

PRODUTO EDUCACIONAL

MNPEF
Mestrado Nacional
Profissional em
Ensino de Física

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

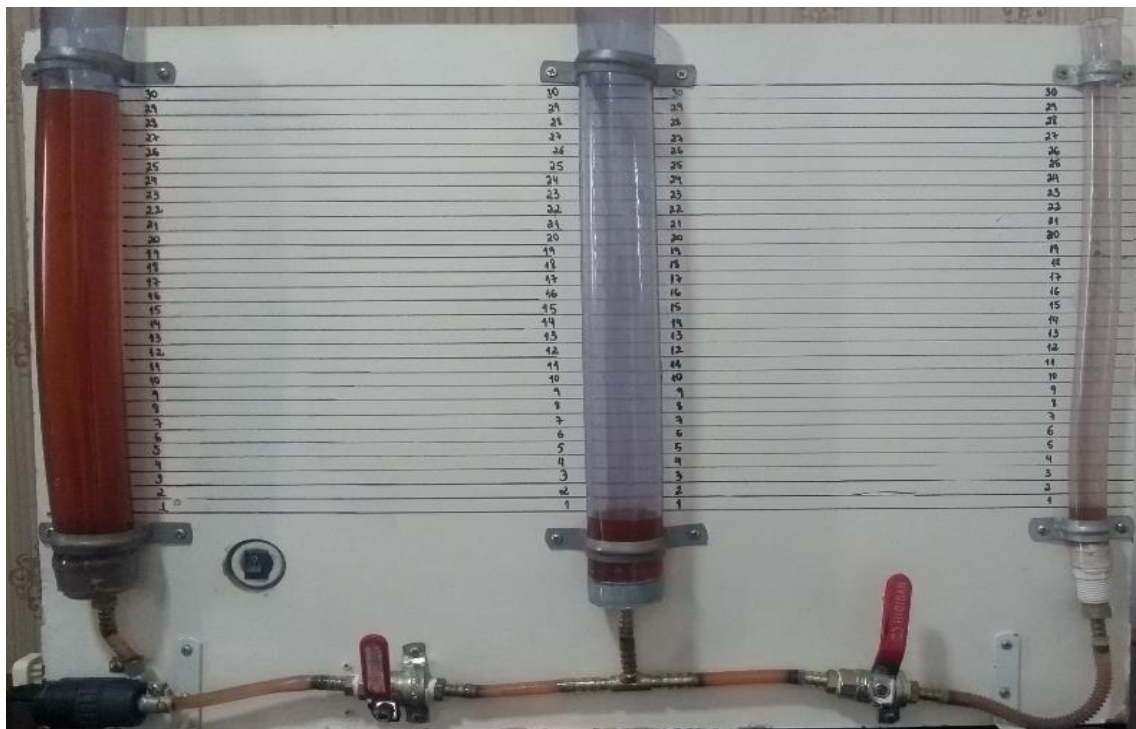
SBF
SOCIEDADE BRASILEIRA DE FÍSICA

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS

CENTRO DE CIÊNCIAS E TECNOLOGIAS PARA A SUSTENTABILIDADE

DEPARTAMENTO DE FÍSICA, QUÍMICA E MATEMÁTICA

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

A todos os alunos do ensino básico brasileiro.

SUMÁRIO

1. MONTAGEM DO EXPERIMENTO.....	6
2. ANALOGIAS UTILIZADAS PARA O ENSINO DE CONCEITOS TERMODINÂMICOS	9
3. CONCEITOS DE FÍSICA QUE PODEM SER DISCUTIDOS COM O SISTEMA ANÁLOGO	10
3.1. Lei Zero da Termodinâmica e os Análogos da Temperatura e do Calor	10
3.2. 1ª e 2ª Leis da Termodinâmica e os Análogos da Quantidade de Calor e do Trabalho.....	15
4. SUGESTÃO DE QUESTIONÁRIOS PARA SEREM APLICADOS JUNTO COM O PRODUTO EDUCACIONAL	20

