T_{MA} = T_{MB} = T_{MC} = T_{M(A+B+C)}$.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Sendo o calor associado ao processo de transferência de energia térmica de um sistema para outro, quando o registro é aberto em nosso experimento, o líquido flui espontaneamente de uma coluna para outra até que a altura do líquido nas duas colunas seja a mesma. Este seria o análogo do equilíbrio térmico do sistema total, de maneira que se fecharmos ou abrirmos novamente o registro não será observada nenhuma diferença na altura do líquido nas duas colunas consideradas. Isso mostra que o registro não exerce qualquer influência no sistema quando o equilíbrio é estabelecido. De maneira análoga, quando dois sistemas termodinâmicos estão em equilíbrio térmico não faz mais sentido falar em calor, pois o processo de transferência de energia cessa, como se os dois sistemas se tornassem um só. Com o registro aberto, temos um vaso comunicante entre as duas colunas, fazendo com que o sistema se torne um só. Portanto, o registro representa de maneira clara o papel do calor no contato térmico entre dois corpos com diferentes temperaturas, desde a realização do processo de transferência de energia até o momento em que o sistema total atinge o equilíbrio térmico.

Para enunciar o análogo da Lei Zero da Termodinâmica o professor pode considerar o corpo C da figura 3.3 (c) como sendo a coluna B do nosso experimento, de maneira que o contato da coluna A com a B e da coluna C com a B, faz com que a altura do líquido das colunas A e B também sejam iguais, como mostrado na figura 3.6, ou seja, “*dois sistemas em equilíbrio térmico com um terceiro estão em equilíbrio térmico entre si*”.

3.2 - 1ª e 2ª LEIS DA TERMODINÂMICA E OS ANÁLOGOS DA QUANTIDADE DE CALOR E DO TRABALHO

Energia transferida através de calor ocorre devido a uma diferença de temperatura entre dois corpos. Esta energia transferida pode fazer com que a energia interna do sistema, também chamada de energia térmica, aumente ou permita que o sistema possa converter a mesma em outra modalidade de energia através de trabalho. Na verdade, as duas possibilidades podem ocorrer, pois processos de transformação de energia geralmente envolvem o aquecimento de várias partes do sistema e sua vizinhança. Como exemplo, podemos citar um automóvel que converte energia térmica em cinética e no processo toda a carcaça do motor e até o ar em torno do capô do mesmo são aquecidos. Quando colocamos um carregador de celular na tomada e o conectamos ao aparelho, energia elétrica é convertida em energia química na bateria do celular e neste processo é possível perceber o aquecimento de todo o sistema. O mesmo processo de aquecimento é observado em motores elétricos.

A explicação para estes processos é dada pela Termodinâmica, cujas leis foram estabelecidas por cientistas no século XIX. Estas leis são baseadas em experimentos envolvendo transformações de energia e nunca foi observado um único experimento em que mostrasse que as mesmas estão incorretas. Por esta razão, tais leis formam a base do trabalho científico.

A Primeira Lei da Termodinâmica é a baseada no princípio de conservação de energia. Existem duas formas de modificar a energia interna (térmica) de qualquer sistema. Uma delas é extrair ou fornecer energia ao sistema através da aplicação de forças no mesmo, ou seja, através da realização de trabalho, e a outra forma é através de calor. Dessa forma, a 1ª Lei estabelece que a variação da energia interna (ΔU) de um sistema é dada pela diferença de energia térmica adquirida pelo sistema através de calor, usualmente chamada de quantidade de calor Q , e a energia que o próprio sistema converte através de trabalho W , ou seja,

$$\Delta U = Q - W, \quad (1)$$

a qual pode ser escrita na forma:

$$Q = \Delta U + W.$$

Esta última forma é mais interessante porque podemos ver claramente o princípio de conservação de energia. A quantidade de energia fornecida ao sistema através de calor ($Q > 0$) é igual a quantidade de energia convertida pelo sistema através de trabalho ($W > 0$) mais o aumento da energia térmica do mesmo ($\Delta U > 0$), ou seu aquecimento, decorrente do processo de conversão. Note que na equação (1) Q e W não são medidas de calor e trabalho, estes representam quantidades de energia adquirida (sinal positivo) ou perdida (sinal negativo) pelo sistema através do método de transferência de energia chamado calor e trabalho, respectivamente. É por isso que tanto Q quanto W possuem unidades de energia, o Joule (J).

Com o nosso experimento é possível explorar a 1ª Lei da Termodinâmica, dada pela equação (1), considerando o trabalho realizado no sistema ou pelo sistema como sendo nulo. Isso não é nenhum absurdo uma vez que não existe expansão ou compressão das paredes das colunas que constituem o nosso dispositivo. Sendo então $W = 0$, podemos escrever a equação (1) de maneira análoga como $\Delta U_M = Q_M$.

Considerando diferentes temperaturas mecânicas, T_{M1} e T_{M2} , como as temperaturas de equilíbrio inicial e final, respectivamente, de uma das colunas, podemos escrever a quantidade de energia fluindo para a coluna através de calor, Q_M , como:

$$Q_M = C_M(T_{M1} - T_{M2}), \quad (2)$$

que é o análogo mecânico da equação $Q = C(T_1 - T_2)$, sendo C a capacidade térmica do sistema.

Formalmente a capacidade térmica é definida por:

$$C = \frac{\delta Q}{dT}. \quad (3)$$

A diferencial da quantidade de calor por ser inexata, ou seja, depender da natureza do processo, é escrita como δQ . Isso significa que o calor não é uma propriedade física do sistema, diferentemente da temperatura, que pode ser medida no equilíbrio antes e depois da realização de qualquer processo, sendo por isso descrita como dT . Um mesmo sistema pode exibir diferentes capacidades térmicas, dependendo do processo sofrido por ele. As capacidades térmicas à pressão constante C_P e à volume constante C_V são de grande utilidade prática. Com o nosso experimento não é possível fazer tais distinções para C , mas este parâmetro pode ser definido e amplamente discutido. Ao verificar uma limitação da analogia ou onde ela falha, o professor estará identificando o passo 5 da estrutura do modelo TWA.

Considerando a 1ª Lei para $W = 0$, temos a partir da equação (2) que,

$$U_{2M} - U_{1M} = C_M(T_{M1} - T_{M2}),$$

$$C_M = \frac{U_{2M} - U_{1M}}{T_{M1} - T_{M2}}. \quad (4)$$

A capacidade térmica é a quantidade de energia necessária, transferida ao sistema através de calor, para elevar a temperatura do mesmo de 1°C. Para observar o análogo C_M desta propriedade em nosso experimento, basta tomar as colunas B e C do mesmo, considerando que estas são feitas de um mesmo material com dimensões diferentes. Desta forma é possível verificar qual possui a maior capacidade térmica. Como $U_M = E_M$ está associado com o volume de líquido armazenado no interior da coluna, a coluna que possuir maior volume de líquido armazenado, ou seja, aquela com maior diâmetro, representará o sistema com maior capacidade térmica, considerando é claro a mesma variação de temperatura $T_{M1} - T_{M2}$ para as duas colunas. Logo, tem-se $(U_{2M} - U_{1M})_B > (U_{2M} - U_{1M})_C$ de modo que $C_{MB} > C_{MC}$. Esta analogia permite associar diretamente a capacidade térmica de um sistema com a sua capacidade de armazenar energia térmica para uma mesma diferença de temperatura. E isso pode ficar ainda mais claro se o professor utilizar o conceito de calor específico c do sistema através da relação,

$$C = mc, \quad (5)$$

sendo m a massa do sistema. Como c é uma constante e possui o mesmo valor para as colunas B e C, pois estamos considerando que estas representam dois corpos de mesmo material, quanto maior a massa do sistema, relacionada com o volume de líquido armazenado, maior a sua capacidade térmica. Como $m_B > m_C$ novamente chegamos no resultado $C_{MB} > C_{MC}$.

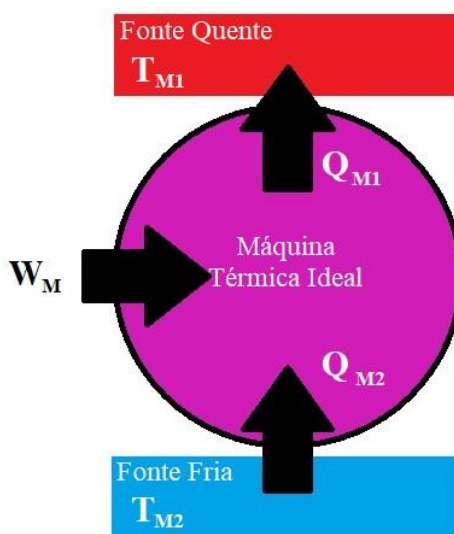
O análogo mecânico do trabalho W_M pode ser obtido a partir da discussão da 2ª Lei da Termodinâmica. Esta estabelece que é impossível conceber um processo cujo o único efeito seja transferir energia térmica através de calor de um sistema mais frio, temperatura menor, para um sistema mais quente, temperatura maior. Este é o enunciado de Clausius da 2ª Lei.

Como discutido anteriormente, nosso experimento permite demonstrar de maneira análoga que a energia térmica sempre flui espontaneamente do corpo de maior temperatura para o corpo de menor temperatura. Para realizar a transferência do líquido de uma coluna de altura menor para uma de altura maior nós utilizamos a eletrobomba. Esta será responsável pela realização de trabalho no sistema. Para ficar mais claro este processo, o professor pode utilizar o esquema de uma máquina térmica invertida, como a ilustrada na figura 3.7. Uma máquina invertida é definida como uma máquina térmica que opera de maneira reversa. Nesta, trabalho W_M precisa ser realizado no sistema para retirar uma quantidade de energia

térmica através de calor Q_{M2} da fonte fria e transferir uma quantidade de energia Q_{M1} para a fonte quente, de tal forma que:

$$Q_{M1} = W_M + Q_{M2}. \quad (6)$$

Figura 3. 7 – Máquina térmica invertida, em que trabalho deve ser realizado no sistema para extrair energia da fonte fria para ser transferida para a fonte quente. Este é o princípio de funcionamento de um refrigerador, como uma geladeira ou ar condicionado. Os parâmetros indicados são os análogos das temperaturas das fontes quente e fria, T_1 e T_2 , respectivamente, as energias Q_1 e Q_2 , retirada da fonte fria e transferida para a fonte quente através de calor, respectivamente, e a energia W transferida ao sistema através de trabalho, ou mais usualmente, o trabalho realizado no sistema.



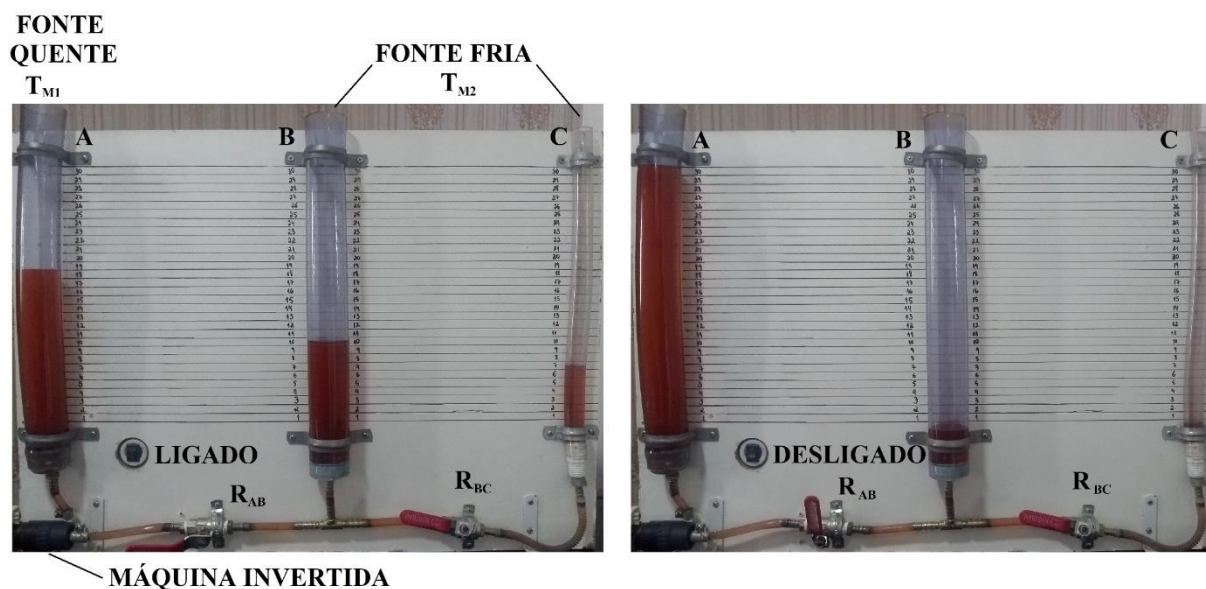
Fonte: Elaborado pelo autor.

A máquina invertida no nosso caso é a eletrobomba que retira uma quantidade de energia Q_{M2} da fonte fria através de trabalho elétrico, a qual pode ser representada pela coluna B ou C, ou ambas, e transfere uma quantidade de energia Q_{M1} para a fonte quente, dada pela coluna A. A figura 3.8 mostra este processo com a eletrobomba acionada retirando o líquido das colunas B e C e transferindo-o para a coluna A.

