

Aquecimento e resfriamento da água, aproximados à forma real⁺*

Reynaldo Lopes de Oliveira Jr.¹

Milton Alves Jr.

Victhória Haira Barbosa

Escola SESC de Ensino Médio

Rio de Janeiro – RJ

Resumo

O objetivo deste trabalho é mostrar que quando não fazemos muitas simplificações em uma demonstração experimental de calorimetria, podemos levantar em sala de aula questões interessantes. Se aquecermos, com um ebulidor de imersão, uma porção não muito grande de água, observaremos que a temperatura da água continuará aumentando mesmo depois do desligamento da fonte térmica. Se desligamos o ebulidor, que é a fonte de energia térmica deste sistema, como pode a temperatura da água continuar subindo? Esta foi a questão geradora deste trabalho. A partir desta questão e dos dados experimentais coletados no laboratório, elaboramos um modelo matemático que explicasse os dados obtidos. Esta investigação ocorreu em um grupo de seis alunos do ensino médio mediados por um professor de física.

Palavras-chave: *Calorimetria; Arduino; Laboratório de Física.*

Abstract

The objective of this work is to show that when we avoid many simplifications in an experimental demonstration of calorimetry, we can raise interesting discussions in the classroom. If we heat with an immersion heater a reduced portion of water, we will observe that the water temperature will continue to increase even after the heat source is disconnected. If you

⁺ Heating and cooling of water approached to the real form

^{*} *Recebido: julho de 2015.
Aceito: dezembro de 2015.*

¹ E-mail: rlojunior@gmail.com

turn off the heater, which is the source of thermal energy of this system, how can the water temperature continues to rise? This was the main question of this work. From this issue and experimental data collected in the laboratory, we developed a mathematical model to explain the obtained data. This research took place in a group of six high school students mediated by a Physics teacher.

Keywords: *Calorimetry; Arduino; Physics Laboratory.*

I. Introdução

No estudo da calorimetria do ensino médio, em geral, fazemos várias aproximações a respeito da calorimetria no mundo real. Com o objetivo de tornar as análises menos complexas e, portanto, mais inteligíveis para os alunos, são adotadas hipóteses simplificadoras que levam a um certo grau de descaracterização do problema real. Dentre as hipóteses simplificadoras mais comumente adotadas, podemos citar a capacidade térmica, seja do recipiente que contém o fluido estudado, seja da fonte térmica que aquece o conjunto, considerada desprezível. Dificilmente são levadas em conta as trocas de calor com as vizinhanças do sistema, o que é estabelecido pela idealização de um recipiente, de um calorímetro, perfeitamente adiabático. Outra simplificação feita é supor que toda a energia fornecida pela fonte térmica é entregue ao sistema e absorvida pelo fluido de trabalho, desconsiderando as perdas de energia envolvidas no processo.

A adoção de simplificações não é nenhum “crime científico”. Pelo contrário, elas são fundamentais na modelagem de problemas físicos reais. Elas proporcionam o entendimento mais básico de fenômenos muitas vezes complexos. Por outro lado, nós professores, exageramos na dose. Fazemos tantas simplificações que deixam os problemas muito distantes da realidade, meramente teóricos e quase fictícios, o que dificulta a associação, por parte do aluno, entre o que é visto em sala e o que reproduzido em laboratório diante de nossos olhos. É nesta perspectiva que propomos o presente trabalho, que objetiva trazer para a sala de aula uma discussão a respeito do comportamento térmico real do aquecimento/resfriamento de uma porção de água dentro de um béquer. Para tal, propomos um modelo explicativo, baseado na calorimetria vista no ensino médio, modelo este que se propõe a esclarecer o fenômeno observado, ainda que de forma qualitativa. Por fim, confrontamos nosso modelo com alguns dados experimentais.

I.1 Contextualização

O ponto de partida, o evento motivador para a realização do presente trabalho, foi um projeto de iniciação científica para o ensino médio. O grupo de pesquisa era composto por um professor e outros seis alunos do segmento indicado, cujo trabalho era voltado para a construção

de um termostato programável na plataforma Arduino (ver Fig. 6). Podemos encontrar um trabalho semelhante sobre aquisição automática de temperatura em (SIAS, 2006). E o objetivo era que o termostato controlasse a temperatura de uma porção de água dentro de um bécquer. Caso o controle fosse bem sucedido, tal mecanismo seria aplicado em um reator utilizado para a produção de biodiesel, que já vem sendo realizada na própria escola. O algoritmo para programação do dispositivo seguia uma ideia simples: quando a temperatura da água atingir 40°C, por exemplo, o ebulidor desliga. E quando a temperatura da água estiver abaixo de 40°C o ebulidor é ligado novamente. Assim, na visão inicial do grupo, manteríamos constante a temperatura da água. No estudo de processos de controle e automação esta forma de controle proposta por nosso grupo é conhecida como controle on-off (MATIAS, 2002). Que é uma técnica simples para controle contínuo de processos. Outra técnica conhecida e mais utilizada pela automação industrial é a chamada teoria de controle PID. A ideia básica de um controlador PID é ler um sensor de temperatura, por exemplo, compará-la com o valor desejado de temperatura (definido pelo usuário do sistema) calcular a resposta de saída através do cálculo proporcional, integral e derivativo e então somar as três componentes para o cálculo da saída. Assim o atuador (o ebulidor no nosso caso) ligará em uma potência definida por este cálculo a fim de se aproximar do valor desejado de temperatura. Este processo se repetirá até que a temperatura de saída seja próxima do valor inicialmente determinado.