1. MONTAGEM DO EXPERIMENTO

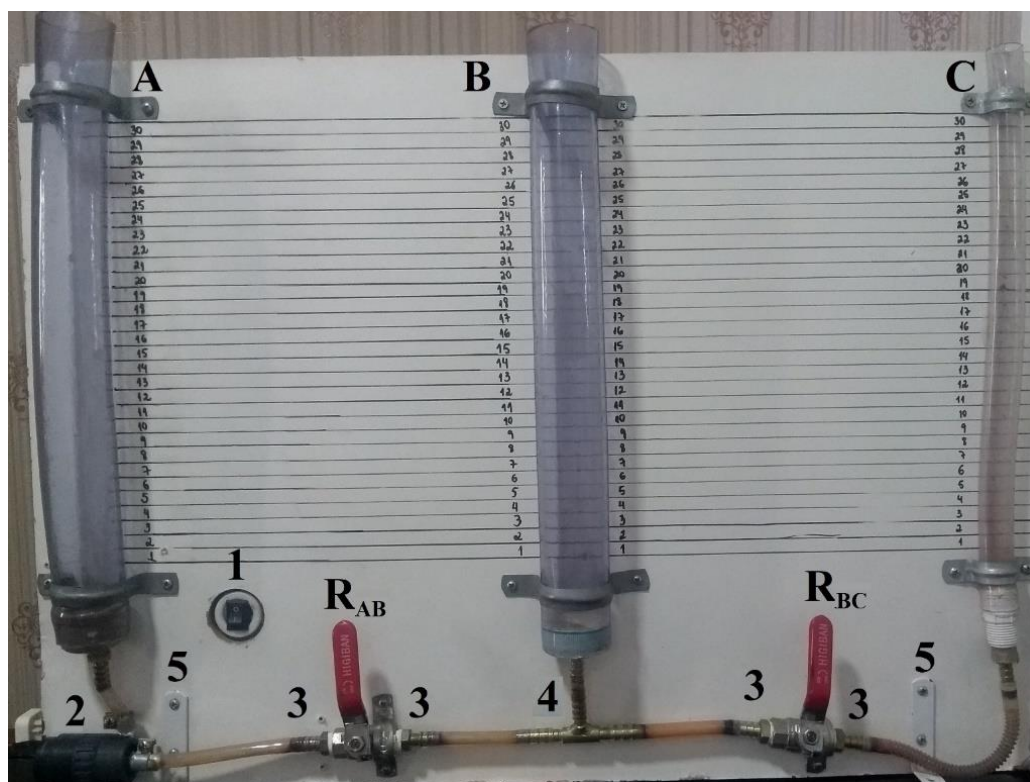
Nosso principal objetivo com este produto educacional é auxiliar o professor de física na definição de conceitos como calor, temperatura, capacidade térmica, energia e a relação destes com a Lei Zero, a Primeira e Segunda Leis da Termodinâmica através de um análogo mecânico de simples montagem e manipulação.

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 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 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.

