

O Caldeirão como Calorímetro em Classe

(Classroom use of a normal cooking pot as calorimeter)

Klaus Weltner e Paulo Miranda

Instituto de Física, Universidade Federal da Bahia

Rua Caetano Moura 123

Campus Universitário de Ondina, 40210-340, Salvador, BA, Brazil

Recebido 5 de novembro, 1997

Mostramos como um caldeirão comum e um ebulidor elétrico podem ser usados em classe para medir os calores específicos da água e do alumínio e além disso os calores de vaporização e de fusão da água em classe. Ao invés de evitar as perdas medimos e as levamos em conta. O procedimento é simples e os resultados são estimulantes.

A normal cooking pot and an electrical heater may serve to measure the specific heat capacity of water and aluminium and moreover the heat capacity of vaporization and melting of water. Instead minimizing losses of energy we measured these losses and regarded them during the calculations. The experiments are easy to perform and the results are promizing.

I. Introdução

Recentemente J. H. Vuolo e C. H. Furukawa mostraram como se pode usar uma âmpola de uma garrafa térmica de aço inoxidável para construir um calorímetro [1]. Este experimento deu resultados com boa precisão mas é destinado ao laboratório da disciplina Física Experimental II e requer certos recursos experimentais.

O objetivo deste nosso trabalho é mostrar para um professor de 2^o Grau, cuja escola não lhe proporciona condições para fazer experimentos sofisticados, como medir os calores específicos da água e do alumínio e também os calores de vaporização e de fusão em classe.

Os utensílios necessários são os do dia a dia: um caldeirão comum utilizado como calorímetro, um ebulidor elétrico e se for acessível um termômetro.

Ao invés de evitar as perdas do calor usando um calorímetro sofisticado nos enfatizamos a medida das perdas, levando-as em conta nos cálculos. Os resultados são estimulantes e os erros finais são da mesma ordem de grandeza que os erros cometidos na determinação da potência do ebulidor e da temperatura.

Para professores cujas escolas não possuem sequer

um termômetro, mostramos como fazer as mesmas medições usando somente caldeirão, ebulidor e relógio. Neste método, os erros aumentam um pouco mas não significativamente.

Um valor adicional desta abordagem é mostrar aos alunos o raciocínio de um físico, que deve analisar as condições em que se realiza o experimento identificando as fontes de erros sistemáticos, medindo-os e levando-os em conta na determinação dos resultados finais das grandezas.

II. O caldeirão como calorímetro medição das perdas de energia

A tarefa de um calorímetro é evitar ou pelo menos diminuir significativamente as perdas da energia. Se for usado um caldeirão comum como calorímetro tem-se pouco isolamento térmico. Como já foi mencionado, ao invés de minimizá-las, nos propomos medi-las e leva-las em conta na determinação dos parâmetros pretendidos. A medição das perdas não é difícil é o raciocínio é bem acessível até mesmo para alunos de 2^o Grau.

Com o conhecimento desta perdas, as medições podem ser corrigidas como se segue para obter resultados com uma precisão satisfatória.

A energia efetivamente fornecida ao nosso sistema físico (água, caldeirão) é a energia fornecida pelo ebulidor *menos* a energia perdida.

Para obter a potência efetiva temos que *subtrair* a potência das perdas da potência do ebulidor.

Resta um problema. No caso da medição do calor específico da água a temperatura não é constante. Em decorrência disto, temos que subtrair a potência média das perdas. Se começarmos a medição com uma temperatura inicial da água próxima à do ambiente e se medirmos as perdas na temperatura máxima da medição, podemos tomar a metade dela como potência média das perdas. Aconselhamos fazer isso em classe, porque assim a medição pode ser concluída durante uma hora de aula. Se houver tempo bastante, pode-se medir a potência das perdas para o valor médio da variação da temperatura.

III. Medições

III.1 Medição do calor específico da água

Material usado: um caldeirão de 5 litros, um ebulidor elétrico, um termômetro.

A tampa do caldeirão deve ter um corte em sua borda para adaptar o ebulidor e um orifício perto do centro para deixar o termômetro entrar. Para proteger a mesa aconselhamos usar um papelão espesso sob o caldeirão. A potência do ebulidor consta na placa ou pode ser determinado com maior precisão medindo a tensão e a corrente.