Apesar da quantidade de líquido retirada das colunas B e C ser a mesma da quantidade de líquido transferida para a coluna A, pode-se perceber que temos realmente $Q_{M1} > Q_{M2}$ no nosso experimento, pois para que a altura da coluna líquida de A aumente em relação a B e C, energia tem que ser fornecida à mesma através de trabalho pela ação da eletrobomba, pois de outra forma o líquido não subiria na coluna. Outra característica interessante da máquina invertida e que pode ser explorada de maneira bastante satisfatória em nosso experimento é que esta é o tipo mais eficiente de máquina idealizada por Carnot, pois uma máquina invertida não desperdiça energia. Como já discutido neste mesmo parágrafo todo o líquido de B e C é

bombeado para a coluna A, ou seja, toda a energia retirada da fonte fria é transferida para a fonte quente. Apesar da eficiência máxima, o professor pode mostrar que uma vez que W_M é sempre menor do que Q_{M1} , veja eq.(6), nenhuma máquina pode ter uma eficiência (W_M / Q_{M1}) de 100% ou maior. Note que a dissipação de energia em um sistema termodinâmico real também não possui um análogo no nosso experimento, passo 5 do modelo TWA.

Figura 3. 8 – Análogo de uma máquina térmica invertida. Nesta analogia a coluna A é análoga à fonte quente de temperatura T_{M1} da figura 3.7, as colunas B e C a fonte fria de temperatura T_{M2} , sendo $T_{M1} > T_{M2}$, e a eletrobomba o corpo de trabalho. À esquerda mostramos a eletrobomba sendo acionada e o líquido (energia Q_{M2}) sendo retirado das colunas B e C e sendo transferido para a coluna A (energia Q_{M1}) através da realização de trabalho W_M . Após todo o líquido ser bombeado a eletrobomba é desligada e o registro R_{AB} é fechado, como mostrado à direita.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Além das discussões apresentadas aqui o professor pode explorar uma discussão com os alunos sobre se a máquina invertida viola ou não a 2ª Lei da Termodinâmica, uma vez que energia está sendo transferida do corpo mais frio para o mais quente, como funciona um refrigerador, quais são as fontes frias e quentes do mesmo, como se dá o processo de realização de trabalho em um refrigerador, entre muitos outros. No Apêndice dessa dissertação apresentamos o produto educacional em uma linguagem acessível para o professor do ensino médio.

Capítulo 4

APLICAÇÃO DO PRODUTO EDUCACIONAL

O nosso produto educacional foi aplicado em uma escola particular do interior de São Paulo. A escola possui uma boa estrutura para o ensino com quadra poliesportiva, piscina, laboratório de ciências e informática. O material didático da escola é geralmente voltado para os vestibulares e vestibulinhos. Apesar disso, não tivemos nenhuma objeção da coordenação da escola para a aplicação da nossa proposta, pois esta auxiliou de maneira complementar o material voltado para o ensino de conteúdos do 2º e 3º anos do Ensino Médio.

A aplicação do produto educacional, tendo como guia o modelo TWA, foi realizada em uma sala de aula convencional, pois o experimento utilizado não apresenta nenhum tipo de risco para a integridade física dos alunos de maneira que fosse necessário utilizar um espaço apropriado, como um laboratório. Toda a aplicação foi feita em 4 aulas de 45 minutos em dois dias de aulas duplas, em uma turma de 24 alunos do 2º ano e em outra com 16 alunos do 3º ano, ambas do Ensino Médio.

O conteúdo da proposta foi dividido em três atividades. Os alunos que participaram das mesmas já tinham estudado alguns dos tópicos da Termodinâmica explorados neste trabalho em bimestres anteriores e de forma geral no 9º ano do ensino fundamental nas aulas de ciências. Eles já haviam cursado termologia e termodinâmica básica, especificamente. Nas próximas seções são discutidos os detalhes de cada atividade e como a estrutura do modelo TWA é reconhecida.

ATIVIDADE 1: MAPEANDO O CONHECIMENTO PRÉVIO DOS ALUNOS

Esta atividade foi realizada em duas aulas de 45 minutos para mapear o conhecimento prévio dos alunos sobre os conceitos de Termodinâmica propostos. Nesta atividade nós introduzimos o conceito alvo para os estudantes, passo 1 do modelo TWA, através de discussões sobre as definições de calor, temperatura, energia, capacidade térmica, entre outros.

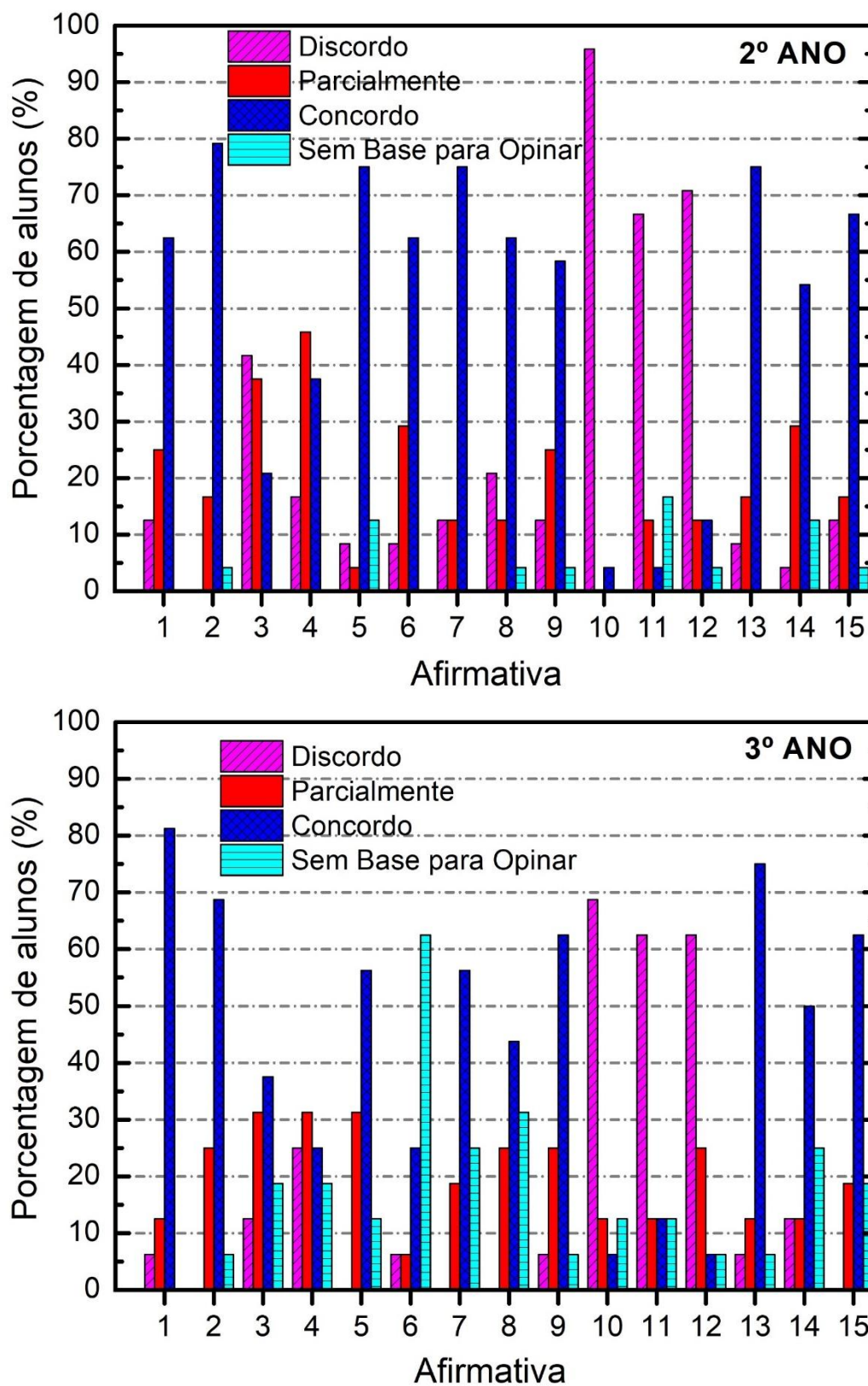
O conceito alvo foi introduzido aos alunos através de uma pesquisa de opinião com 15 afirmativas (anexo A) para eles refletirem sobre os conceitos termodinâmicos. Em cada afirmativa os alunos foram convidados a emitir o seu grau de concordância sobre o assunto em uma escala Likert com as seguintes opções: *1 Discordo*, *2 Parcialmente*, *3 Concordo* e *4 Sem Base para Opinar*. As respostas foram muito úteis para fazer um mapeamento sobre os conceitos de maior dificuldade dos alunos para dar um melhor direcionamento para a aula da segunda atividade, em que foi utilizado o experimento para a realização do análogo mecânico.

Nas afirmativas apresentadas relacionamos o dia a dia dos alunos, sempre que possível, com os conceitos termodinâmicos estudados, visando uma maior aproximação da ciência e o que estava sendo trabalhado em sala de aula com o mundo a volta dos alunos. Durante as discussões em sala de aula esse tipo de relação também foi abordado com frequência. Nos gráficos da figura 4.1 apresentamos o grau de concordância dos alunos do 2º e 3º anos, separadamente, para cada afirmativa feita na pesquisa.

É interessante notar que, apesar da diferença de um ano entre as duas turmas, a distribuição das respostas é semelhante para a maioria das questões, com maior discrepância na questão 3. Nesta foi afirmado, de maneira equivocada, que “*o calor é a quantidade de energia de um corpo*”. A maioria dos alunos do 2º ano discordaram dessa informação enquanto que a maioria dos alunos do 3º ano concordaram com a mesma. A discordância da afirmativa 3 estava em total alinhamento com a concordância da afirmativa 2, que afirmava que “*o calor está associado a transferência de energia térmica*”. Em ambas as turmas foi observada tal concordância.

Notadamente os alunos de ambas as turmas ficaram confusos nas afirmativas 3 e 4. Na afirmativa 4 é descrito que “*o calor é a temperatura de um corpo*”. Nas quatro primeiras afirmativas relacionamos a temperatura, o calor e a energia de um corpo.

Figura 4.1 - Grau de concordância dos alunos em uma escala do tipo Likert para cada uma das 15 afirmativas apresentadas na atividade 1. Na parte superior apresentamos o percentual de alunos do 2º ano, de um total de 24 alunos, e na parte inferior os alunos do 3º ano, de um total de 16 alunos, que realizaram a atividade.



Fonte: Elaborado pelos autores.

Os resultados mostram que existe uma maior dificuldade em diferenciar tais conceitos. Contudo, na afirmativa 15 “o calor é a forma pela qual a energia térmica é transferida para outro corpo devido à diferença de temperatura entre eles”, a qual traz uma relação conceitual mais elaborada entre calor, energia e temperatura, a maioria dos alunos de ambas as turmas concordaram corretamente.

Outra observação interessante é o maior uso da opção “*Sem Base para Opinar*” dos alunos do 3º ano em comparação com os alunos do 2º ano. Isso se deve, provavelmente, ao fato dos alunos do 2º ano terem visto o assunto relacionado recentemente, enquanto que os alunos do 3º ano estavam iniciando uma revisão do mesmo um ano depois de terem discutido tais conceitos. Esta opção foi a mais utilizada na afirmativa 6, “*O calor específico indica a quantidade de energia transferida através calor que um corpo precisa para que um grama dessa substância mude sua temperatura em um grau*”. Nesta, mais de 60% dos alunos do 2º ano concordaram com a afirmativa.

A maioria das respostas dos alunos de ambas as turmas estavam de acordo com os princípios da Termodinâmica discutidos em sala de aula, de maneira que foi possível mapear as maiores dificuldades que os alunos tinham com relação a alguns conceitos específicos de maneira mais simples.

ATIVIDADE 2: APRESENTAÇÃO DO ANÁLOGO MECÂNICO

Na segunda atividade, realizada em uma aula de 45 minutos, foi apresentado aos alunos o percentual de suas respostas para cada afirmativa feita na pesquisa de opinião apresentada na atividade 1. Na sequência o experimento foi apresentado aos alunos e após discutir alguns conceitos básicos sobre o funcionamento do mesmo, começamos a explorar as analogias para a discussão dos conceitos termodinâmicos propostos e as maiores dificuldades dos alunos, tendo como base a pesquisa de opinião. Neste momento nós iniciamos o passo 2 do modelo TWA através da identificação, juntamente com os alunos, dos principais parâmetros do sistema mecânico e como os processos realizados no mesmo podem ser relacionados com tais parâmetros. Em seguida as características relevantes do alvo (sistema termodinâmico) e do análogo (sistema mecânico) foram identificadas, passo 3 do modelo TWA, para o estabelecimento de uma equivalência de um para um entre os principais

parâmetros dos dois sistemas e dos processos envolvidos, em acordo com o passo 4 do modelo TWA.

O experimento foi feito de maneira demonstrativa, mas de forma bastante descontraída, para que os alunos pudessem discutir e questionar sobre os conceitos termodinâmicos através da analogia proposta. Este procedimento beneficiou significativamente a relação professor-aluno e aluno-aluno durante a aula, pois houve muitas discussões, perguntas e participação de todos durante a atividade.

O fechamento da atividade foi feito com o passo 5 do modelo TWA, em que foram apresentadas as limitações e impossibilidades do sistema análogo para estabelecer analogias que pudessem diferenciar a capacidade térmica a volume e pressão constantes e representar a dissipação de energia observada em máquinas térmicas reais.