Nas primeiras medidas, com o aparato em funcionamento conforme descrito na figura 6, verificamos que a temperatura da água subia muito além dos 40°C desejados. Inicialmente estávamos trabalhando com uma amostra de 200 ml de água. A partir dos primeiros testes, o grupo voltou sua atenção para tentar entender como se dava o processo de aquecimento/resfriamento da água. Como não havíamos encontrado nenhuma referência relevante ou esclarecedora na literatura voltada para o ensino médio, decidimos investir nesta investigação com o objetivo de desencadear no aluno o processo de busca, não somente visando a assimilação ou aquisição de um determinado conteúdo, mas sim, incentivando-o a reconstruí-lo (NUNES, 2006).

I.2 A pesquisa como princípio educativo

A fim de referenciar a atividade de investigação conduzida pelo professor de física, trazemos neste artigo a pesquisa como princípio educativo proposta por Pedro Demo em (DEMO, 2011). Nesta proposta, Demo defende a ideia de que para que cheguemos a uma aprendizagem mais significativa, o aluno deve protagonizar seu próprio conhecimento e buscar respostas para questões formuladas por ele mesmo. Para Demo a pesquisa/investigação deveria ser o cerne da sala de aula. Neste tipo de abordagem o interessante seria separar uma pequena parte da aula como expediente informativo, para introduzir temas a unidades, deixando a maior parte do tempo para que o aluno investigue e invista na sua própria pesquisa. Demo critica quando a aula torna-se o único instrumento didático conhecido pelo professor, onde em aulas informativas a reprodução de informações coíbe a criação e descarta o questionamento. Quando o aluno

propõe, questiona e critica por intermédio da pesquisa, este formula suas próprias perguntas, persegue caminhos em busca de novas respostas. Segundo Demo esta é a diferença entre aprender e ser informado. É através da pesquisa que o aluno adquire uma das mais caras competências do século XXI: o aprender a aprender.

A atividade proposta neste artigo se alinha com o pressuposto de Demo, pois procura despertar a curiosidade, formular o desejo da descoberta e, sobretudo, incentivar os alunos a elaborarem suas próprias questões. O papel do professor neste tipo de abordagem será assim o de orientador e colaborador do grupo de pesquisa. Mais do que despertar a curiosidade pelo tema, é fundamental que o professor desperte o ato político (da crítica) capaz de criar soluções.

I.3 Problematização

A problemática inicial para a elaboração deste trabalho foi: por que a temperatura de certa porção de água num bécquer continua a subir mesmo depois do ebulidor (um aquecedor elétrico de imersão) ser desligado? Deve-se ressaltar que desligamos o ebulidor antes da água atingir a temperatura de ebulição. Cindra (2004) apresenta uma interessante discussão conceitual a respeito do estudo do equilíbrio térmico, que serviu como ponto de partida na busca por uma explicação quantitativa para o fenômeno observado.

Sabíamos que os modelos teóricos disponíveis não nos satisfaziam. Se pensássemos no modelo em que o ebulidor transforma a energia elétrica em energia térmica (pelo efeito Joule) e a água, na qual este ebulidor está imerso, absorve esta energia térmica e aumenta sua temperatura. Se cessássemos a entrada de energia elétrica então não teríamos mais a fonte transferindo energia térmica para a água. Ou seja, a temperatura da água deveria imediatamente cair. Este modelo está muito bem representado numa animação interativa encontrada neste site². No caso da animação, a fonte não é elétrica, mas o princípio é o mesmo. Na simulação, ao ligarmos a fonte, a temperatura da água sobe. Se fizermos com que a fonte tenha potência 0 (zero) equivalendo a desligar a fonte, imediatamente a temperatura da água diminui. Se tentarmos reproduzir este mesmo experimento em sala de aula verificaremos que tal fato não ocorre. A temperatura da água continua a subir mesmo quando a fonte térmica é desligada.

Na simulação apresentada na Fig. 1, a fonte térmica é ligada em uma dada potência e, após um determinado intervalo de tempo, a potência é reduzida a zero, simulando o desligamento da fonte térmica. O gráfico mostra a elevação da temperatura durante o aquecimento da amostra, fonte térmica ligada, e a sua súbita queda imediatamente após o desligamento da mesma.

² <http://www.if.ufrj.br/~marta/aplicativos/limc_term_calorimetria_01.swf>.