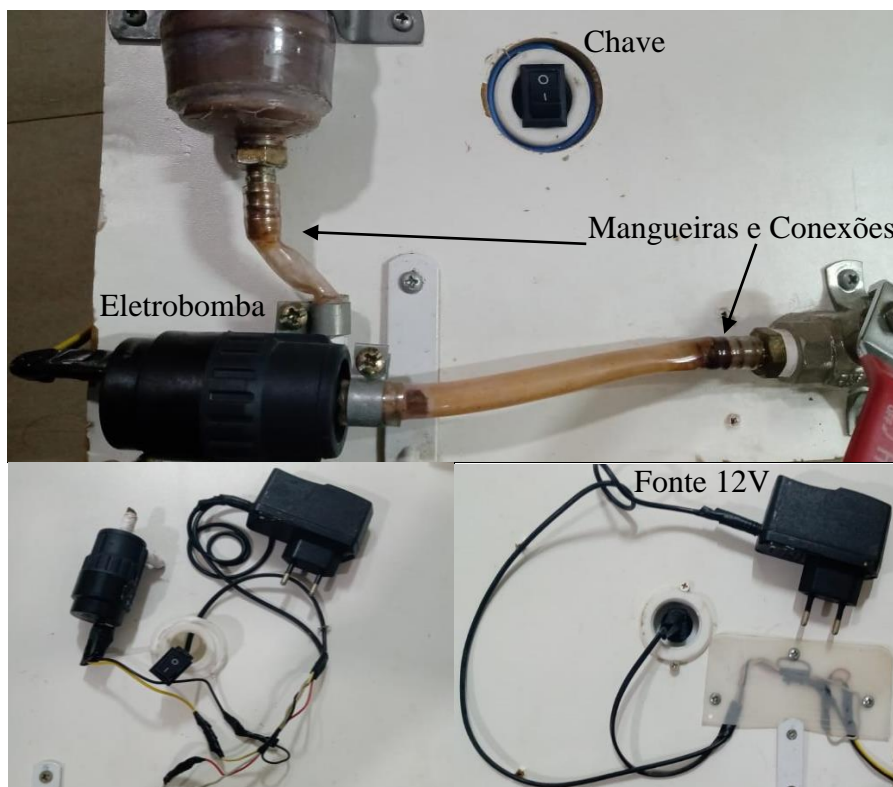
Para acionar o experimento é necessário inserir um fluido, como água, de preferência com um corante para melhor visualização, no interior de uma das colunas ou em todas as colunas no nível desejado pelo professor. Com os registros abertos o fluido tende sempre a permanecer no mesmo nível em todas as 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 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 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 1.

Tabela 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

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.

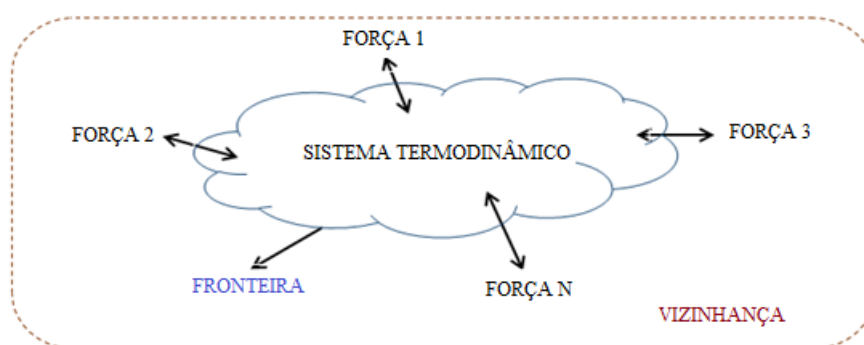
3. CONCEITOS DE FÍSICA QUE PODEM SER DISCUTIDOS COM O SISTEMA ANÁLOGO

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



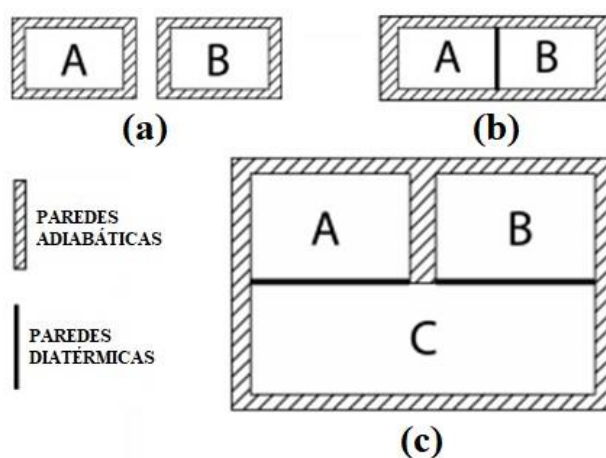
Fonte: Elaborado pelo autor.

Se considerarmos dois corpos A e B sem qualquer contato térmico entre si, compostos por paredes adiabáticas, conforme ilustrado na figura 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 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 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 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.