O uso das analogias auxiliou os alunos a perceber melhor os conceitos sobre temperatura, calor e energia, e a diferenciar e relacionar estes parâmetros, passo 6 do modelo TWA. A possibilidade de realizar os processos análogos inúmeras vezes contribuíram para que os alunos perguntassem mais sobre os fenômenos e conceitos abordados até que suas dúvidas ficassem aparentemente sanadas, ou seja, os alunos conseguiram chegar a uma conclusão sobre o que foi estudado, a princípio.

Para checar isso melhor elaboramos um questionário dissertativo, cujos resultados são apresentados a seguir.

ATIVIDADE 3: QUESTIONÁRIO FINAL

Após a discussão dos conceitos propostos com o auxílio do análogo mecânico um questionário composto por 10 perguntas dissertativas foi entregue aos alunos para finalizar a aplicação do produto educacional. Escolhemos fazer um questionário dissertativo para permitir que os alunos se expressassem, escrevendo com suas palavras, o que entenderam sobre os fenômenos e conceitos trabalhados. Esta atividade foi realizada em uma aula de 45 minutos.

No questionário final, apresentado no anexo B, as perguntas foram voltadas para os conceitos de calor, temperatura, capacidade térmica e calor específico, relacionando tais conceitos, sempre que possível, com situações reais do dia a dia dos alunos.

A condição de resposta dissertativa fez com que os alunos tivessem dificuldades em se expressar para responder o questionário. A discussão dos conceitos termodinâmicos auxiliada pelo uso de analogias pode ter criado um conflito entre a terminologia científica trabalhada com as concepções espontâneas dos alunos sobre o tema, que são muito fortes, fazendo com que os mesmos sentissem dificuldades em se expressar através da escrita. Devido a isso, foi necessário o professor intervir, de maneira dialógica, para entender melhor os conceitos adquiridos pelos alunos e ajudá-los a se expressarem. Apesar da maior participação dos alunos durante a discussão das analogias com o experimento, a maioria dos alunos continuaram mantendo uma terminologia relacionada às suas concepções espontâneas. No caso da Termodinâmica, o uso inadequado dos conceitos sobre calor, energia e temperatura, por exemplo, é algo problemático até mesmo nos livros didáticos, como discutido anteriormente, sendo difícil realizar o estabelecimento correto ou mais adequado de tais conceitos no dia a dia dos alunos.

Esta conclusão pode ser observada pela comparação das respostas dos alunos com a resposta esperada, fornecida pelo professor de acordo com os princípios da Termodinâmica. Nos gráficos da figura 4.2 apresentamos o percentual de alunos do 2º e 3º anos que responderam as questões corretamente, corretamente de maneira parcial, incorretamente e não responderam. Nas questões que foram consideradas parcialmente corretas observa-se o uso frequente de concepções espontâneas, em que os alunos confundem os conceitos de calor, temperatura e energia.

Na questão 2, por exemplo, foi feita a seguinte pergunta:

2) O cobertor é uma fonte de calor?

Resposta Esperada: Não, o cobertor é um isolante térmico.

Note pelo gráfico inferior da figura 4.2 que 81% dos alunos do 3º ano responderam a mesma utilizando fortemente concepções alternativas, como mostrado nos exemplos abaixo:

“Não, pois ele só segura a temperatura gerada do próprio corpo.”

“Não, porque não possui energia.”

“Não, porque o cobertor é uma fonte de isolante.”

“Não, pois o cobertor não possui energia, não é um condutor é um isolante.”

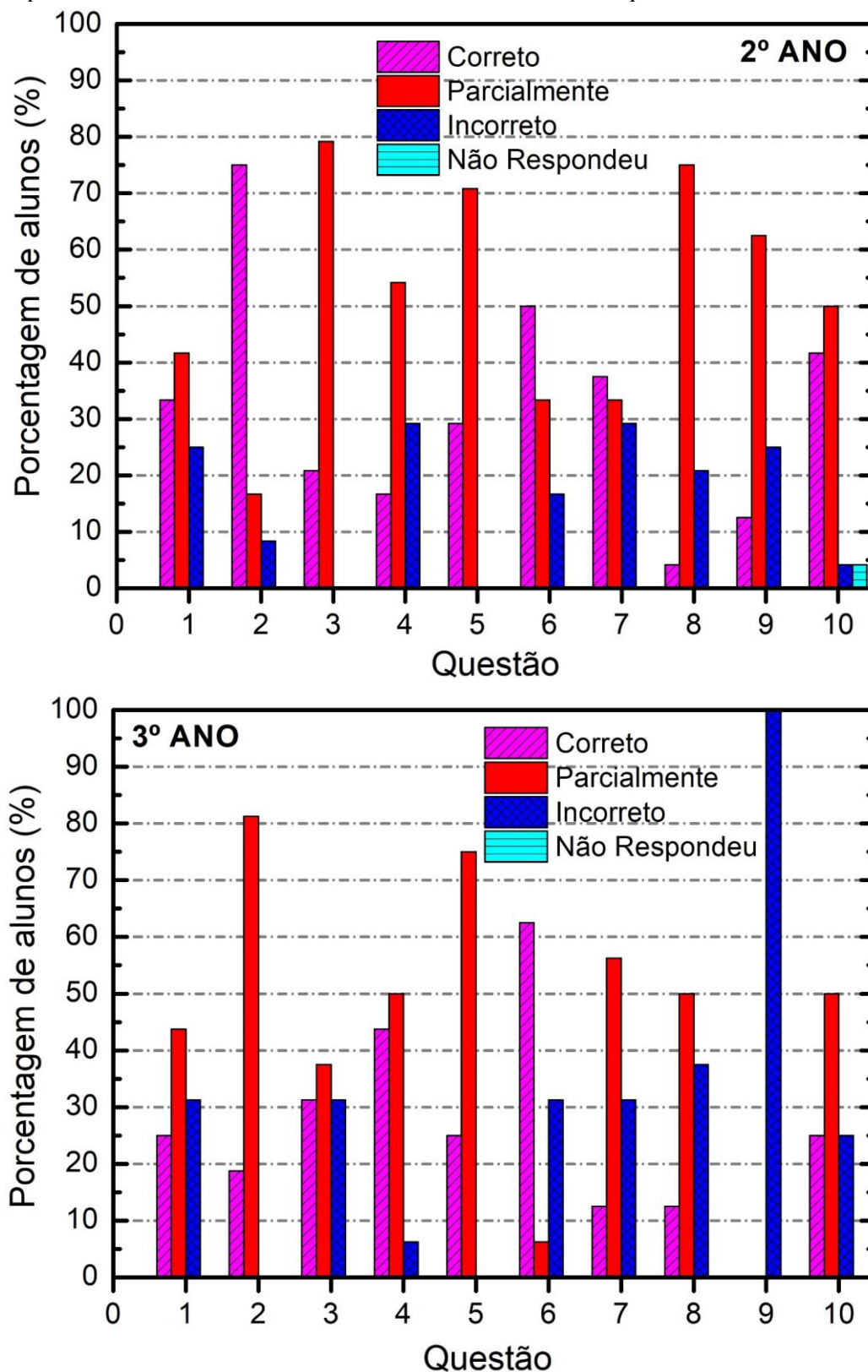
“Não, porque ele impede que você troque temperatura com o meio.”

“Não. O cobertor é um material isolante que consegue a passagem de calor.”

“Não, ele apenas impede que haja troca de calor com o meio.”

“Não, pois o cobertor é um isolante ele isola e o calor do corpo, o que faz sentimos esse calor. O calor do corpo se move e o cobertor isola ele.”

Figura 4.2 - Respostas dos alunos para o questionário final, composto por 10 questões dissertativas. Estas foram comparadas com as respostas esperadas fornecidas pelo professor. Na opção parcialmente prevalece a presença de concepções alternativas nas respostas dos alunos com relação ao tema proposto. Na parte superior apresentamos o percentual de alunos do 2º ano, de um total de 24 alunos, e na parte inferior os alunos do 3º ano, de um total de 16 alunos, que realizaram a atividade.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Pelas respostas fica evidente a confusão entre os conceitos de temperatura, calor e energia. Na última resposta mostrada anteriormente, o aluno usa a terminologia calor como se este fosse uma substância presente no corpo (energia) ou temperatura.

Note pelo gráfico superior da figura 4.2 que 75% dos alunos do 2º ano responderam conforme o esperado, de maneira que o conceito abordado nesta questão não representou uma dificuldade para eles.

Nas questões 3 e 6 abordamos os conceitos de calor e temperatura para verificar se o uso das analogias favoreceu de alguma maneira a separação dos dois conceitos pelos alunos. Abaixo apresentamos um conjunto de 6 respostas, entre corretas, parcialmente e incorretas, para cada questão considerando os mesmos alunos em ambas as questões. Para os alunos do 2º ano utilizamos a legenda ALUNO 2.1, 2.2, ... , 2.6 e para os alunos do 3º ano ALUNO 3.1, 3.2, ... , 3.6.

3) O que é o calor?

Resposta esperada: Método ou forma pela qual energia é transferida de um corpo para outro devido a diferença de temperatura entre eles.

- ALUNO 2.1: *“É a forma pela qual a energia térmica é transferida para o outro corpo devido a diferença de temperatura entre eles.”*
- ALUNO 2.2: *“É transferência de energia de um corpo mais quente para o mais frio, até entrar em equilíbrio térmico.”*
- ALUNO 2.3: *“É a transferência de energia térmica de um corpo para o outro.”*
- ALUNO 2.4: *“O corpo recebendo energia térmica.”*
- ALUNO 2.5: *“É uma transferência de energia, ou seja, nos sedemos ou recebemos calor.”*
- ALUNO 2.6: *“Transferência de energia de um corpo quente para um corpo frio, é uma fonte de energia.”*

- ALUNO 3.1: *“É a energia transferida do corpo mais quente para o menos quente.”*
- ALUNO 3.2: *“É a troca de energia entre corpos, que ocorre de forma natural e sempre do mais para menos.”*
- ALUNO 3.3: *“Calor é uma fonte de energia.”*
- ALUNO 3.4: *“É uma sensação térmica produzida por exteriormente pelo contato do corpo.”*
- ALUNO 3.5: *“Estado de que é quente.”*
- ALUNO 3.6: *“Energia, influenciada por meios externos.”*

6) O que é temperatura?

Resposta esperada: Qualquer resposta relacionada com a medida da intensidade do movimento térmico ou agitação das moléculas constituintes de um sistema.

- ALUNO 2.1: *“É a quantidade de energia no corpo, temperatura é a agitação da energia, já o calor é a troca de energia”*
- ALUNO 2.2: *“Perda de energia.”*

- ALUNO 2.3: *“Temperatura indica o quão agitada estão as moléculas, calor é a transferência de energia.”*
- ALUNO 2.4: *“Seu equilíbrio térmico troca de a diferença transferência de calor regula a temperatura.”*
- ALUNO 2.5: *“A temperatura é a agitação das moléculas do corpo. Enquanto a temperatura é a agitação das moléculas, o calor é a troca de energia dessas moléculas com outras.”*
- ALUNO 2.6: *“A quantidade de agitação das moléculas. Calor é a transferência de energia térmica e temperatura é a agitação das moléculas.”*

- ALUNO 3.1: *“A temperatura mede o nível das agitações de moléculas.”*
- ALUNO 3.2: *“É a agitação de moléculas de um corpo.”*
- ALUNO 3.3: *“Nível de calor.”*
- ALUNO 3.4: *“Vai ser um grau de temperatura do seu corpo.”*
- ALUNO 3.5: *“Grau de calor ou de frio do ambiente.”*
- ALUNO 3.6: *“Agitação das moléculas.”*

Note que é possível identificar todo tipo de resposta nos exemplos apresentados, desde respostas robustas, como dos alunos 2.3 e 3.1, respostas corretas em uma questão e incorretas em outra (alunos 2.5 e 3.6), respostas elaboradas com o uso de concepções espontâneas (alunos 2.6 e 3.3), em que os conceitos de calor, temperatura e energia são misturados, à respostas completamente confusas (alunos 2.4 e 3.5).

Outro ponto muito importante que pudemos abstrair deste questionário é o quão criterioso devemos ser durante a elaboração de uma questão sobre Física. Note na figura 4.2 que a maioria dos alunos acertaram parcialmente a questão 5, a qual é descrita como:

5) É possível fornecer energia térmica a um objeto sem que haja variação de sua temperatura?

Esta questão comporta as duas respostas, SIM e NÃO, ou seja, qualquer resposta que fosse dada os alunos estariam corretos. A resposta NÃO é justificada pelo fato da energia térmica estar relacionada com a energia cinética interna do sistema, translação, rotação e vibração das moléculas, a qual caracteriza o movimento térmico, cuja intensidade é dada pela temperatura. A resposta SIM pode ser justificada com um processo isotérmico, por exemplo, no qual energia é fornecida ao sistema através de trabalho, e durante este processo, a temperatura do sistema é mantida constante. O risco em elaborar esse tipo de questão é, o professor não se atentar para processos específicos que podem ser conduzidos na Termodinâmica, levando-o a acreditar que apenas uma das respostas pode estar correta. Todos os alunos do 2º e 3º anos tentaram justificar suas respostas, mas para isso, a maioria deles utilizaram concepções espontâneas.

Outra observação interessante é com relação a questão 9:

9) Ao entrar em uma sala climatizada à temperatura de 20°C, você caminha descalço sobre um piso de mármore e em seguida sobre um tapete. Qual dos dois se encontra a uma temperatura mais baixa?