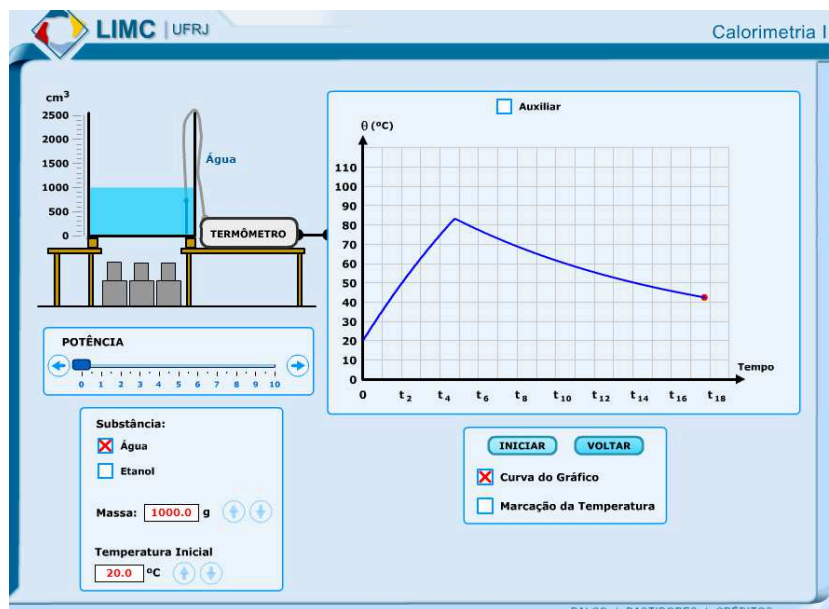


Fig. 1 – Tela do simulador mostrando a curva de aquecimento característica para uma certa amostra de água.

II. Proposição de um modelo explicativo

Ao ligarmos o aquecedor elétrico, por efeito Joule, a energia elétrica é transformada em energia térmica. Esta energia térmica é transferida constantemente para a água. Ao absorver a energia térmica, a temperatura da água sobe. O interessante é que, conforme veremos mais adiante, a temperatura do aquecedor sobe muito mais que a temperatura da água. Em geral, os aquecedores de imersão são feitos de material metálico, com calor específico bem inferior ao da água. Logo, quando o aquecedor está imerso na água e há troca de calor entre eles, a sua temperatura aumenta muito mais que a da água. Assim, ao desligarmos o aquecedor, a água estará a uma temperatura T e este a uma temperatura T' , onde $T' > T$.

Durante o aquecimento da água, é utilizado um termômetro para medir a sua temperatura (e não a do aquecedor). Ou seja, o termômetro está em equilíbrio térmico com a água, mas não com o aquecedor. Desta forma, quando o aquecedor é desligado, estes dois corpos, água e aquecedor, continuam trocando calor entre si. Assim, a temperatura de equilíbrio do sistema água + aquecedor será maior do que a temperatura que havia sido registrada pelo termômetro quando o aquecedor foi desligado. É importante salientar que, durante todo o intervalo de análise, há perda de energia para a vizinhança do sistema, ou seja, para o meio externo. No entanto, essa perda não é tão relevante enquanto o aquecedor não entra em equilíbrio térmico com a água. Uma vez que foi atingido o equilíbrio térmico entre eles, o sistema passa a sofrer uma queda de temperatura. É quando a perda de energia térmica para o meio externo passa a ser preponderante. O gráfico da Fig. 2, ilustra o modelo proposto:

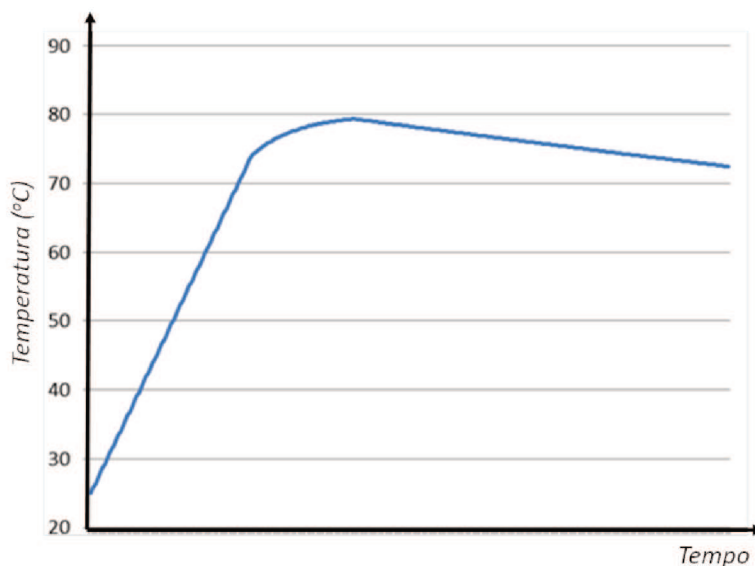


Figura 2 – Gráfico teórico da temperatura da água x tempo. Este gráfico foi plotado de acordo com o modelo proposto.

O gráfico da Fig. 2 representa um exemplo em que o ebulidor foi ligado quando a amostra de água estava a 25 °C e é desligado quando a água está a 75 °C. Após o desligamento, a temperatura da água continua a subir e o equilíbrio entre eles é atingido em torno de 80 °C (temperatura máxima do sistema). A partir desse ponto, a temperatura diminui em função da perda de energia térmica para o meio.