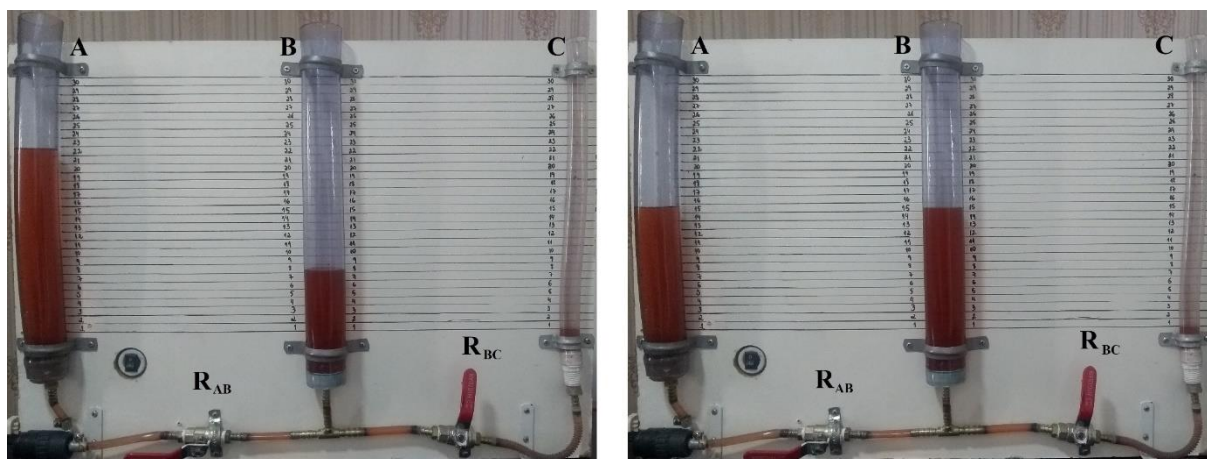
Este resultado é usualmente referido como a Lei Zero da Termodinâmica, a qual estabelece que: *“dois sistemas em equilíbrio térmico com um terceiro estão em equilíbrio térmico entre si”*.

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 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 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 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 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 5. Esta nova altura é o análogo da temperatura de equilíbrio do sistema A + B, ou seja, $T_{M(A+B)}$.

Figura 5 – Análogo mecânico do processo realizado na figura 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.

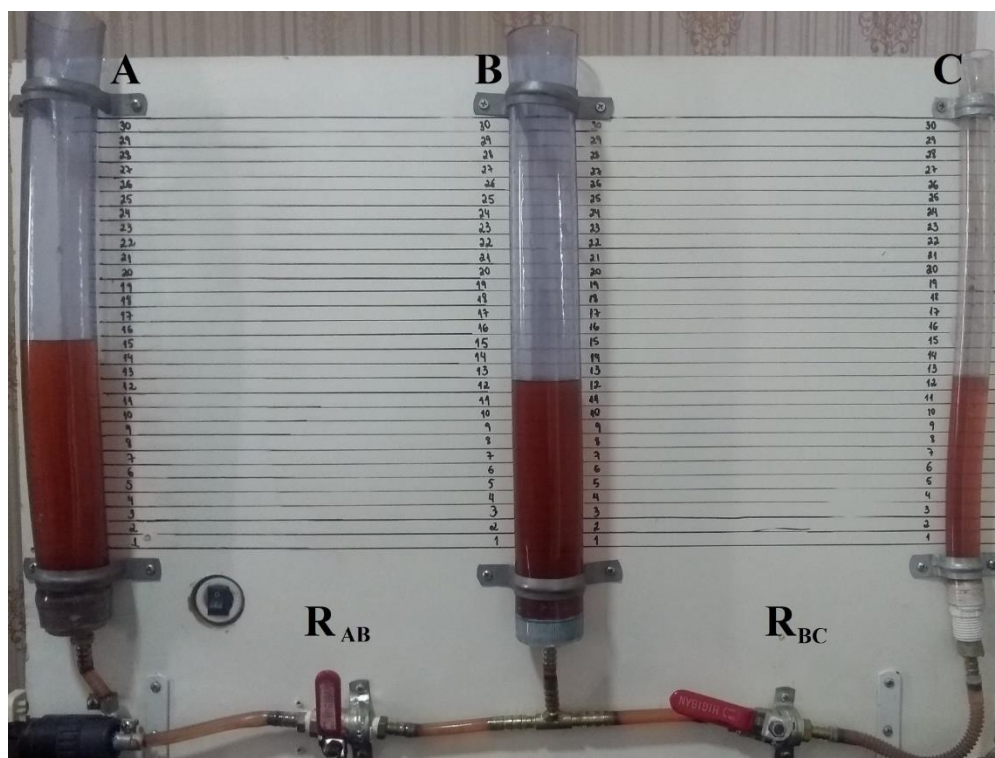
Caso o professor desejar isolar adiabaticamente o sistema mecânico B do sistema A e estabelecer o análogo do contato térmico entre B e C, basta fechar o registro R_{AB} e abrir o registro R_{BC} , como mostrado na figura 6.