Procedimento: Uma determinada massa de água dentro do caldeirão é aquecida pelo ebulidor. A temperatura é medida em intervalos de 1 minuto. No início tem diferenças de temperaturas entre as camadas de água. Mas com as temperaturas elevadas, estas diferenças diminuirão absoluta e relativamente porque a convecção aumenta com a temperatura e a viscosidade diminui. Bolinhas de vapor se formam perto do ebulidor, sobem e condensam nas camadas superiores. Quando a água ferver o ebulidor deve ser desligado, devendo continuar a medição das temperaturas por, pelo menos, doze minutos. Com esses dados construímos um gráfico de temperatura versus tempo. Fig. 2

Um caldeirão contendo uma determinada massa de água aquecida perde energia pela radiação térmica e pela convecção. Se o ebulidor for desligado o caldeirão

não tem fonte de energia, exceto a sua própria energia térmica. Então, em consequência destas perdas, o caldeirão, quer dizer, a água dentro dele, se esfria. Medindo este esfriamento nós podemos determinar o valor das perdas.

Basta aquecer um caldeirão tampado com, por exemplo, 4 litros de água até o ponto de ebulição, desliga-se então o ebulidor e deixa-se o caldeirão esfriar medindo sua temperatura em intervalos de tempo definidos. A figura 1 mostra o gráfico da temperatura versus o tempo.

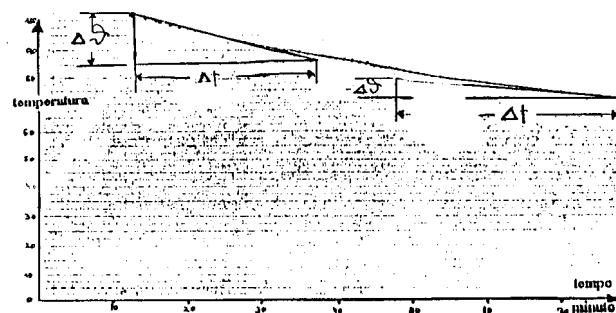


Figura 1. Esfriamento. Temperatura do caldeirão em função de tempo ($m=4$ kg). Dados obtidos experimentalmente.

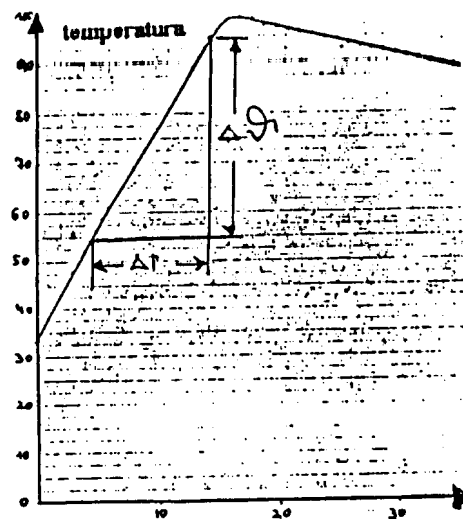


Figura 2. Aquecimento. Temperatura da água versus tempo. Massa da água 4 kg.

Para um determinado intervalo do tempo Δt podemos medir o decaimento da temperatura $\Delta\vartheta$. Neste caso a energia perdida é $\Delta Q = C_{\text{água}} \cdot m \cdot \Delta\vartheta$, sendo o calor específico da água igual a $C_{\text{água}} = 4190 \frac{\text{wattseg}}{\text{kg.grau}}$ e $m = 4$ kg a massa da água.

A energia perdida por segundo ou a potência das perdas é: $P = \frac{m \cdot C_{\text{água}} \Delta\vartheta}{\Delta t}$.

Refiramos-nos à figura 1. Em torno do 95°C a temperatura cai num intervalo de 10 minutos de 98.5°C para 92.5°C.

E em torno de 75°C a temperatura cai num intervalo de 10 minutos de 75.5 °C para 72.0°C. As potências das perdas são respectivamente: $P_{\text{perda}95^{\circ}\text{C}} = 167 \text{ watt}$ $P_{\text{perda}75^{\circ}\text{C}} = 97 \text{ watt}$.

A potência das perdas depende da temperatura e é aproximadamente proporcional à diferença entre a temperatura do caldeirão e a do ambiente.