Resposta esperada: Os dois estão à mesma temperatura de 20°C, pois a sala está climatizada nesta temperatura, o que significa que todos os objetos no interior da sala estão em equilíbrio térmico a esta temperatura. A sensação térmica no piso de mármore pode fazer com que o observador acredite que o mesmo esteja a uma temperatura menor do que o tapete. Isso ocorre porque o calor específico do mármore é menor do que o do tapete, fazendo com que a taxa de troca de energia entre o pé do observador e o mesmo seja maior em relação ao tapete, ou seja, o mármore é melhor condutor térmico.

Note pela figura 4.2 que todos os alunos do 3º ano responderam a esta questão de maneira incorreta, afirmando que o piso de mármore estava a temperatura menor. Isso deixa evidente que o entendimento científico sobre os conceitos abordados sobre calor, temperatura e energia ainda precisam ser melhor trabalhados, pois estes ainda não foram estabelecidos pelos alunos em determinadas situações. Apesar de observarmos respostas variadas, isso também pode ser identificado nos alunos do 2º ano.

Capítulo 5

CONCLUSÕES E CONSIDERAÇÕES FINAIS

As analogias propostas neste trabalho com a utilização do experimento mecânico foram de grande utilidade para o ensino dos temas da Termodinâmica conduzidos no Ensino Médio. A facilidade com que os conceitos puderam ser abordados e simulados, repetidas vezes, faz com que nosso experimento seja viável para ser utilizado em qualquer nível de ensino, desde o fundamental até os cursos de graduação em física e engenharias. Essa facilidade gerada pelo análogo contribuiu para auxiliar o professor a estabelecer uma melhor explicação sobre os conceitos de calor, temperatura, energia e suas relações, além de vários outros, para tentar mitigar o uso recorrente de terminologias incorretas e conceitos imprecisos tanto nos livros didáticos quanto no dia a dia das pessoas.

Com o nosso experimento foi possível estabelecer uma equivalência de um para um dos parâmetros mais relevantes do sistema alvo (termodinâmico) com os parâmetros mais relevantes do sistema análogo (mecânico), sendo possível identificar todos os passos da arquitetura guia do modelo TWA (*Teaching With Analogies*). Além dos parâmetros também fizemos analogias dos processos, apresentando os limites e as falhas do sistema análogo em relação a sistemas termodinâmicos reais.

Analisando o questionário final foi possível notar que a maioria dos alunos utilizaram de maneira frequente concepções alternativas para a explicação dos fenômenos e conceitos termodinâmicos discutidos. Alguns alunos descrevem a temperatura como energia e calor, associando a mesma com nossa sensação térmica de quente e frio, outros trataram o calor como fonte de energia do sistema ou uma substância que pode ser transmitida de um corpo para outro, em outros. Isso mostra como é difícil trabalhar os conceitos de temperatura, calor

e energia, pois logo após o estímulo ser fornecido através de discussões com o uso do experimento e as analogias, tais concepções ainda prevaleceram.

Apesar disso, as analogias propostas para descrever o calor, a capacidade térmica de um sistema, sua temperatura, trabalho, energia, entre outros, utilizando um experimento simples e de fácil manipulação, contribuiu de maneira significativa para estabelecer discussões mais coerentes com a realidade física e científica do sistema em estudo, houve maior interação entre o professor e os alunos e entre os alunos, favorecendo o surgimento de mais oportunidades de reflexão sobre o assunto abordado. Vários alunos relataram que passaram a enxergar os conceitos da Termodinâmica de uma forma diferente da usual e que o experimento ajudou a diferenciar conceitos, que a princípio, pareciam ser a mesma coisa para eles.

Além dos benefícios de interação em sala de aula este trabalho possibilitou analisar erros sobre os tópicos da Termodinâmica presentes em livros didáticos utilizados tanto nos níveis básicos quanto no nível superior de ensino. Isso foi muito útil para mim, como professor, pois percebi a necessidade constante de verificação do material de trabalho para garantir a transmissão do conhecimento aos alunos de forma correta e mais adequada.

REFERÊNCIAS

AGUIAR JR, O. Calor e temperatura no Ensino Fundamental: relações entre o ensino e a aprendizagem numa perspectiva construtivista. Investigações em Ensino de Ciências, Belo Horizonte, v. 4, n. 1, p. 73-90, 1999.

AMARAL, E. M. R. do; MORTIMER, E. F. Uma proposta de perfil conceitual para o conceito de calor. Revista Brasileira de Pesquisa em Educação em Ciências, v. 1 , n. 3 , set./dez. 2001.

ATAÍDE, M.C.S. Experimentos que geram rejeitos químicos com metais pesados em escolas da educação básica. 2010. Dissertação (mestrado em Ensino de Ciências Naturais e Matemática) - Centro de Ciências Exatas e da Terra, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2010.

ATKINS, P. The Laws of Thermodynamics: A Very Short Introduction. Oxford University Press, 2010.

AUSUBEL, D. P. A aprendizagem significativa. v.1, São Paulo: Moraes, 1982.

AUSUBEL, D. P. Aquisição e Retenção de Conhecimentos: Uma Perspectiva Cognitiva. Tradução Lígia Teopisto. Lisboa: Paralelo, 2003.

BIASOTO, J. e CARVALHO, A. P. Análise de uma atividade experimental que desenvolva a argumentação dos alunos. *In*: SIMPÓSIO NACIONAL DE ENSINO DE FÍSICA. São Paulo, 2007.

BONADIMAN, H.; NONENMACHER, E. B. O gostar e o aprender no ensino de física: uma proposta metodológica. Caderno Brasileiro de Ensino de Física, Florianópolis, v. 24, n. 2, p. 194-223, Ago. 2007.

CINDRA, L.; TEIXEIRA, P. B. Uma discussão conceitual para o equilíbrio térmico. Caderno Brasileiro de Ensino de Física, Florianópolis, v. 21, p. 176-193, ago. 2004.

FEYNMAN, R. P. Só pode ser brincadeira, sr. Feynman! As excêntricas aventuras de um físico. Introdução de Bill Gates. Tradução: Donaldson M. Garschagen e Renata Guerra. Editora Intrínseca, 2019.

GENTNER, D. The mechanisms of analogical learning. *In*: VOSNIADOU, S. e ORTONY, A. (Eds.). Similarity and analogical reasoning. Cambridge: Cambridge University Press, 1989, p. 199-241.

GLYNN, S. Conceptual Bridges: Using analogies to explain scientific concepts. The Science Teacher, v. 62, n. 9, p. 24-27, Dec. 1995.

HEWITT, P. G. Física Conceitual. 12ª Edição. Bookman, 2015.

KOPP, F. A.; ALMEIDA, V. Analogias e metáforas no ensino de Física Moderna apresentadas nos livros didáticos aprovados pelo PNLD 2018. Caderno Brasileiro de Ensino de Física, Santa Cruz do Sul, v. 36, p. 69-98, abr. 2019.

MARTINEZ, I. G. ; FERREIRA, I S. A construção dos conceitos de calor e de temperatura no ensino fundamental. Brazilian Applied Science Review, Brasília, v. 3, n. 3, jul. 2019.

MOREIRA, M. A. Aprendizagem Significativa. 1. ed. Brasília: Editora da UnB, 1999. 152 p.

MOREIRA, M. A. Aprendizagem significativa: um conceito subjacente. Aprendizagem Significativa em Revista/Meaningful Learning Review, Porto Alegre, v. 1, n. 3, p. 25 - 46, 2011.

NARDI, R. (org). Ensino de ciências e matemática. In: temas sobre a formação de professores. São Paulo: Cultura Acadêmica, 2009.

NARDI, R. e BOZELLI , F. C. Interações discursivas e o uso de analogias no ensino de física. Investigações em Ensino de Ciências. v. 17, n. 1, p. 81-107, 2012.

NUSSENZVEIG, H. M. Curso de Física básica 2: Fluidos, Oscilações e Ondas, Calor. 4. ed. São Paulo: Editora Edgar Blucher, 2002.

PIETROCOLA, M. *et al.* Física em contexto. São Paulo: FTD S.A., 2010.

RAMOS, T. C.; MOZZER, N. B. Análise do Uso da Analogia com o “Pudim de Passas” Guiado pelo TWA no Ensino do Modelo Atômico de Thomson. Química Nova na Escola, São Paulo, v. 40, n. 2, p. 106-115, maio. 2018.

ROSA, C. W. e ROSA, A. B. Ensino de Física: objetivos e imposições no ensino médio. Revista Electrónica de Enseñanza de las Ciencias, Passo Fundo, v. 4, n. 1, 2005.

SILVA, H. M. D. e LABURÚ, C. E. Reflexões para subsidiar discussões sobre o conceito de calor na sala de aula. Caderno Brasileiro de Ensino de Física. Florianópolis, v. 25, n. 3, p. 383-396, dez. 2008.

VIEIRA, C.; PEREIRA, A. P. e MACKEDANZ, L. F. Emprego de experimentos no ensino médio para ressignificação dos conceitos de temperatura e calor. Ensino de Ciências e Tecnologia em Revista - ENCITEC, v. 1, n. 1, 2011.

VOSNIADOU, S. and ORTONY, A. (Eds.). Similarity and analogical reasoning. Cambridge: Cambridge University Press, 1989.

APÊNDICE

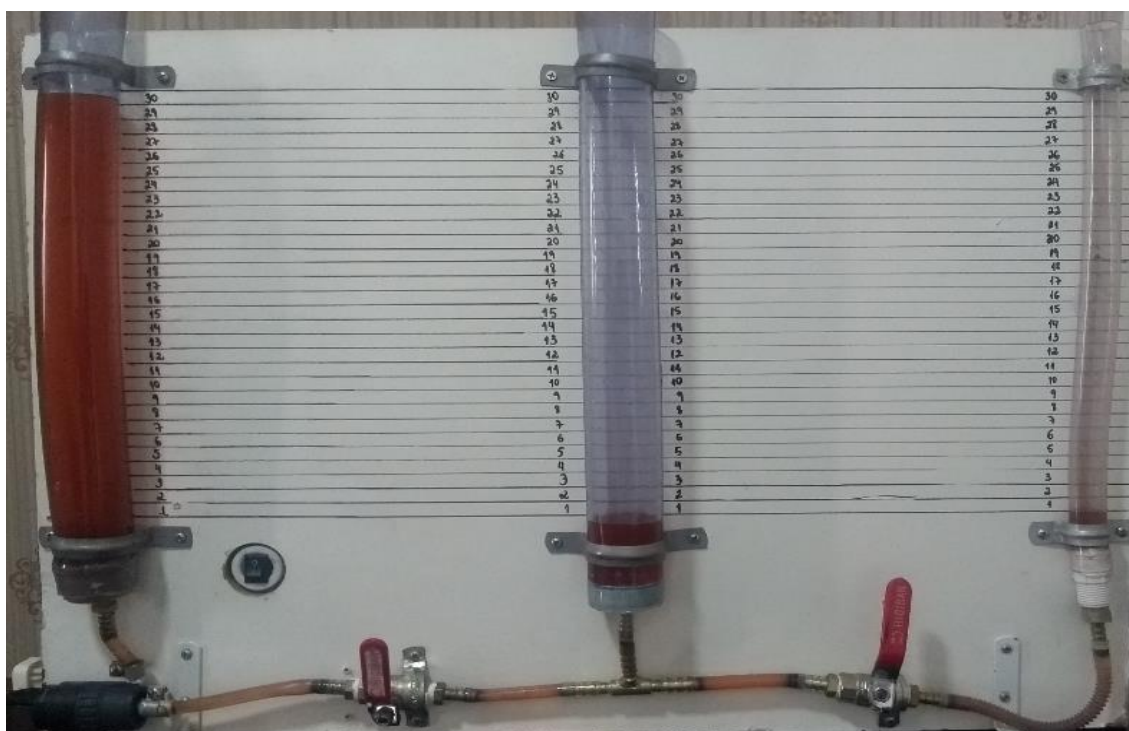
PRODUTO EDUCACIONAL

MNPEF
Mestrado Nacional
Profissional em
Ensino de Física

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

SBF
SOCIEDADE BRASILEIRA DE FÍSICA

ANÁLOGO MECÂNICO PARA A DEFINIÇÃO DE CALOR



R. Silva e J. A. Souza

UFSCar – Sorocaba
Dezembro de 2020

Prefácio

A natureza do calor e seus aspectos tem sido tema de grande discussão filosófica ao longo dos anos e é a base para o desenvolvimento da Termodinâmica. Nosso objetivo com este produto educacional é auxiliar o professor de física na definição de conceitos como calor, temperatura, capacidade térmica, equilíbrio térmico, trabalho, energia e a relação destes conceitos com a Lei Zero, a Primeira e Segunda Leis da Termodinâmica, através de um análogo mecânico de simples montagem e manipulação.

O experimento proposto pode ser facilmente construído de diferentes maneiras e materiais alternativos. Este é composto por vasos cilíndricos comunicantes com diferentes alturas e diâmetros, registros para controlar o fluxo do líquido entre os cilindros, uma eletrobomba de gasolina para partida a frio de 12V, acionada com um interruptor, para bombear o líquido do sistema para um dos cilindros, conexões, parafusos, cantoneiras e um painel de fibra de MDF para fixação do experimento. A transferência do líquido de um vaso comunicante para outro funciona como um processo análogo ao processo de transferência de energia térmica através de calor entre sistemas termodinâmicos em contato térmico. Neste foi possível estabelecer uma relação de um para um entre os parâmetros e processos do sistema mecânico com o sistema termodinâmico. O volume do líquido nos cilindros representa a quantidade de energia térmica de um corpo, a transferência ou fluxo do fluido de uma coluna para outra é análoga ao processo de transferência ou fluxo de energia térmica entre os corpos que compõem o sistema termodinâmico, o registro entre os cilindros, por ser o método ou forma pela qual o fluido (energia térmica) é transferido de um corpo para outro devido a uma diferença de altura (temperatura), é o análogo do calor, o nível do líquido em cada coluna representa suas respectivas temperaturas, a capacidade de armazenamento de cada cilindro é o análogo da capacidade térmica de um corpo, sendo maior nos cilindros de maior volume, e a eletrobomba é o análogo de um agente externo realizando trabalho no sistema termodinâmico.