O processo estabelecido na figura 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 6. Dessa forma o sistema atingirá o estado de equilíbrio análogo a $A + B + C$, caracterizado pela temperatura T_{A+B+C} na figura 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

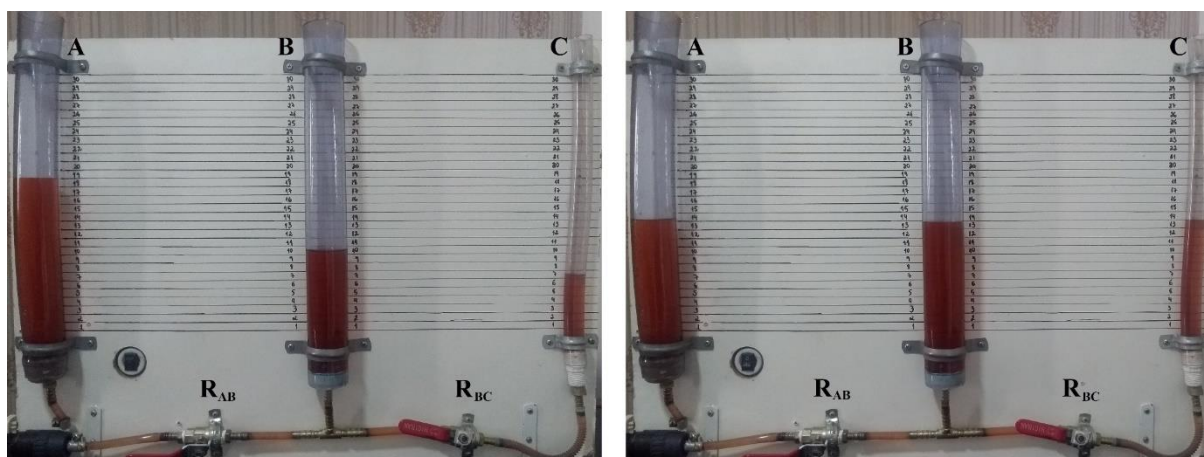
corpos sem que haja uma transferência resultante de energia térmica entre eles, ou seja, sem que tenhamos calor. Neste caso o fluxo de energia de um sistema para outro se mantém estacionário. Isso é possível se considerarmos o contato entre dois sistemas já em equilíbrio térmico um com relação ao outro.

Figura 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 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 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 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 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 7, 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 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,

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

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.