Quando o ebulidor for ligado a energia fornecida por ele equivale a energia consumida pela água, ou seja

$$mC_{\text{água}}\Delta\vartheta = P\Delta t,$$

então

$$C_{\text{água}} = \frac{P \cdot \Delta t}{m \cdot \Delta\vartheta}$$

Vamos agora determinar $C_{\text{água}}$ com os nossos dados experimentais (veja a figura 1) sem levar em conta as perdas.

$$P = 1340 \text{ watt} \quad m = 4 \text{ kg}$$

$$\Delta\vartheta = 96^{\circ}\text{C} - 33^{\circ}\text{C} = 63 \text{ graus}$$

$$\Delta t = 15 \text{ min} = 900 \text{ seg}$$

Resultado:

$$C_{\text{água}} = 4786 \frac{\text{wattseg}}{\text{kg} \cdot \text{grau}}$$

Este resultado não é bem coerente com o da tabela, fornecida anteriormente e a discrepância é de 14%.

$$C_{\text{água}} \text{ pela tabela} = 4190 \frac{\text{wattseg}}{\text{kg} \cdot \text{graus}}$$

Devemos então corrigí-lo, levando em conta as perdas de energia. Como foi explicado antes a potência efetiva é a potência do ebulidor menos a potência média das perdas. No nosso caso

$$E_{\text{efetiva}} = P_{\text{ebulidor}} - \frac{1}{2}P_{\text{perdas máximas}}$$

$$P_{\text{efetiva}} = \left(1340 - \frac{167}{2}\right) \text{ watt} = 1257 \text{ watt}$$

Com esta correção o valor de $C_{\text{água}}$ se aproxima bastante do seu valor da tabela e a discrepância é agora de 7% .

$$C_{\text{água}} = 4487 \frac{\text{wattseg}}{\text{kg} \cdot \text{graus}}$$

No entanto, temos mais uma correção a fazer no próximo parágrafo.

III.2 Aquecimento do caldeirão - capacidade térmica do caldeirão

A massa total aquecida não é só a da água mas também a do caldeirão. A massa do caldeirão desempenha o mesmo papel que uma certa massa equivalente de água. Podemos medir esta massa equivalente de uma maneira simples. Separadamente do caldeirão, aquecemos uma determinada massa m de água (1 ou 2 litros) até cerca de 90°C. Pôr alguns minutos medimos a sua temperatura que cai lentamente. Depois colocamos a água dentro do caldeirão e o tampamos. Medindo a temperatura desta água constatamos uma brusca queda de temperatura e depois um esfriamento lento. Figura 3.

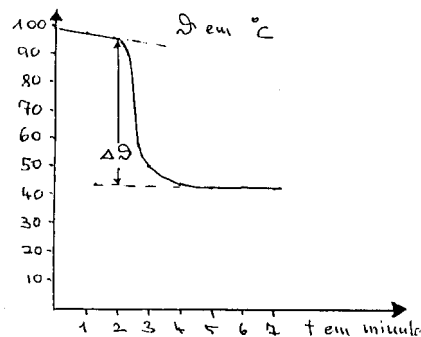


Figura 3 Temperatura da água antes e depois de sua colocação no caldeirão.

A diferença entre as duas linhas antes e depois que a água foi colocada no caldeirão é decorrente do aquecimento do mesmo. O caldeirão possuía a temperatura ambiente ϑ_1 e foi aquecido á temperatura ϑ_2 . Por isso a água esfriou da temperatura ϑ_0 para a temperatura ϑ_2 .

Sendo a capacidade térmica do caldeirão expressa em equivalente de água m' , temos: Calor consumido pelo caldeirão = Calor fornecido pela água.

$$m' C_{\text{água}}(\vartheta_2 - \vartheta_1) = m C_{\text{água}}(\vartheta_0 - \vartheta_2)$$

$$m' = m \frac{(\vartheta_0 - \vartheta_2)}{(\vartheta_2 - \vartheta_1)}$$

Com os nossos dados, obtemos $m' = 218\text{g}$. Repetimos esta medida várias vezes com 1 - 2 litros de água quente. Os resultados obtidos não dependem da massa de água, e têm um erro de medida de $\pm 20\%$. Sendo o equivalente de água do caldeirão uma correção do cálculo, este erro é aceitável

Com esta correção, adicionando o equivalente de água de caldeirão à massa de água aquecida, obtemos finalmente o calor específico da água bem perto do valor da tabela:

$$C_{\text{água}} = 4288 \frac{\text{wattseg}}{\text{kg} \cdot \text{grau}}$$

III.3 Medição do calor de vaporização

Com o caldeirão pode-se também medir com facilidade o calor de vaporização. Basta deixar a água ferver um certo tempo pesando-a antes e depois. Começamos com 4000 g de água. Depois de 30 min de ebulição tínhamos somente 3005 g, tendo 995g se evaporado.