A analogia proposta tem o potencial de contribuir significativamente para melhorar as discussões dos conceitos termodinâmicos com os alunos em sala de aula para contrapor as concepções espontâneas sobre o tema. 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 de acordo com sua realidade. Esperamos que esse material seja útil para complementar as aulas de Termodinâmica e que este possa contribuir para a diminuição das inconsistências sobre os conceitos de calor, temperatura, energia e suas relações, recorrentes no dia a dia das pessoas e até mesmo nos livros didáticos sobre o assunto.

Para dúvidas ou informações adicionais, envie um e-mail para
digolife2@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, dezembro de 2020

Sumário

A.1. MONTAGEM DO EXPERIMENTO	43
A.2. ANALOGIAS UTILIZADAS PARA O ENSINO DE CONCEITOS TERMODINÂMICOS	46
A.3. CONCEITOS DE FÍSICA QUE PODEM SER DISCUTIDOS COM O SISTEMA ANÁLOGO	47
A.3.1. Lei Zero da Termodinâmica e os Análogos da Temperatura e do Calor	47
A.3.2. 1ª e 2ª Leis da Termodinâmica e os Análogos da Quantidade de Calor e do Trabalho	52
A.4. SUGESTÃO DE QUESTIONÁRIOS PARA SEREM APLICADOS JUNTO COM O PRODUTO EDUCACIONAL.....	57

A.1. MONTAGEM DO EXPERIMENTO

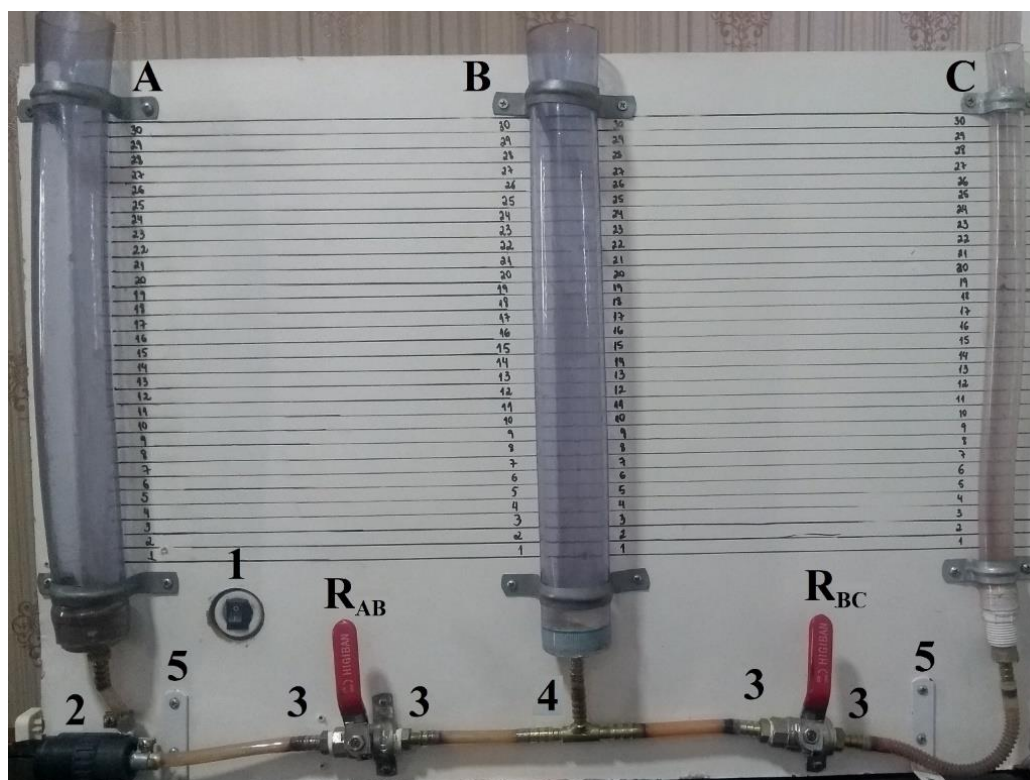
Nosso principal objetivo com este produto educacional é auxiliar o professor de física na definição de conceitos como calor, temperatura, capacidade térmica, energia e a relação destes com a Lei Zero, a Primeira e Segunda Leis da Termodinâmica através de um análogo mecânico de simples montagem e manipulação.

Nosso produto educacional foi construído utilizando vasos cilíndricos comunicantes, que nós chamamos de colunas, com diferentes alturas e diâmetros, registros para controlar o fluxo do líquido entre as colunas, uma eletrobomba de gasolina para partida a frio de 12V, acionada com um interruptor para bombear o líquido do sistema para uma das colunas, conexões, parafusos, cantoneiras e um painel de fibra de madeira (MDF – *Medium-density Fibreboard*) para fixação do experimento. A vedação da parte inferior das colunas pode ser feita com materiais alternativos como tampas plásticas de potes, isopor, etc. No nosso experimento foi utilizado cap tampão, silicone, veda rosca e abraçadeiras. Todos os materiais utilizados e suas especificações podem ser visualizados na imagem do experimento montado e pronto para ser utilizado apresentado na figura A.1.

A eletrobomba utilizada no experimento é um componente de veículos automotores, cuja função é acionar o reservatório de gasolina ou reservatório de água para limpeza dos para-brisas. Esta pode ser encontrada em qualquer loja de autopeças ou ferro velho de veículos. Na figura A.2 detalhamos melhor como a conexão das mangueiras de ¼” é feita com a eletrobomba, interligando a coluna A com o restante do sistema. Também é mostrado a montagem do circuito elétrico físico da eletrobomba nas conexões no corpo A e com o registro do esquema.

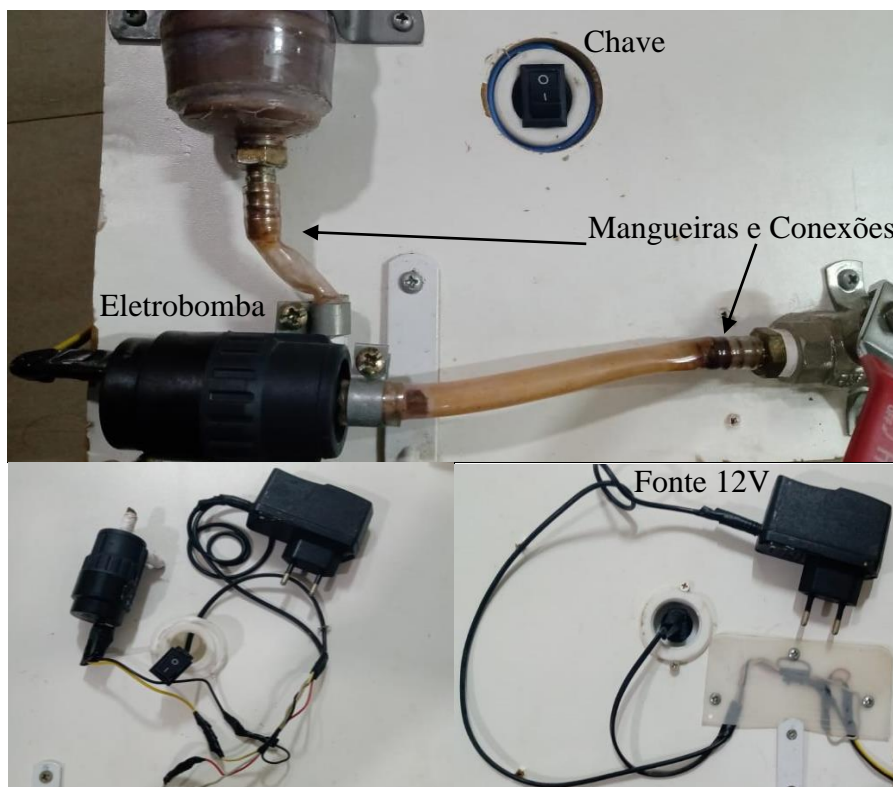
Para acionar o experimento é necessário inserir um fluido, como água, de preferência com um corante para melhor visualização, no interior de uma das colunas ou em todas as colunas no nível desejado pelo professor. Com os registros abertos o fluido tende sempre a permanecer no mesmo nível em todas as colunas independentemente de suas dimensões e até mesmo do seu formato. O processo de transferência do fluido entre as colunas foi utilizado para ser análogo ao processo de transferência de energia térmica através de calor e trabalho entre as partes de um sistema termodinâmico composto por até três corpos em contato térmico.

Figura A.1 – Experimento do nosso produto educacional montado mostrando as três colunas, A e B feitas com mangueiras transparentes de uma polegada e meia (1.½”) e C de ½”, todas com 40 cm de comprimento. Para fazer o vaso comunicante entre as colunas foi utilizada uma mangueira transparente de ¼” e 50 cm de comprimento. Dois registros de ¼”, R_{AB} e R_{BC} , foram instalados entre as colunas AB e BC, respectivamente. Uma fonte de energia elétrica de 12V foi instalada próximo à coluna A junto a um interruptor (1) para acionar a bomba de gasolina (2) responsável por bombear o líquido do sistema para a coluna A. As conexões entre a mangueira que forma o vaso comunicante e as colunas foram feitas com conectores do tipo espigão fixo macho de ¼” com rosca de ¼” (3), nos registros e nas colunas A e C, e um do tipo T (4) na coluna B. Todo o dispositivo foi fixado com parafusos em um painel de MDF de 1,0 m de largura por 0,5 m de altura utilizando braçadeiras para tubo em forma de U com dimensões adequadas para cada parte do experimento. Para manter o aparato na vertical foram utilizadas 4 cantoneiras de (50 x 50) mm (5) que funcionaram como pés de sustentação para o experimento. As escalas apresentadas ao lado das três colunas estão todas no mesmo nível e possuem resolução de 1 cm para melhor verificar e comparar a altura das colunas de líquido formadas durante o funcionamento do dispositivo.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura A.2 – Na parte superior apresentamos as conexões da mangueira de ¼” com a eletrobomba, interligando a coluna A com o restante do sistema. Na parte inferior à esquerda é mostrado a parte elétrica do sistema com uma fonte de 12V ligada à eletrobomba e a uma chave liga e desliga para o acionamento da eletrobomba. Na parte inferior à direita apresentamos a chave fixada no painel de MDF com o sistema pronto para ser utilizado.



Fonte: Elaborado pelo autor.

As especificações da eletrobomba e da fonte utilizadas estão descritas na Tabela A.1.

Tabela A.1 – Especificações técnicas da eletrobomba e da fonte utilizada no experimento.

<i>Eletrobomba de Partida a Frio</i>	<i>Fonte</i>
- 1 Saída	- Voltagem de entrada: 110/220 V Bivolt
- 12 V	- Voltagem de saída: 12 V
-Aplicação Universal	- Amperagem: 1 A;
	- Conector: Plug P4 macho 2,1mm x 5,5mm
	- Polaridade de saída: positivo interno / negativo externo
	- Frequência: 50/60Hz
	- Potência Máxima: 30 W
	- Comprimento do cabo: 1,5m a 1,8m
	- Proteção Contra Curto Circuito e Sobre Carga

A.2. ANALOGIAS UTILIZADAS PARA O ENSINO DE CONCEITOS TERMODINÂMICOS

O ensino da Termodinâmica é repleto de conceitos que os alunos consideram de difícil assimilação como calor, temperatura, trabalho e energia, por exemplo. A relação entre estes também é um problema podendo levar os alunos a confundir calor com temperatura ou com energia. Neste contexto, o uso das analogias pode facilitar significativamente a compreensão destes conceitos a partir da visualização de seus análogos em sistemas mais simples e menos abstratos, como o sistema mecânico proposto na seção anterior.

O sistema conhecido e familiar aos alunos, no caso o experimento proposto, é chamado de *domínio base* ou *análogo*, e o assunto novo a ser abordado a partir deste experimento, nomeadamente o conceito de calor, entre outros, é chamado de *domínio alvo*.

A analogia dos parâmetros de controle do experimento mecânico foi feita em uma relação de um para um com os parâmetros do sistema termodinâmico proposto, descritos resumidamente por:

- O volume do líquido no cilindro representa a quantidade de energia térmica de um corpo;
- A transferência ou fluxo do fluido de uma coluna para outra será análoga ao processo de transferência ou fluxo de energia térmica entre os corpos que compõem o sistema termodinâmico.
- O registro entre as colunas, por ser o método ou forma pela qual o fluido (energia térmica) é transferido de um corpo para outro devido a uma diferença de altura (temperatura), será o análogo do calor.
- O nível do líquido em cada coluna representa suas respectivas temperaturas;
- A capacidade de armazenamento de cada cilindro será o análogo da capacidade térmica de um corpo, sendo maior nos cilindros de maior volume.
- A eletrobomba, responsável por retirar o líquido de todo o sistema bombeando-o para a coluna A, será o análogo de um agente externo realizando trabalho no sistema termodinâmico.