Este gráfico pode ser dividido em três etapas distintas, conforme mostrado do gráfico da Fig. 3.

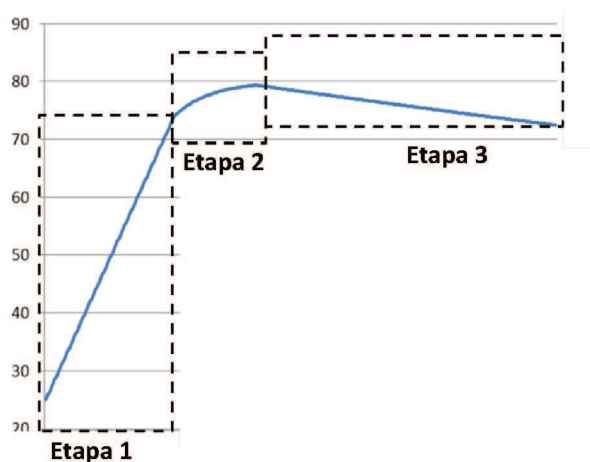


Fig. 3 – Divisão da curva de aquecimento da água em três etapas.

Dividimos o aquecimento da água em três etapas: 1) quando o ebulidor está ligado, 2) quando este está desligado e troca calor com a água e 3) após o equilíbrio térmico do sistema água + ebulidor, este passa a ter uma perda de energia relevante para o meio externo.

Nesse modelo, é importante observar que a temperatura máxima do sistema dependerá principalmente da massa de água. Quanto mais água no recipiente menos a temperatura do sistema subirá após o desligamento do ebulidor.

Segue abaixo uma explicação mais detalhada de cada etapa mencionada.

Etapa 1

Esta é a fase em que a temperatura da água cresce linearmente com o tempo. A fonte térmica transfere energia térmica para a água. O comportamento da temperatura da água ao longo dessa etapa pode ser exemplificado pela Equação Fundamental da Calorimetria, representada pela Eq. 1 (Equação Fundamental da Calorimetria, reescrita com o termo de potência térmica):

$$T(t) = \frac{P \cdot t}{C_{\text{água}}} + T_0 \quad (1)$$

sendo T a temperatura da água em função do tempo t , $C_{\text{água}}$ é a capacidade térmica da água, P é a potência da fonte térmica e T_0 é a temperatura inicial do sistema.

Observe que a Eq. 1 pode ser aproximada por uma reta, cujo coeficiente angular é dado por $P/C_{\text{água}}$.

Etapa 2

A etapa 2 representa o período que vai desde o desligamento do ebulidor até o sistema atingir o equilíbrio térmico, que é a temperatura máxima do sistema. É nessa fase que, mesmo o ebulidor estando desligado, continua havendo transferência de energia térmica para a água. Isso se dá pelo fato da temperatura do ebulidor ser maior que a da água. Nessas condições, podemos observar uma elevação da temperatura da água menos intensa que na etapa 1.

A equação da temperatura devida a troca de calor entre corpos é dada por (Equação da temperatura devida à troca de energia térmica entre água e ebulidor, após o desligamento deste):

$$T(t) = (T_B - T_{eq})e^{-kt} + T_{eq} \quad (2)$$

na qual T_{eq} é a temperatura de equilíbrio do sistema, T_B é a temperatura da água no instante em que o ebulidor é desligado e k é uma constante. A Eq. 2 é uma solução particular da conhecida Equação de Newton do aquecimento/resfriamento (MORAES, 2011)

O comportamento da temperatura na Eq. 2 pode ser representado pelo gráfico da Fig. 4.

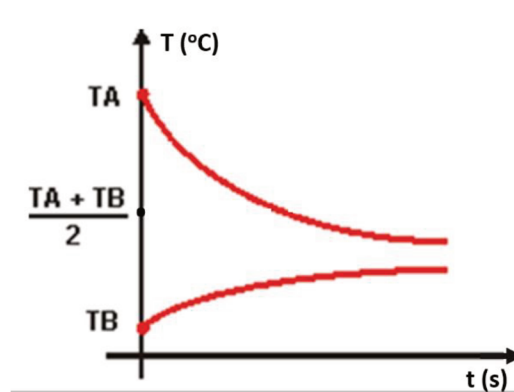


Fig. 4 – Gráfico Temperatura x tempo dado pela equação 2. T_A é a temperatura do ebulidor no instante em que este é desligado e T_B é a temperatura da água.

Observe que a temperatura de equilíbrio é abaixo da média aritmética das temperaturas iniciais dos corpos. Quanto maior a massa da água, a temperatura de equilíbrio será mais abaixo desta linha média. Ou seja, menor será o aumento da temperatura depois do desligamento do ebulidor (ver Fig. 7, 8 e 9).

Obs.: Neste momento existe perda de energia térmica do sistema para o meio ambiente. Não estamos considerando esta perda de energia na nossa equação.

