
DETERMINAÇÃO DA CONSTANTE SOLAR POR MEIO DE UM “CALORÍMETRO” COM GELO

Cláudio A. Perottoni
Janete E. Zorzi
Departamento Física e Química – UCS
Caxias do Sul – RS

Resumo

Este artigo descreve um arranjo experimental bastante simples que permite a determinação da taxa de incidência de radiação solar por metro quadrado de superfície terrestre para, em seguida, estimar a constante solar e a potência radiada pelo Sol

I. Introdução

A coincidência entre um ensolarado dia de inverno e o congelamento da água de uma bacia no interior da geladeira do laboratório levou à realização de um experimento ao mesmo tempo instrutivo e divertido.

A idéia em si não é nova ^(1, 2, 3). Trata-se, em última análise, da medida da taxa de incidência de radiação solar por metro quadrado de superfície terrestre utilizando um calorímetro, neste caso, com gelo.

II. Material e montagem experimental

Material necessário:

- recipiente para o gelo (no experimento aqui descrito, as dimensões eram 0,5 x 0,29 x 0,05 m);
- proveta graduada, ou outro recipiente que permita medidas de volume;
- Cronômetro.

O recipiente com o gelo é deixado por alguns minutos ao ar livre, protegido do Sol, de modo a que se inicie o processo de fusão. Então, retira-se o líquido assim formado e dispõe-se o recipiente horizontalmente, conforme a Fig. 1, sustentado em seus quatro cantos por apoios de madeira, procurando diminuir ao máximo a transferência de calor por condução.

III. Procedimento experimental

O recipiente, com uma camada de gelo (de aproximadamente 1 cm de espessura), foi colocado ao ar livre, protegido da incidência da radiação solar direta por meio de um anteparo posto 50 cm acima dele.

Com esse arranjo, mede-se o volume de água acumulada da fusão do gelo a cada 10 minutos. Esse procedimento é repetido de três a quatro vezes, até haver reprodutibilidade nos resultados, com os quais calcula-se a taxa de fusão do gelo decorrente da transferência de calor por convecção do ar, m_{conv} (considerando a densidade da água igual a 1000 kg.m^{-3}).

Em seguida, retira-se o anteparo, expondo o sistema à radiação solar direta.

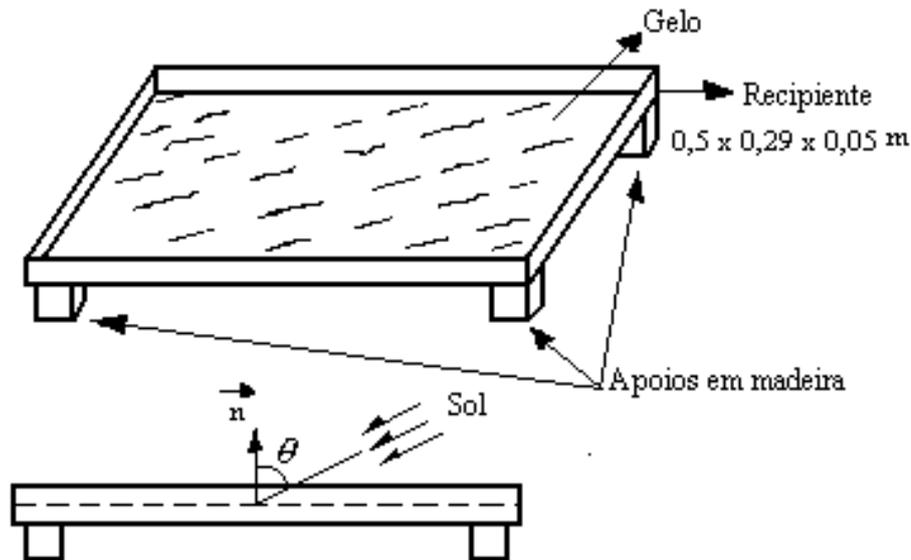


Fig.1- Esquema de montagem do experimento.

Repete-se a coleta de água acumulada pela fusão do gelo a cada 10 minutos, conforme o procedimento anterior. A média dos valores assim obtidos corresponde à taxa de fusão do gelo devido à transferência de calor por convecção do ar e radiação (mt). Os resultados de uma experiência são mostrados na Tabela 1.

O ângulo θ entre a direção de incidência dos raios solares e a normal à superfície do gelo é facilmente obtido medindo-se o comprimento da sombra projetada por uma haste vertical de altura conhecida, conforme a Fig. 2. Para os valores anotados na Tabela 1, o valor do ângulo θ era de $45,6^\circ$.

Tabela 1 – Resultados experimentais obtidos conforme o procedimento descrito.

Data: 06/08/92	Hora: 13:30 min	$T_{amb}: 19^{\circ} C$
Condições	Massa de gelo derretida (kg)	
	0.120	
c/ anteparo	0.115	
	0.119	
	0.187	
s/ anteparo	0.189	
	0.188	

$$m_{conv} = (1,97 \pm 0,04) \times 10^{-4} \text{ kg.s}^{-1}$$

$$m_t = (3,13 \pm 0,02) \times 10^{-4} \text{ kg.s}^{-1}$$

Nem toda a radiação incidente é absorvida pela crosta de gelo. Usando uma fotocélula para uma medida relativa da luz incidente sobre a camada de gelo e a fração desta que é refletida, estimou-se em cerca de $0,5 \pm 0,05$ a fração da luz incidente que é absorvida pelo gelo, em conformidade com os valores fornecidos na literatura⁽⁴⁾.