Nas próximas seções as analogias serão descritas detalhadamente para cada parâmetro e conceito termodinâmico do sistema abordado.

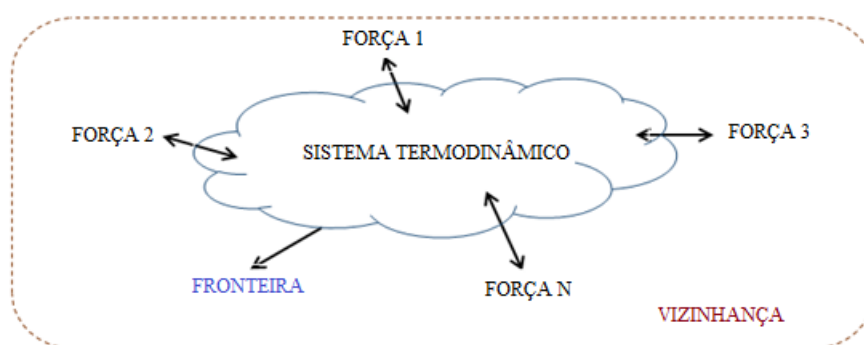
A.3. CONCEITOS DE FÍSICA QUE PODEM SER DISCUTIDOS COM O SISTEMA ANÁLOGO

A.3.1. Lei Zero da Termodinâmica e os Análogos da Temperatura e do Calor

A Termodinâmica estuda principalmente propriedades gerais e fenômenos causados pela ação combinada de um número muito grande de partículas que se movem continuamente. Este movimento desordenado das partículas é usualmente chamado de movimento térmico. Um sistema termodinâmico é macroscópico, finito e suas propriedades são analisadas usualmente quando o mesmo está em equilíbrio. O sistema ocupa uma região do espaço delimitada por uma fronteira, podendo ser afetado pela sua vizinhança através da ação de forças externas, como ilustrado na figura A.3, dependendo da natureza da fronteira.

A fronteira pode ser composta por paredes diatérmicas, que permitem a transmissão de energia térmica através do calor, ou paredes adiabáticas, as quais não permitem que essa troca de energia, especificamente, seja estabelecida entre o sistema e sua vizinhança. Apenas estes dois tipos de fronteira foram explorados no análogo proposto em nosso produto educacional.

Figura A.3 - Esquema de um sistema termodinâmico mostrando sua fronteira, sua vizinhança e possíveis forças externas que podem influenciar em suas propriedades.



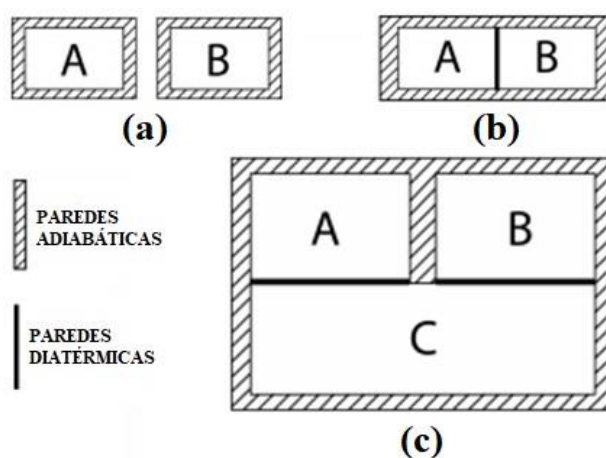
Fonte: Elaborado pelo autor.

Se considerarmos dois corpos A e B sem qualquer contato térmico entre si, compostos por paredes adiabáticas, conforme ilustrado na figura A.4 (a), o estado termodinâmico de cada corpo não afetará o estado do outro, ou seja, cada sistema permanece em seu estado de equilíbrio isoladamente e é caracterizado por uma temperatura T_A e T_B , as quais podem ser diferentes a princípio. Considerando uma nova situação, como a mostrada na figura A.4 (b),

em que o contato térmico entre os sistemas A e B é estabelecido através de uma parede diatérmica que permite a troca de energia térmica apenas entre A e B, teremos um novo estado de equilíbrio interno A + B caracterizado por um única temperatura T_{A+B} . Isso ocorre em decorrência da troca de energia térmica entre os dois corpos através do calor, assumindo que $T_A \neq T_B$, com a energia fluindo espontaneamente do corpo de maior temperatura para o de menor temperatura até que as mesmas se igualem $T_A = T_B = T_{A+B}$. Quando a temperatura em todas as partes do sistema atinge o mesmo valor, dizemos que o sistema está em equilíbrio térmico. No caso em que $T_A = T_B$ antes do contato térmico entre A e B ser estabelecido, não haverá um fluxo resultante de energia entre os dois sistemas e o novo estado de equilíbrio será o mesmo dos sistemas A e B anteriores. Neste caso não faz sentido falar em calor, pois este está associado ao processo de transmissão de energia de um sistema para outro devido a diferença de temperatura entre eles.

Considerando ainda uma terceira situação, como a ilustrada na figura A.4 (c), em que é estabelecido o contato térmico de A e B com um terceiro corpo C, caracterizado por uma temperatura $T_C \neq T_A$ e $T_C \neq T_B$, um novo estado de equilíbrio dado por A + B + C e caracterizado por uma única temperatura T_{A+B+C} é observado, pois tanto A quanto B trocam energia térmica entre si através do corpo C.

Figura A.4 – (a) Representação de dois sistemas termodinâmicos A e B com paredes adiabáticas, isolados do meio que se encontram e entre si. (b) Contato térmico estabelecido entre os sistemas A e B, mantendo os mesmos isolados do meio por paredes adiabáticas e (c) contato térmico estabelecido entre os sistemas A e C e entre B e C, mantendo A e B separados por paredes adiabáticas. Como o meio externo não exerce nenhuma influência nestes sistemas, os seus estados de equilíbrio são caracterizados pelas temperaturas T_A e T_B em (a), T_{A+B} em (b) e T_{A+B+C} em (c).



Fonte: Elaborado pelo autor.

É interessante notar que em todas as situações ilustradas anteriormente os novos estados de equilíbrio entre os sistemas A, B e C são determinados pelo parâmetro temperatura T , pois os sistemas permanecem isolados de sua vizinhança em todos os processos. Vemos com isso que a temperatura caracteriza o estado de equilíbrio interno de um sistema. Portanto, se o contato térmico entre vários sistemas é estabelecido, os valores de suas temperaturas serão iguados com o passar do tempo como resultado da troca de energia térmica entre eles através de calor e suas temperaturas permanecerão as mesmas enquanto o contato térmico for estabelecido ou mesmo após este ser interrompido, considerando que os sistemas individuais não estabelecerão contato térmico com nenhum outro sistema, permanecendo em equilíbrio térmico.

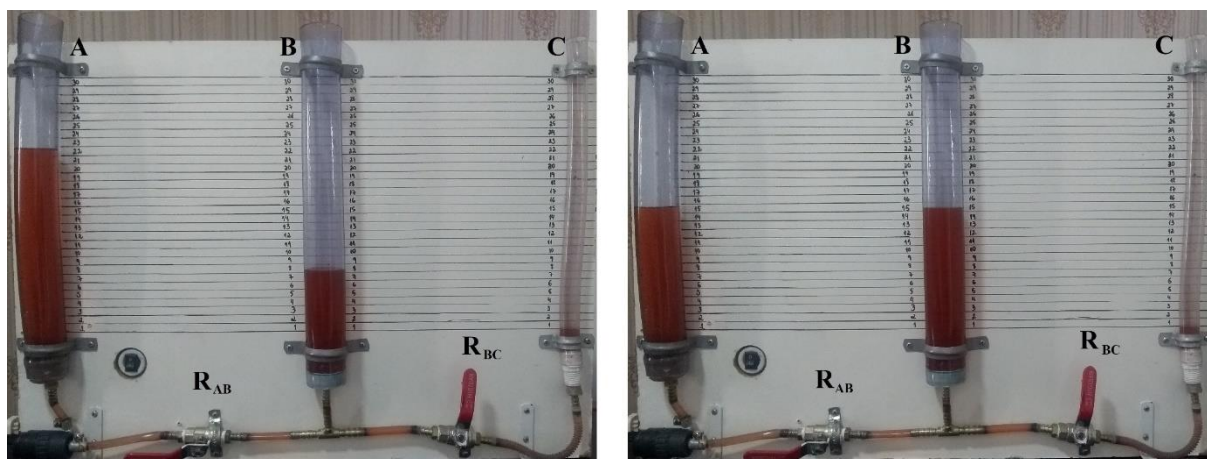
Este resultado é usualmente referido como a Lei Zero da Termodinâmica, a qual estabelece que: “*dois sistemas em equilíbrio térmico com um terceiro estão em equilíbrio térmico entre si*”.

Com o nosso produto educacional é possível demonstrar de maneira análoga todos os processos que levam ao estabelecimento da Lei Zero da Termodinâmica e os conceitos de temperatura e calor. Para isso consideramos as três colunas A, B e C do dispositivo como sendo os três corpos termodinâmicos ilustrados na figura A.4.

Para representar a energia térmica que fluirá espontaneamente entre os sistemas devido a uma diferença de altura (temperatura mecânica T_M) entre as colunas, nós utilizamos água com um corante vermelho para facilitar a visualização do processo, veja figura A.5.

Como no caso do análogo da temperatura, nós representaremos o análogo do parâmetro energia do nosso experimento como E_M , com o índice M fazendo referência ao análogo mecânico. Para demonstrar de maneira análoga os sistemas isolados termicamente A e B um dos outros, como se todos possuíssem paredes adiabáticas como na figura A.4 (a), é necessário deixar os dois registros R_{AB} e R_{BC} fechados. Dessa forma as colunas A e B permanecerão na mesma altura, caracterizando as temperaturas mecânicas T_{MA} e T_{MB} . Para estabelecer o contato térmico entre os sistemas mecânicos A e B, como na figura A.4 (b), simulando paredes diatérmicas, basta abrir o registro R_{AB} . Dessa forma, se a altura das colunas A e B, equivalente às temperaturas T_{MA} e T_{MB} , forem diferentes, a energia E_M irá fluir espontaneamente da coluna de maior altura para a de menor altura até que a altura do líquido se torne a mesma nas duas colunas, ou seja, até que $T_{MA} = T_{MB}$, como mostrado na figura A.5. Esta nova altura é o análogo da temperatura de equilíbrio do sistema A + B, ou seja, $T_{M(A+B)}$.

Figura A.5 – Análogo mecânico do processo realizado na figura A.4(a) mostrando à esquerda o análogo do contato térmico entre A e B pela abertura do registro R_{AB} mantendo o registro R_{BC} fechado, com E_M (líquido) fluindo espontaneamente da coluna A para a coluna B, pois a altura da coluna líquida de A (T_{MA}) é maior que a da coluna B (T_{MB}), ou seja, $T_{MA} > T_{MB}$. Esta é a condição análoga para a energia térmica fluir espontaneamente do sistema termodinâmico A para o B ($T_A > T_B$) através de calor. À direita mostramos o análogo mecânico do sistema termodinâmico em equilíbrio térmico, ou seja, $T_{MA} = T_{MB} = T_{M(A+B)}$, pois as colunas líquidas de A e B possuem a mesma altura definidas pela temperatura mecânica $T_{M(A+B)}$.



Fonte: Elaborado pelo autor.

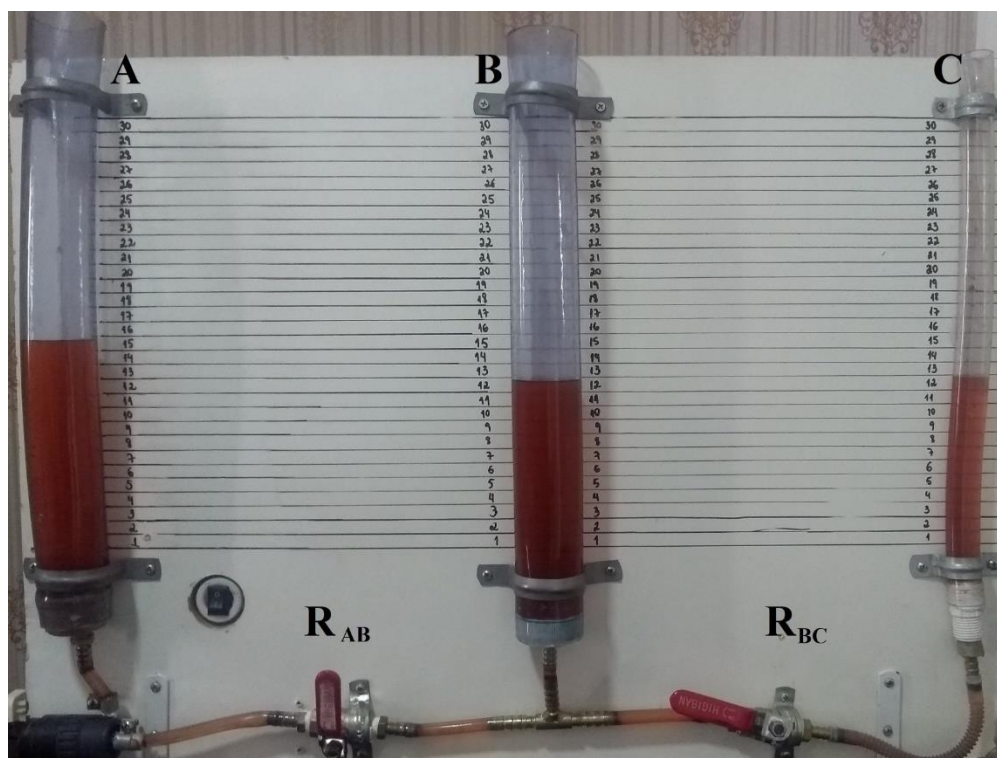
Caso o professor desejar isolar adiabaticamente o sistema mecânico B do sistema A e estabelecer o análogo do contato térmico entre B e C, basta fechar o registro R_{AB} e abrir o registro R_{BC} , como mostrado na figura A.6.