Igualando o calor fornecido ao calor consumido pela vaporização temos:

$$P \cdot \Delta t = \Delta m \cdot C_{\text{vaporização}}$$

Como dito antes, temos que levar em conta as perdas. A potência das perdas já é conhecida. Numa temperatura de $\vartheta = 95^\circ\text{C}$, as perdas equivalem a uma potência de 168 watt. Neste caso a temperatura do caldeirão é constante e então a potência efetiva é

$$P_{\text{efetiva}} = (1350 - 168)\text{watt} = 1182\text{watt}.$$

O resultado da nossa medição é:

$$C_{\text{vaporização}} = 2138 \frac{\text{wattseg}}{\text{g}}$$

O valor da tabela é:

$$C_{\text{vaporização}} = 2256 \frac{\text{wattseg}}{\text{g}}$$

Esta precisão é bastante satisfatória para uma medição em classe.

$$m_{\text{água}} \cdot C_{\text{água}} \cdot \Delta\vartheta_{\text{água}} = m_{\text{alumínio}} \cdot C_{\text{alumínio}} \cdot \Delta\vartheta_{\text{alumínio}}$$

III.4 Medição do calor de fusão

Para medir o calor de fusão basta colocar uma quantidade de gelo, m_{gelo} , num caldeirão contendo uma massa $m_{\text{água}}$ de água quente de temperatura ϑ_1 , e deixar o gelo degelar e medir a temperatura ϑ_2 , depois. Neste caso a água quente perde calor para fundir o gelo e aquecer a água degelada.

$$m_{\text{gelo}}(L_{\text{gelo}} + \vartheta_2 C_{\text{água}}) = C_{\text{água}} m_{\text{água}} (\vartheta_1 - \vartheta_2)$$

Podemos agora determinar explicitamente o calor de fusão do gelo L_{gelo}

$$L_{\text{gelo}} = C_{\text{água}} \left(\frac{m_{\text{água}}}{m_{\text{gelo}}} \right) (\vartheta_1 - \vartheta_2) - \vartheta_2$$

Dados: $m_{\text{gelo}} = 0,95 \text{ kg}$

$m_{\text{água}} = 2,28 \text{ kg}$

$\vartheta_1 = 95^\circ\text{C}$

$\vartheta_2 = 42.5^\circ\text{C}$

Resultado

$$L_{\text{gelo}} = 335 \frac{\text{watt} \cdot \text{seg}}{\text{kg}}$$

O valor da tabela é

$$L_{\text{gelo}} = 333 \frac{\text{watt} \cdot \text{seg}}{\text{kg}}$$

III.5 Medição do calor específico do alumínio

Para medir o calor específico do alumínio nós colocamos uma certa quantidade de barras de alumínio a temperatura ambiente dentro do caldeirão com água quente. A figura 4 mostra a temperatura da água. As curvas “antes” e “depois” têm uma diferença de 4.5°C para uma massa de alumínio $m_{\text{alumínio}} = 1,4 \text{ kg}$ e uma massa de água (água e equivalente de água) $m_{\text{água}} = 4,2 \text{ kg}$.

Então temos: Perda da energia da água = Energia consumida pelo alumínio,

Dados

$$\Delta\vartheta_{\text{água}} = 4,5\text{grau}$$

$$\Delta\vartheta_{\text{alumínio}} = 55\text{grau}$$

Resultado

$$C_{\text{alumínio}} = 1030 \frac{\text{watt} \cdot \text{seg}}{\text{kg} \cdot \text{grau}}$$

O valor da tabela é

$$C_{\text{alumínio}} = 960 \frac{\text{watt} \cdot \text{seg}}{\text{kg} \cdot \text{grau}}$$

A discordância de 7% não é grande, mas além disso pode ser feita uma correção. Para jogar o alumínio dentro do caldeirão tem que tirar a sua tampa. Sem a tampa o sistema perde a energia mais rapidamente. Tiramos a tampa por 10 vezes. A duração de cada retirada foi a mesma necessária para colocar o alumínio no caldeirão. Neste caso a temperatura caiu em 3.5 graus. Portanto temos que considerar que 0.35 graus da diferença da temperatura da água é atribuída a abertura do caldeirão.