Etapa 3

A ideia é a mesma que na etapa 2 acima, porém agora o sistema troca calor com o ambiente. As equações que regem este momento são as mesmas apresentadas acima. Fazendo um esboço do gráfico teríamos:

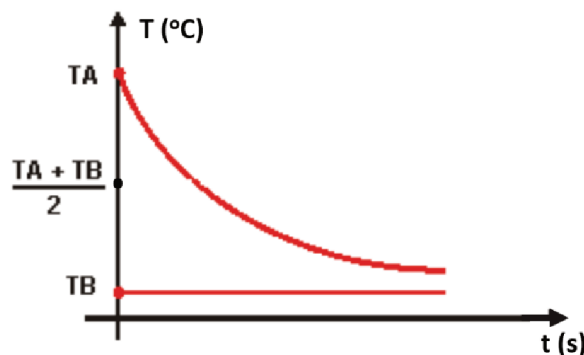


Fig. 5 – Gráfico Temperatura x tempo dado pela equação 2. Desta vez T_A é a temperatura da água em equilíbrio com o ebulidor. T_B é a temperatura ambiente.

Como a capacidade térmica do ambiente é muito maior do que o sistema, sua temperatura não se altera e a temperatura de equilíbrio do sistema será a do próprio ambiente (TB).

III. Apresentação dos dados experimentais

III.1 Montagem do aparato experimental

Para tomada dos dados de aquecimento/resfriamento da água foi montado um aparato baseado no Arduino³. A figura abaixo mostra uma montagem esquemática deste aparato.

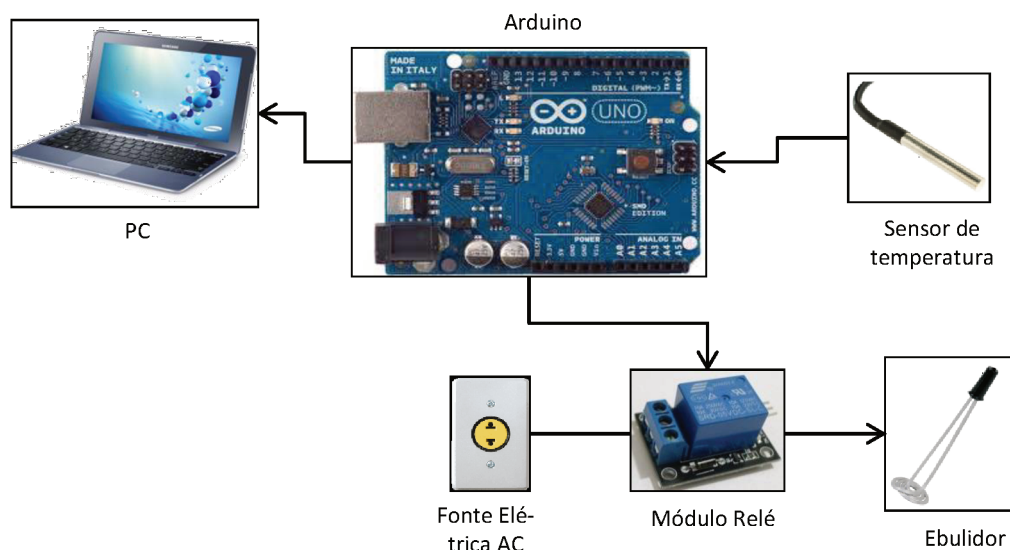


Fig. 6 – Aparato experimental preparado para a tomada de dados. A placa Arduino é a principal peça desta montagem.

Mediante a uma programação, feita na linguagem C, e armazenada no microcontrolador do Arduino, a informação da temperatura da água, que é medida pelo sensor de temperatura⁴ é lida pelo dispositivo. O valor desta leitura é mostrado na tela do PC. O microcontrolador, mediante a programação prévia do usuário, controlará o liga/desliga do ebulidor. Como o Arduino trabalha com corrente contínua e o ebulidor funciona com corrente alternada, faz-se necessário o uso de um “módulo relé” para atuar como o botão liga/desliga. O Arduino controla o relé, e este controla o ebulidor. Programamos o Arduino para desligar o ebulidor quando a temperatura da água for igual a 40 °C. Desta forma, apresentamos alguns gráficos de temperatura (°C) x tempo (passos). Um passo, unidade utilizada em nossos gráficos, é o tempo necessário para o Arduino fazer a leitura da temperatura e imprimir este na tela do PC. Cada passo

³ Para mais informações sobre a plataforma Arduino acesse: <<http://www.arduino.cc/>>.

⁴ Sensor ds 18b20. Para especificações técnicas acesse: <<http://dlnmh9ip6v2uc.cloudfront.net/datasheets/Sensors/Temp/DS18B20.pdf>>.

dura aproximadamente 1 s. A quantidade de água aquecida está representada nos gráficos. Em todas as tomadas de dados o ebulidor foi desligado quando a água estava a 40 °C.