O processo estabelecido na figura A.4 (c) é realizado abrindo-se os dois registros R_{AB} e R_{BC} . Novamente, a energia E_M do sistema que tiver maior temperatura T_M irá fluir espontaneamente até que uma nova temperatura $T_{M(A+B+C)}$ (altura), igual para as três colunas, seja estabelecida com o tempo, como mostrado na figura A.6. Dessa forma o sistema atingirá o estado de equilíbrio análogo a $A + B + C$, caracterizado pela temperatura T_{A+B+C} na figura A.4 (c).

Mas como é possível observar o análogo do calor nestes processos? Como já discutido, o processo de transferência do líquido de uma coluna para outra devido a uma diferença de altura entre as colunas é o análogo do processo de transferência de energia de um corpo para outro devido a uma diferença de temperatura entre eles. Lembrando que o calor é o método pelo qual energia térmica é transferida de um corpo para outro, qual seria o método ou a forma pela qual o líquido é transferido de uma coluna para outra? Qual a parte do dispositivo que permite essa transferência? Analisando os experimentos acima observa-se que é o registro, ou seja, o registro é o análogo do calor. Mas o registro não seria o análogo do contato térmico? Sim, mas não é só isso, pois é possível estabelecer contato térmico entre dois

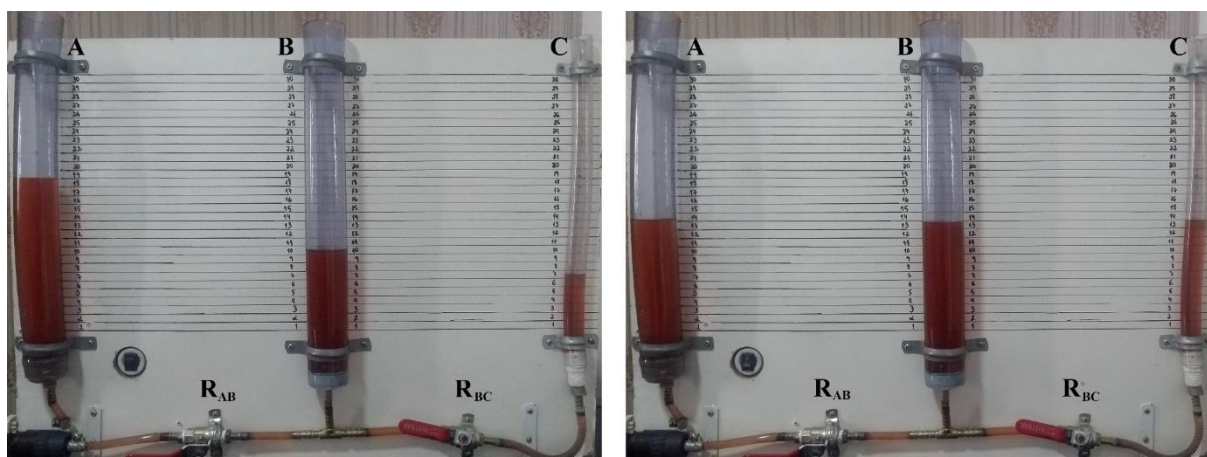
corpos sem que haja uma transferência resultante de energia térmica entre eles, ou seja, sem que tenhamos calor. Neste caso o fluxo de energia de um sistema para outro se mantém estacionário. Isso é possível se considerarmos o contato entre dois sistemas já em equilíbrio térmico um com relação ao outro.

Figura A.6 – Neste processo mostramos o análogo mecânico do estabelecimento do contato térmico entre os sistemas B e C a partir do estado de equilíbrio obtido para B na figura A.5. Para isso o registro R_{AB} foi fechado e o registro R_{BC} aberto. Note que as novas temperaturas T_{MB} e T_{MC} são menores que T_{MA} , pois parte da energia total E_{MB} , que inicialmente era igual a E_{MA} , fluiu para o sistema C.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura A.7 – Neste processo os registros R_{AB} e R_{BC} foram mantidos abertos para o estabelecimento do análogo do estado de equilíbrio entre os três sistemas A, B e C, apresentado na figura A.4 (c), caracterizado pela temperatura $T_{MA} = T_{MB} = T_{MC} = T_{M(A+B+C)}$.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Sendo o calor associado ao processo de transferência de energia térmica de um sistema para outro, quando o registro é aberto em nosso experimento, o líquido flui espontaneamente de uma coluna para outra até que a altura do líquido nas duas colunas seja a mesma. Este seria o análogo do equilíbrio térmico do sistema total, de maneira que se fecharmos ou abrirmos novamente o registro não será observada nenhuma diferença na altura do líquido nas duas colunas consideradas. Isso mostra que o registro não exerce qualquer influência no sistema quando o equilíbrio é atingido. De maneira análoga, quando dois sistemas termodinâmicos estão em equilíbrio térmico não faz mais sentido falar em calor, pois o processo de transferência de energia cessa, como se os dois sistemas se tornassem um só. Com o registro aberto, temos um vaso comunicante entre as duas colunas, fazendo com que o sistema se torne um só. Portanto, o registro representa de maneira clara o papel do calor no contato térmico entre dois corpos com diferentes temperaturas, desde a realização do processo de transferência de energia até o momento em que o sistema total atinge o equilíbrio térmico.

Para enunciar o análogo da Lei Zero da Termodinâmica o professor pode considerar o corpo C da figura A.4 (c) como sendo a coluna B do nosso experimento, de maneira que o contato da coluna A com a B e da coluna C com a B, faz com que a altura do líquido das colunas A e B também sejam iguais, como mostrado na figura A.7, ou seja, *“dois sistemas em equilíbrio térmico com um terceiro estão em equilíbrio térmico entre si”*.

A.3.2. 1ª e 2ª Leis da Termodinâmica e os Análogos da Quantidade de Calor e do Trabalho

Energia transferida através de calor ocorre devido a uma diferença de temperatura entre dois corpos. Esta energia transferida pode fazer com que a energia interna do sistema, também chamada de energia térmica, aumente ou permita que o sistema possa converter a mesma em outra modalidade de energia através de trabalho. Na verdade, as duas possibilidades podem ocorrer, pois processos de transformação de energia geralmente envolvem o aquecimento de várias partes do sistema e sua vizinhança. Como exemplo podemos citar um automóvel que converte energia térmica em cinética e no processo toda a carcaça do motor e até o ar em torno do capô do mesmo são aquecidos. Quando colocamos um carregador de celular na tomada e o conectamos ao aparelho, energia elétrica é convertida em energia química na bateria do celular e neste processo é possível perceber o aquecimento de todo o sistema. O mesmo aquecimento é observado em motores elétricos.

A explicação para estes processos é dada pela Termodinâmica, cujas leis foram estabelecidas por cientistas no século XIX. Estas leis são baseadas em experimentos envolvendo transformações de energia e nunca foi observado um único experimento em que mostrasse que as mesmas estão incorretas. Por esta razão, tais leis formam a base do trabalho científico.

A Primeira Lei da Termodinâmica é baseada no princípio de conservação de energia. Existem duas formas de modificar a energia interna (térmica) de qualquer sistema. Uma delas é extrair ou fornecer energia ao sistema através da aplicação de forças no mesmo, ou seja, através da realização de trabalho, e a outra forma é através de calor. Dessa forma, a 1ª Lei estabelece que a variação da energia interna (ΔU) de um sistema é dada pela diferença de energia térmica adquirida pelo sistema através de calor, usualmente chamada de quantidade de calor Q , e a energia que o próprio sistema converte através de trabalho W , ou seja,

$$\Delta U = Q - W, \quad (A.1)$$

a qual pode ser escrita na forma:

$$Q = \Delta U + W.$$

Esta última forma é mais interessante porque podemos ver claramente o princípio de conservação de energia. A quantidade de energia fornecida ao sistema através de calor ($Q > 0$) é igual a quantidade de energia convertida pelo sistema através de trabalho ($W > 0$) mais o aumento da energia térmica do mesmo ($\Delta U > 0$), ou seu aquecimento, decorrente do processo de conversão. Note que na equação (A.1) Q e W não são medidas de calor e trabalho, estes representam quantidades de energia adquirida (sinal positivo) ou perdida (sinal negativo) pelo sistema através do método de transferência de energia chamado calor e trabalho, respectivamente. É por isso que tanto Q quanto W possuem unidades de energia, o Joule (J).

Com o nosso experimento é possível explorar a 1ª Lei da Termodinâmica, dada pela equação (A.1), considerando o trabalho realizado no sistema ou pelo sistema como sendo nulo. Isso não é nenhum absurdo uma vez que não existe expansão ou compressão das paredes das colunas que constituem o nosso dispositivo. Sendo então $W = 0$, podemos escrever a equação (A.1) de maneira análoga como $\Delta U_M = Q_M$.

Considerando diferentes temperaturas mecânicas, T_{M1} e T_{M2} , como as temperaturas de equilíbrio inicial e final, respectivamente, de uma das colunas, podemos escrever a quantidade de energia fluindo para a coluna através de calor, Q_M , como:

$$Q_M = C_M(T_{M1} - T_{M2}), \quad (A.2)$$

que é o análogo mecânico da equação $Q = C(T_1 - T_2)$, sendo C a capacidade térmica do sistema.

A capacidade térmica do sistema também pode ser escrita como:

$$C = \frac{Q}{\Delta T}. \quad (A.3)$$

É importante deixar claro para os alunos que o calor não é uma propriedade física do sistema, diferentemente da temperatura, que pode ser medida no equilíbrio antes e depois da realização de qualquer processo, sendo por isso descrita como uma variação ΔT , enquanto que a quantidade de calor é dada apenas por Q . Um mesmo sistema pode exibir diferentes capacidades térmicas, dependendo do processo sofrido por ele. As capacidades térmicas à pressão constante C_P e à volume constante C_V são de grande utilidade prática. Com o nosso experimento não é possível fazer tais distinções para C , mas este parâmetro pode ser definido e amplamente discutido.

Considerando a 1ª Lei para $W = 0$, temos a partir da equação (A.2) que,

$$U_{2M} - U_{1M} = C_M(T_{M1} - T_{M2}),$$

$$C_M = \frac{U_{2M} - U_{1M}}{T_{M1} - T_{M2}}. \quad (A.4)$$

A capacidade térmica é a quantidade de energia necessária, transferida ao sistema através de calor, para elevar a temperatura do mesmo de 1°C. Para observar o análogo C_M desta propriedade em nosso experimento, basta tomar as colunas B e C do mesmo, considerando que estas são feitas de um mesmo material com dimensões diferentes. Desta forma é possível verificar qual possui a maior capacidade térmica. Como $U_M = E_M$ está associado com o volume de líquido armazenado no interior da coluna, a coluna que possuir maior volume de líquido armazenado, ou seja, aquela com maior diâmetro, representará o sistema com maior capacidade térmica, considerando é claro a mesma variação de temperatura $T_{M1} - T_{M2}$ para as duas colunas. Logo, tem-se $(U_{2M} - U_{1M})_B > (U_{2M} - U_{1M})_C$ de modo que $C_{MB} > C_{MC}$. Esta analogia permite associar diretamente a capacidade térmica de um sistema com a sua capacidade de armazenar energia térmica para uma mesma diferença de temperatura. E isso pode ficar ainda mais claro se o professor utilizar o conceito de calor específico c do sistema através da relação,

$$C = mc, \quad (A.5)$$

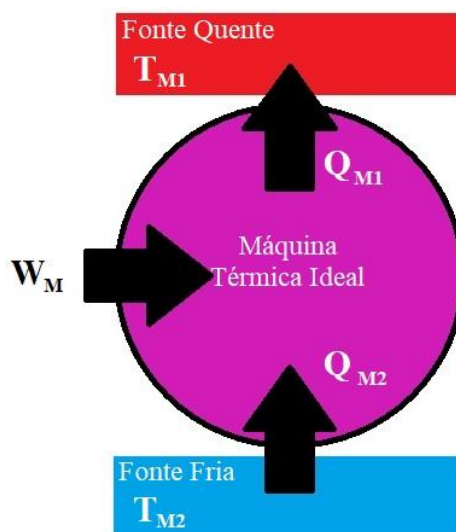
sendo m a massa do sistema. Como c é uma constante e possui o mesmo valor para as colunas B e C, pois estamos considerando que estas representam dois corpos de mesmo material, quanto maior a massa do sistema, relacionada com o volume de líquido armazenado, maior a sua capacidade térmica. Como $m_B > m_C$ novamente chegamos no resultado $C_{MB} > C_{MC}$.

O análogo mecânico do trabalho W_M pode ser obtido a partir da discussão da 2ª Lei da Termodinâmica. Esta estabelece que é impossível conceber um processo cujo o único efeito seja transferir energia térmica através de calor de um sistema mais frio, temperatura menor, para um sistema mais quente, temperatura maior. Este é o enunciado de Clausius da 2ª Lei.