A capacidade térmica do sistema também pode ser escrita como:

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

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 (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,

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

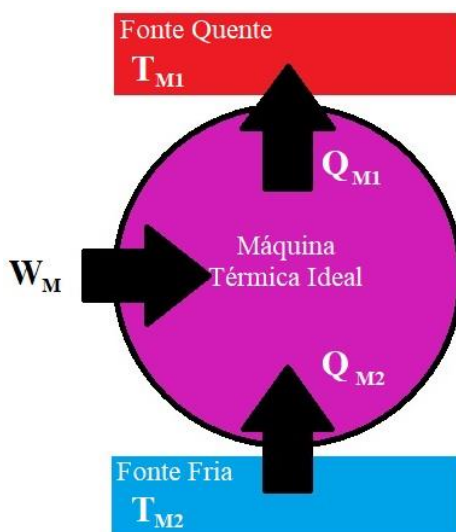
sendo m a massa do sistema. Como c é uma constante e possui o mesmo valor para as colunas B e C, pois estamos considerando que estas representam dois corpos de mesmo material, quanto maior a massa do sistema, relacionada com o volume de líquido armazenado, maior a sua capacidade térmica. Como $m_B > m_C$ 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 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:

$$Q_{M1} = W_M + Q_{M2}. \tag{6}$$

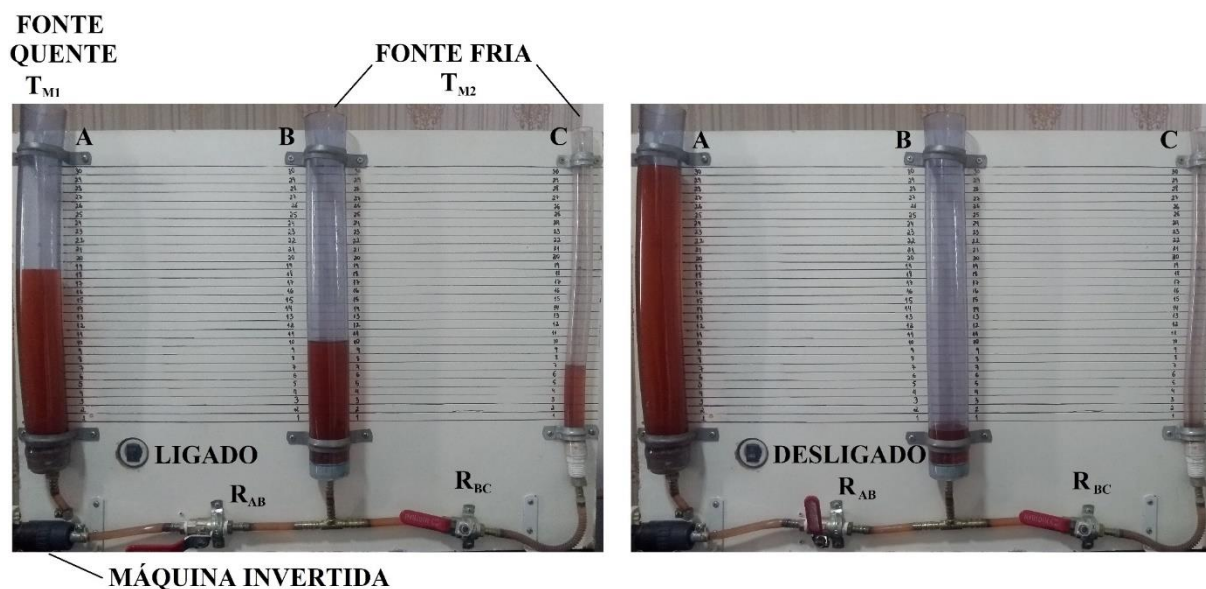
Figura 8– Máquina térmica invertida, em que trabalho deve ser realizado no sistema para extrair energia da fonte fria para ser transferida para a fonte quente. Este é o princípio de funcionamento de um refrigerador, como uma geladeira ou ar condicionado. Os parâmetros indicados são os análogos das temperaturas 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 9 mostra este processo com a eletrobomba acionada retirando o líquido das colunas B e C e transferindo-o para a coluna A. A figura 9 mostra este processo com a eletrobomba acionada retirando o líquido das colunas B e C e transferindo-o para a coluna A.

Figura 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 (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.

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?