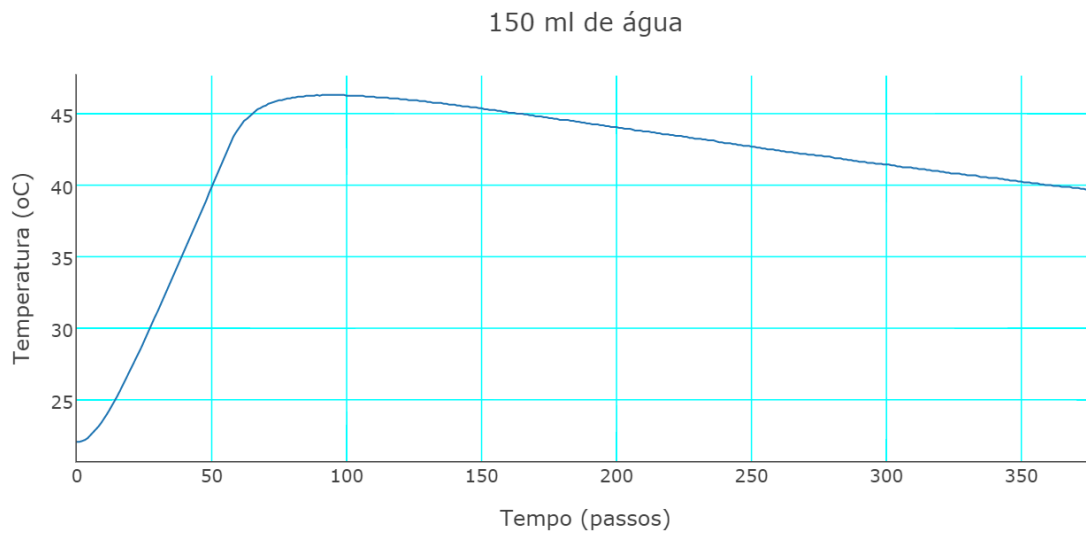


Fig. 7 – Aquecimento de 150 ml de água. A temperatura da água subiu aproximadamente 6,3 °C para além da temperatura de desligamento.

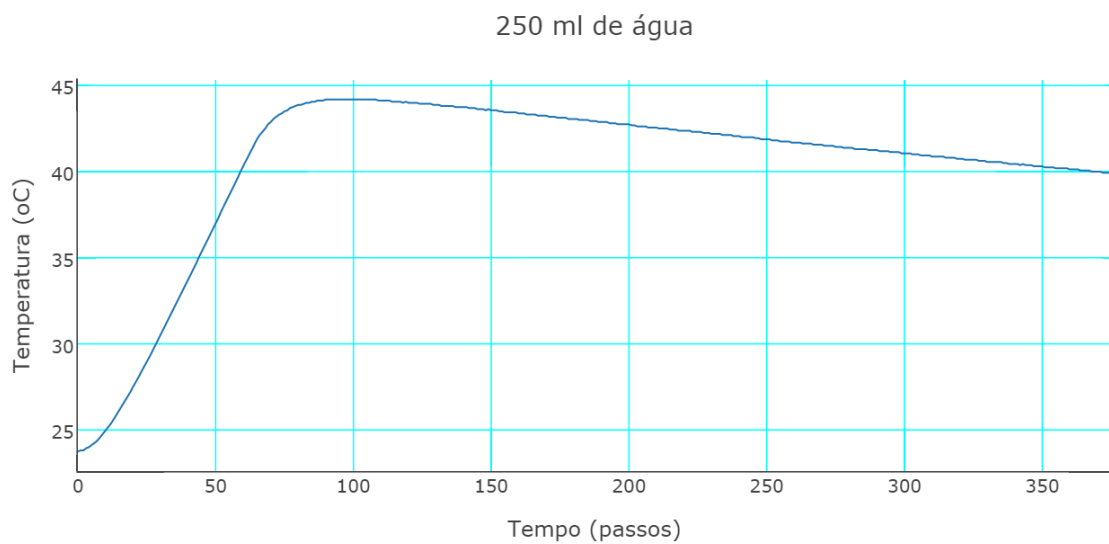


Fig. 8 – Aquecimento de 250 ml de água. A temperatura da água subiu aproximadamente 4,2 °C para além da temperatura de desligamento.