Como discutido anteriormente, nosso experimento permite demonstrar de maneira análoga que a energia térmica sempre flui espontaneamente do corpo de maior temperatura para o corpo de menor temperatura. Para realizar a transferência do líquido de uma coluna de altura menor para uma de altura maior nós utilizamos a eletrobomba. Esta será responsável pela realização de trabalho no sistema. Para ficar mais claro este processo, o professor pode utilizar o esquema de uma máquina térmica invertida, como a ilustrada na figura A.8. Uma máquina invertida é definida como uma máquina térmica que opera de maneira reversa. Nesta, trabalho W_M precisa ser realizado no sistema para retirar uma quantidade de energia térmica através de calor Q_{M2} da fonte fria e transferir uma quantidade de energia Q_{M1} para a fonte quente, de tal forma que:

$$Q_{M1} = W_M + Q_{M2}. \quad (A.6)$$

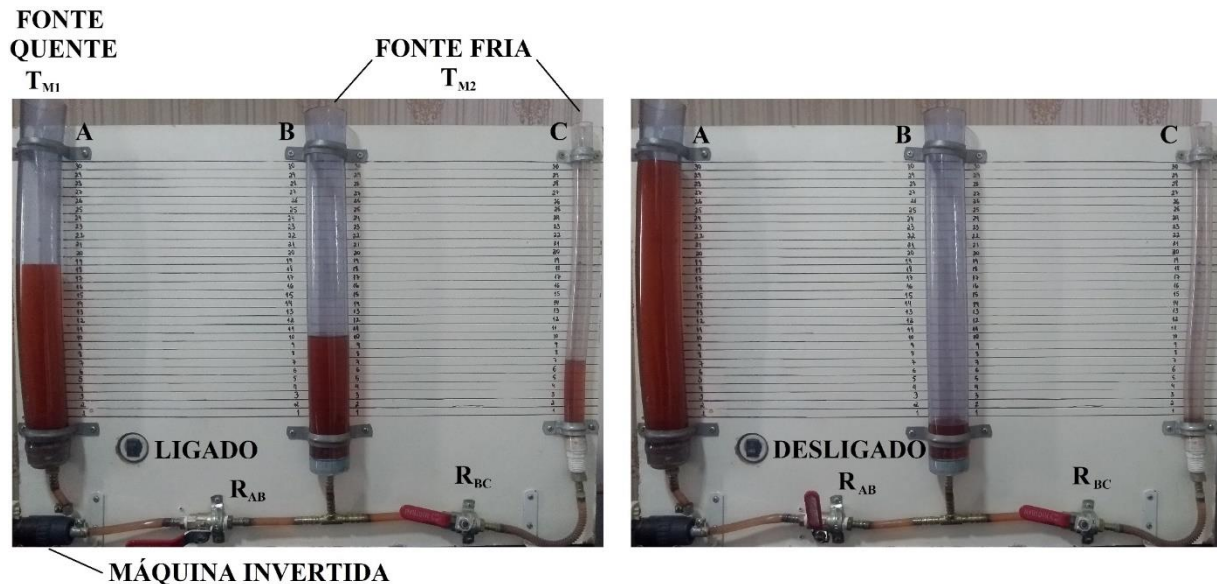
Figura A.8– Máquina térmica invertida, em que trabalho deve ser realizado no sistema para extrair energia da fonte fria para ser transferida para a fonte quente. Este é o princípio de funcionamento de um refrigerador, como uma geladeira ou ar condicionado. Os parâmetros indicados são os análogos das temperaturas das fontes quente e fria, T_1 e T_2 , respectivamente, as energias Q_1 e Q_2 , retirada da fonte fria e transferida para a fonte quente através de calor, respectivamente, e a energia W transferida ao sistema através de trabalho, ou mais usualmente, o trabalho realizado no sistema.



Fonte: Elaborado pelo autor.

A máquina invertida no nosso caso é a eletrobomba que retira uma quantidade de energia Q_{M2} da fonte fria através de trabalho elétrico, a qual pode ser representada pela coluna B ou C, ou ambas, e transfere uma quantidade de energia Q_{M1} para a fonte quente, dada pela coluna A. A figura A.9 mostra este processo com a eletrobomba acionada retirando o líquido das colunas B e C e transferindo-o para a coluna A.

Figura A.9– Análogo de uma máquina térmica invertida. Nesta analogia a coluna A é análoga à fonte quente de temperatura T_{M1} da figura A.8, as colunas B e C a fonte fria de temperatura T_{M2} , sendo $T_{M1} > T_{M2}$, e a eletrobomba o corpo de trabalho. À esquerda mostramos a eletrobomba sendo acionada e o líquido (energia Q_{M2}) sendo retirado das colunas B e C e sendo transferido para a coluna A (energia Q_{M1}) através da realização de trabalho W_M . Após todo o líquido ser bombeado a eletrobomba é desligada e o registro R_{AB} é fechado, como mostrado à direita.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Apesar da quantidade de líquido retirada das colunas B e C ser a mesma da quantidade de líquido transferida para a coluna A, pode-se perceber que temos realmente $Q_{M1} > Q_{M2}$ no nosso experimento, pois para que a altura da coluna líquida de A aumente em relação a B e C, energia tem que ser fornecida à mesma através de trabalho pela ação da eletrobomba, pois de outra forma o líquido não subiria na coluna. Outra característica interessante da máquina invertida e que pode ser explorada de maneira bastante satisfatória em nosso experimento é que esta é o tipo mais eficiente de máquina idealizada por Carnot, pois uma máquina invertida não desperdiça energia. Como já discutido neste mesmo parágrafo todo o líquido de B e C é bombeado para a coluna A, ou seja, toda a energia retirada da fonte fria é transferida para a fonte quente. Apesar da eficiência máxima, o professor pode mostrar que uma vez que W_M é sempre menor do que Q_{M1} , veja equação (A.6), nenhuma máquina pode ter uma eficiência

(W_M / Q_{MI}) de 100% ou maior. Note que a dissipação de energia em um sistema termodinâmico real também não possui um análogo neste experimento

Além das discussões apresentadas aqui o professor pode explorar uma discussão com os alunos sobre se a máquina invertida viola ou não a 2ª Lei da Termodinâmica, uma vez que energia está sendo transferida do corpo mais frio para o mais quente, como funciona um refrigerador, quais são as fontes frias e quentes do mesmo, como se dá o processo de realização de trabalho em um refrigerador, entre muitos outros.

A.4. SUGESTÃO DE QUESTIONÁRIOS PARA SEREM APLICADOS JUNTO COM O PRODUTO EDUCACIONAL

Nesta seção apresentamos dois questionários, um no formato de pesquisa de opinião e outro dissertativo, como sugestão para o professor aplicar junto com o produto educacional apresentado.

Nós sugerimos a utilização do primeiro questionário caso o professor deseje mapear o conhecimento prévio dos alunos sobre os conceitos de Termodinâmica propostos antes da apresentação do experimento sobre o análogo mecânico. Esse mapeamento pode ser útil para dar um melhor direcionamento na(s) aula(s) em que o experimento será utilizado para discutir as analogias e os conceitos termodinâmicos. O questionário abaixo consiste de uma pesquisa de opinião com 15 afirmativas para os alunos refletirem sobre os conceitos e fenômenos propostos. Em cada afirmativa os alunos serão convidados a emitir o seu grau de concordância sobre o assunto em uma escala Likert com as seguintes opções: *1 Discordo, 2 Parcialmente, 3 Concordo e 4 Sem Base para Opinar.*

QUESTIONÁRIO INICIAL

1. A temperatura de um corpo está relacionada diretamente à quantidade de energia térmica do corpo.
2. O calor está associado a transferência de energia térmica.
3. O calor é a quantidade de energia de um corpo.
4. O calor é a temperatura de um corpo.

5. A capacidade térmica indica o quanto de energia térmica que um corpo pode armazenar.
6. O calor específico indica a quantidade de energia transferida através calor que um corpo precisa para que um grama dessa substância mude sua temperatura em um grau.
8. Sentir frio indica que o corpo está cedendo ou perdendo energia térmica.
9. O processo de transferência de energia térmica é denominado calor.
10. Sentir frio indica que o corpo está recebendo energia térmica.
11. Um corpo de menor temperatura transfere energia espontaneamente para um corpo de maior temperatura.
12. Quando estou com cobertor me sinto aquecido, pois o cobertor é quentinho.
13. Nos dias quentes uso roupas leves, pois permite que meu corpo troque energia com o meio ambiente.
14. Foi deixado sobre a mesa um copo e uma panela com 200g e 1000g de água quente, respectivamente, ambos com a mesma temperatura. Após alguns minutos foi observado que a água do copo estava mais fria (menor temperatura) que a da panela (maior temperatura). Essa situação é explicada pelo conceito de capacidade térmica.
15. O calor é a forma pela qual a energia térmica é transferida para outro corpo devido à diferença de temperatura entre eles.

Para finalizar a aplicação do produto educacional nós sugerimos que o professor entregue um questionário dissertativo aos alunos, para permitir que os mesmos se expressem, escrevendo com suas palavras o que entenderam sobre os fenômenos e conceitos trabalhados. No questionário sugestivo a seguir as perguntas foram voltadas para os conceitos de calor, temperatura, capacidade térmica e calor específico, relacionando tais conceitos, sempre que possível, com situações reais do dia a dia dos alunos. Caso o professor ache necessário, as perguntas podem ser modificadas ou mesmo novas perguntas podem ser elaboradas para melhor satisfazer as suas necessidades.

QUESTIONÁRIO FINAL

- 1) Quais são os parâmetros, propriedades e os fenômenos relacionados com o aquecimento e com o resfriamento de um corpo? Faça uma descrição sobre qualquer um destes relacionando os mesmos com o que você observa em dias frios.
- 2) O cobertor é uma fonte de calor?
- 3) O que é o calor?

- 4) O que acontece com uma panela quando a mesma é colocada sobre a chama de um fogão?
- 5) É possível fornecer energia térmica a um objeto sem que haja variação de sua temperatura? Justifique sua resposta.
- 6) O que é temperatura?
- 7) Por que é mais fácil aquecer um pedaço de ferro do que a mesma quantidade de massa de água?
- 8) Descreva o que você entende por calor específico e capacidade térmica.
- 9) Ao entrar em uma sala climatizada à temperatura de 20°C , você caminha descalço sobre um piso de mármore e em seguida sobre um tapete. Qual dos dois se encontra a uma temperatura mais baixa?
- 10) Qual a explicação física sobre o que acontece com uma pessoa que está sentindo frio?

Anexo A

PESQUISA DE OPINIÃO PARA MAPEAR OS CONHECIMENTOS PRÉVIOS DOS ALUNOS

Em todas as afirmativas descritas abaixo os alunos foram convidados a emitir o seu grau de concordância sobre o assunto em uma escala Likert com as seguintes opções:

- 1 Discordo*
- 2 Parcialmente*
- 3 Concordo*
- 4 Sem base para opinar*

Esta pesquisa foi feita antes da apresentação do experimento sobre o análogo mecânico para os alunos.

1. A temperatura de um corpo está relacionada diretamente à quantidade de energia térmica do corpo.
2. O calor está associado a transferência de energia térmica.
3. O calor é a quantidade de energia de um corpo.
4. O calor é a temperatura de um corpo.
5. A capacidade térmica indica o quanto de energia térmica que um corpo pode armazenar.
6. O calor específico indica a quantidade de energia transferida através calor que um corpo precisa para que um grama dessa substância mude sua temperatura em um grau.
8. Sentir frio indica que o corpo está cedendo ou perdendo energia térmica.
9. O processo de transferência de energia térmica é denominado calor.
10. Sentir frio indica que o corpo está recebendo energia térmica.

11. Um corpo de menor temperatura transfere energia espontaneamente para um corpo de maior temperatura.
12. Quando estou com cobertor me sinto aquecido, pois o cobertor équentinho.
13. Nos dias quentes uso roupas leves, pois permite que meu corpo troque energia com o meio ambiente.
14. Foi deixado sobre a mesa um copo e uma panela com 200g e 1000g de água quente, respectivamente, ambos com a mesma temperatura. Após alguns minutos foi observado que a água do copo estava mais fria (menor temperatura) que a da panela (maior temperatura). Essa situação é explicada pelo conceito de capacidade térmica.
15. O calor é a forma pela qual a energia térmica é transferida para outro corpo devido à diferença de temperatura entre eles.

Anexo B

QUESTIONÁRIO FINAL

- 1) Quais são os parâmetros, propriedades e os fenômenos relacionados com o aquecimento e com o resfriamento de um corpo? Faça uma descrição sobre qualquer um destes relacionando os mesmos com o que você observa em dias frios.
- 2) O cobertor é uma fonte de calor?
- 3) O que é o calor?
- 4) O que acontece com uma panela quando é colocada sobre a chama de um fogão?
- 5) É possível fornecer energia térmica a um objeto sem que haja variação de sua temperatura?
- 6) O que é temperatura?
- 7) Por que é mais fácil aquecer um pedaço de ferro do que a mesma quantidade de massa de água?
- 8) Descreva o que você entende por calor específico e capacidade térmica.
- 9) Ao entrar em uma sala climatizada à temperatura de 20°C , você caminha descalço sobre um piso de mármore e em seguida sobre um tapete. Qual dos dois se encontra a uma temperatura mais baixa?
- 10) Qual a explicação física sobre o que acontece com uma pessoa que está sentindo frio?