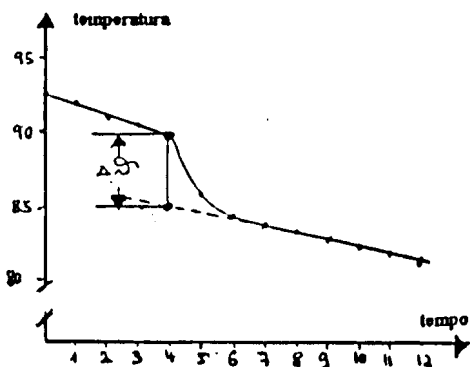


Figura 4. Temperatura versus tempo.

Com esta correção obtemos:

$$C_{\text{alumínio}} = 950 \frac{\text{watt} \cdot \text{seg}}{\text{kg} \cdot \text{grau}}$$

Pode-se medir o calor específico de outras substâncias pelo mesmo procedimento.

IV. Medições sem termômetros

Se o professor não dispuser de um termômetro, todas as medidas acima descritas podem ser agora realizadas como segue.

IV.1 Medição do calor de ebulição

Neste caso observamos que não precisamos de um termômetro para observar quando a água ferve. Então podemos deixá-la ferver um certo tempo e pesar o caldeirão com água antes e depois. Para medir a massa da água evaporizada. Com estes dados a determinação de L segue o procedimento anterior.

IV.2 Medição do calor específico da água

Neste caso podemos usar a temperatura do ambiente que é conhecida com um erro de $\pm 5^\circ\text{C}$ e a temperatura da ebulição, 100°C , para saber por quantos graus a água foi aquecida.

Aquecemos a água desde a temperatura ambiente até a ebulição e medimos o tempo. Com este método obtemos valores discrepantes dos da tabela em 5-10%.

IV.3 Potência efetiva, potência das perdas

Para medir a potência das perdas aquece-se a água até a ebulição. Depois deixa-se a água esfriar por um determinado tempo t_1 (15-20 minutos). Em seguida liga-se o aquecedor de novo e mede-se o tempo t_2 para a água ferver de novo. Neste caso a energia fornecida compensa as perdas durante todo tempo ($t_1 + t_2$). A potência das perdas é:

$$P_{\text{perdas}} = P \frac{t_2}{t_1 + t_2}$$

Exemplo: $t_1 = 15 \text{ min} = 900\text{seg}$; $t_2 = 105 \text{ segundos}$;
 $P_{\text{perdas}} = 140 \text{ watt}$

IV.4 Medição do calor de fusão

Deixa-se uma quantidade (3 litros) de água ferver. Depois uma quantidade de gelo (1.0 kg) é colocada dentro da água. A ebulição acaba de repente.

Com o aquecedor ligado se pode medir o tempo para a água ferver de novo. Neste caso a energia fornecida serve para degelar o gelo e aquecer a nova água até 100°C .

A determinação da potência efetiva é um pouco mais complicada, porque durante o experimento a temperatura não é constante. Mas uma vez que a temperatura está sempre próximo de 100°C pode-se usar a potência das perdas para este valor sabendo que a potência média das perdas é menor.

Com os dados experimentais obtemos: $L_{\text{gelo}} = 418$

O valor da tabela: $L_{\text{gelo}} = 334$

Até neste caso obtemos resultados. Razoáveis, pois a discrepância foi de 25%.

V. Conclusão e anotações

Usar um caldeirão como calorímetro dá resultados razoáveis se as perdas forem controladas e levados em conta. Os exemplos mostram sobretudo como é possível usar utensílios do dia a dia para medir grandezas físicas se o pensamento é criativo e crítico. Embora tenhamos usado utensílios simples algumas precauções devem ser mantidas. A tensão da rede eléctrica não é muito estável - pelo menos aqui em Salvador. O erro decor-

rido das alterações da tensão podem ser os maiores. Se for possível controlar a tensão e a corrente, isso deve ser feito.

Convecção do ar: As perdas pelo aquecimento do ar dependem da convecção do ar. Elas são proporcionais à diferença entre a temperatura do caldeirão e do ar, se a convecção for constante. Então deve-se manter a convecção constante e não deixá-la aumentar com a temperatura do caldeirão. Para isso aconselhamos colocar o caldeirão abaixo de um ventilador de teto. Assim aumentam a convecção do ar e as perdas mas em compensação a convecção é estável.

Agradecemos a ajuda do GtZ (Gesellschaft für technische Zusammenarbeit-Alemanha).

Referência

J. H. Vuolo J.H. e C. H. Furukawa, "Calorímetro didático". Rev. Bras. de Ensino de Física **17**, 140 (1995).