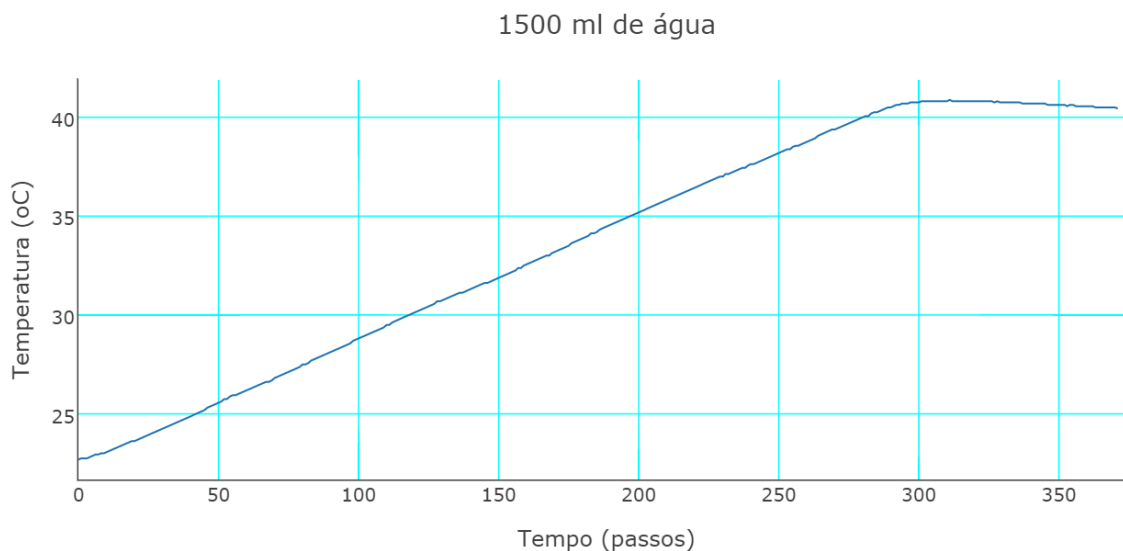


Fig. 9 – Aquecimento de 1500 ml de água. A temperatura da água subiu aproximadamente 0,8 °C para além da temperatura de desligamento.

Nos gráficos das figuras acima verificamos que, à medida que a massa de água aumenta, menor será a temperatura que a água aumentará depois do desligamento do ebulidor. Para a nossa proposta inicial, que era de manter certa porção de água a uma temperatura constante, observamos que deveríamos trabalhar com massas de água na ordem dos 1500 ml. Pois uma vez que a capacidade térmica do ebulidor não é desprezível, e como sua temperatura é bem maior do que a água, quanto maior a massa de água, menor será a elevação de temperatura desta após o desligamento do ebulidor (ver Fig. 4). Com uma quantidade de água relativamente grande, 1500 ml (equivalente a 1,5 kg) temos o comportamento como apresentado na figura 5, onde a temperatura de equilíbrio, devida a grande massa de água, será a própria temperatura da água.

III.2 Estimativa da temperatura do ebulidor

A fim de determinarmos a temperatura do ebulidor logo após o desligamento, primeiro realizamos um procedimento experimental para determinar a capacidade térmica do ebulidor.

1) Dentro de um copo de isopor, que faz a função de um calorímetro, colocamos o ebulidor desligado imerso em 150 ml de água. Deixamos com que o ebulidor e a água atingissem o equilíbrio térmico (26 °C).

2) Após, descartamos a água fria e acrescentamos neste copo de isopor 160 ml de água a 94 °C. Depois de certo tempo, o sistema atingiu a temperatura de 88 °C.

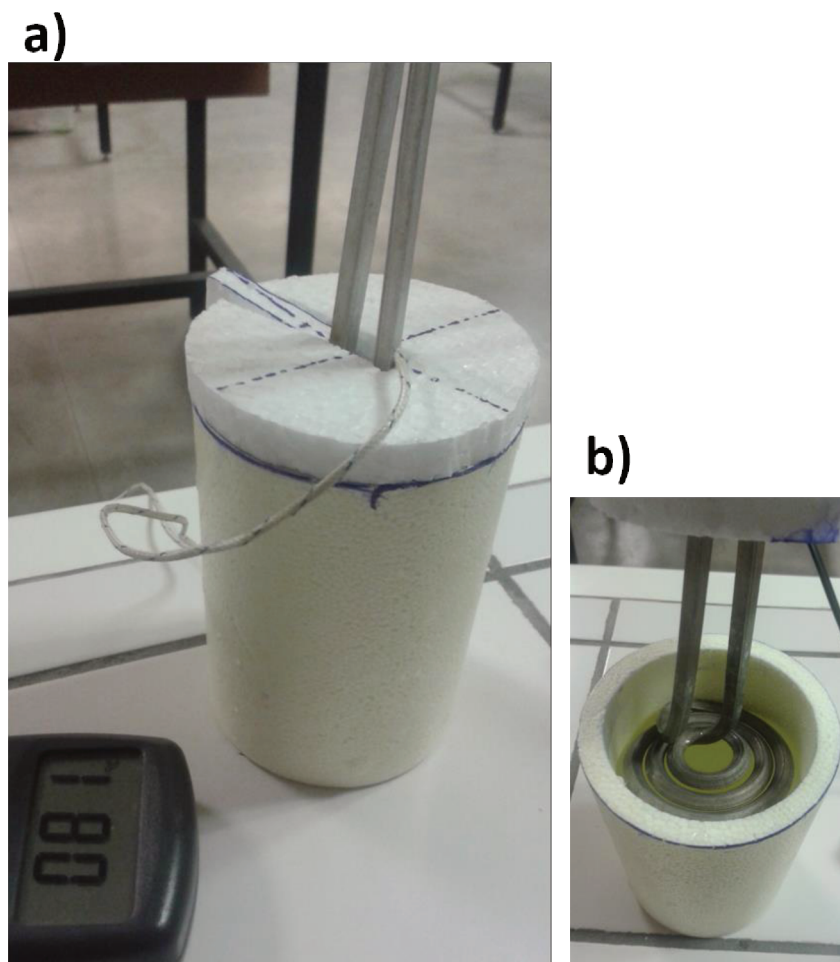


Fig. 6 – Ebulidor dentro do calorímetro de isopor. Em a) mostramos um termômetro digital registrando a temperatura da água e em b) detalhe do ebulidor dentro do copo de isopor.

Considerando apenas o ebulidor (desligado) e a água quente temos que a troca de calor entre os corpos é nula (Equação 3 – Troca de calor exclusiva entre dois corpos, sem perda).

$$Q_{Ebulidor} + Q_{Água} = 0 \quad (3)$$

na qual $Q_{Ebulidor}$ é a energia térmica ganha pelo ebulidor e $Q_{Água}$, a energia térmica perdida pela água quente. Substituindo os dados temos:

$$C_{Ebulidor} \cdot (88 - 26) + 150 \cdot 4,2 \cdot (88 - 94) = 0$$

sendo $C_{Ebulidor}$ a capacidade térmica do ebulidor e 4,2 o calor específico da água $c = 4,2\text{J/cal}^\circ\text{C}$.

3) Da equação acima chegamos em um valor da capacidade térmica de aproximadamente $61\text{ J}/^\circ\text{C}$.

De posse da capacidade térmica do ebulidor, realizamos novamente o exercício de calcular a temperatura inicial do ebulidor, a partir das equações da calorimetria do ensino médio. Desta vez os dados foram:

- massa de água: 250 ml,
- temperatura inicial: 40 °C.

Considerando que foi a partir de 40 °C que o ebulidor foi desligado, então, foi a partir desta temperatura que a água começou a trocar energia térmica com o ebulidor a fim de ambos atingirem o equilíbrio térmico. Consideramos que o aumento da temperatura da água acima de 40 °C foi devido à energia perdida pelo ebulidor quente (e desligado). A temperatura final da água 44,2 °C foi a temperatura máxima registrada após o desligamento do ebulidor. Este dado foi retirado do gráfico da Fig. 8.

Quanto aos dados do ebulidor temos:

- capacidade térmica 61 J/°C,
- temperatura final 44,2 °C.

Assim a partir deste dados determinamos que a temperatura inicial do ebulidor estava em torno de 116 °C. Para este cálculo, consideramos apenas a troca de energia entre o ebulidor e a água. Esta é uma estimativa e não temos como comprovar essa temperatura. Uma observação interessante que se faz é que, ao realizarmos o experimento de aquecimento da água, estamos trabalhando com temperaturas bem abaixo da temperatura de ebulição da água, porém observamos que a porção de água que fica em contato com o ebulidor entra em ebulição, fato este concluído a partir da observação da formação de bolhas em volta do ebulidor.

IV. Considerações finais

Conforme mencionado anteriormente, este trabalho foi desenvolvido em conjunto com seis alunos. Mais especificamente, seis alunos do 2º ano do Ensino Médio. E, antes de concluirmos que a capacidade térmica da fonte térmica, para pequenas quantidades de água, não é desprezível, os alunos fizeram uma analogia interessante. Imbuídos pelos estudos das leis de Newton, os alunos observaram que quanto mais massa de água, mais o sistema resiste à mudança. No nosso caso, a mudança seria a variação da temperatura depois do desligamento do ebulidor. Nesta etapa, os alunos intitularam esta conclusão de “inércia térmica”, uma alusão à 1ª lei de Newton.

Para concluir, neste trabalho mostramos que nem sempre devemos desconsiderar a capacidade térmica da fonte térmica, e mostramos também que a partir de um certo valor da massa de água, esta capacidade térmica começa a ser desprezível. Vale a pena termos estas considerações em mente principalmente quando desejamos fazer alguma demonstração em sala de aula/laboratório. Em geral usamos pequenas quantidades de água. E, neste caso, observamos que a capacidade térmica do ebulidor influencia no aquecimento.

Este trabalho também nos serviu como fonte de motivação para irmos além do que é mostrado nos livros didáticos do ensino médio. Além dos tópicos de calorimetria estudados durante a elaboração deste trabalho, devemos salientar que podemos, como professores, motivar os alunos quanto uma atitude investigativa frente à problemas reais.

Referências bibliográficas

CINDRA, J. L.; TEIXEIRA, O. P. B. Discussão conceitual para o equilíbrio térmico. **Caderno Brasileiro de Ensino de Física**, v. 21, p. 176-193, ago. 2004.

DEMO, P. **Pesquisa: Princípio científico e educativo**. 14. ed. São Paulo: Cortez, 2011.

MATIAS, J. Teoria de controle PID. **Mecatrônica Atual**, n. 3, abr. 2002.

MORAES, R. de **Estudo das equações diferenciais ordinárias de primeira ordem**. 2011. Trabalho de conclusão de curso. Unesp, São Paulo. Disponível em: <<http://www.feg.unesp.br/~ernesto/guiaedo/Tcc.pdf>>.

NUNES, C. O. da C. **Investigação sobre os hábitos de estudo e pesquisa de alunos do Ensino Médio**. 2006. Dissertação (Mestrado) - PUCRS, Porto Alegre.

SIAS, D. B.; RIBEIRO-TEIXEIRA, R. M. Resfriamento de um corpo: a aquisição automática de dados propiciando discussões conceituais no laboratório de Física no Ensino Médio. **Caderno Brasileiro de Ensino de Física**, v. 23, n. 3, p. 360-381, dez. 2006.