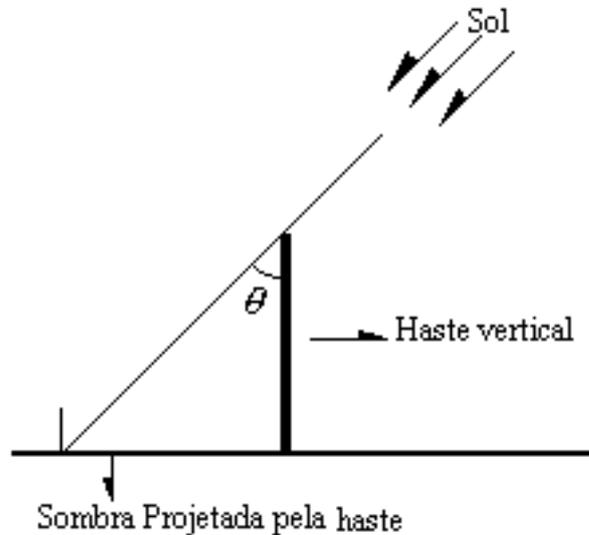


Fig.2- Haste vertical e esquema de medida do ângulo θ entre a direção de incidência dos raios solares e a vertical.

O balanço energético sobre a superfície de gelo leva à seguinte expressão:

$$f\phi \cos \theta = \frac{L}{A} (m_t - m_{conv}) \quad (1)$$

onde f é a fração de radiação incidente que é absorvida pela camada de gelo; ϕ , o fluxo de radiação total que atinge a superfície terrestre, em $W \cdot m^{-2}$; θ , o ângulo azimutal; A , a área da superfície exposta ao Sol; L , o calor latente de fusão do gelo; m_t , a taxa de fusão do gelo devido à troca de calor com o ar circundante e pela radiação solar direta e difusa, em $kg \cdot s^{-1}$; m_{conv} , a taxa de fusão de gelo devido à transferência de calor por convecção pelo ar, também em $kg \cdot s^{-1}$.

Substituindo na expressão acima os valores obtidos experimentalmente, e tomando $L = 33,5 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$ e $A = 0,145 \text{ m}^2$, chegamos a um valor para o fluxo de radiação solar por metro quadrado de superfície terrestre igual a:

$$\phi = 767 \pm 97 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$$

em boa concordância com os valores fornecidos na literatura para a latitude (29 S) e época do ano nas quais se realizou a experiência^(3, 4, 5).

Uma parte da radiação solar que chega ao nosso planeta é absorvida pelos gases da atmosfera, e o decréscimo na intensidade dessa radiação segue uma relação exponencial. O resultado obtido acima pode ser substituído na expressão (2), de modo a se obter o valor do fluxo de radiação solar por metro quadrado fora dos limites da atmosfera terrestre ϕ_o .

$$\frac{\phi_o}{\phi} = \exp(n a_{dm} m) \quad (2)$$

na qual n é o fator de opacidade do ar, a_{dm} o coeficiente de dispersão molecular e m a espessura relativa da massa de ar⁽⁴⁾.

Para uma atmosfera limpa, $n \cong 2$. A espessura relativa da massa de ar corresponde à secante do ângulo azimutal, $m = 1,429$. O coeficiente de dispersão molecular é calculado para o ar, à pressão atmosférica, através da relação⁽⁴⁾:

$$a_{dm} = 0,128 - 0,054 \log m.$$

Então, $a_{dm} = 0,12$, que conduz a

$$\phi_o = 1080 \pm 136 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}.$$

Dividindo $\phi_o / \cos \theta$, temos o valor do fluxo de radiação solar através de uma superfície de 1 m^2 orientada perpendicularmente à direção do fluxo, a uma distância de 1 UA do Sol, valor este conhecido como constante solar (ϕ^*)^(5,6,7), cujo resultado,

$$\phi^* = 1544 \pm 253 \text{ W.m}^{-2},$$

está 11% acima do valor aceito, 1369 W.m^{-2} .

IV. Comentários finais

A maior parte da incerteza quanto ao resultado final deve-se à estimativa do valor de f , de modo que devem ser tomadas certas precauções na sua determinação. A fração de radiação incidente absorvida pelo gelo também pode ser estimada usando-se valores para a taxa de incidência de radiação solar fornecidos por um pireliômetro, quando disponível.

Uma experiência semelhante a esta pode ser utilizada como elemento motivador para a introdução de alguns tópicos de astrofísica, como, por exemplo, a origem dessa tremenda energia proveniente do Sol.

A partir da estimativa $\phi^* = 1544 \pm 253 \text{ W.m}^{-2}$, um breve cálculo permite avaliar a potência emitida pelo Sol⁽⁸⁾, como segue:

$$P^* = 4 \pi R^2 \phi^*$$

na qual:

R é o raio médio da órbita terrestre (1 UA ou $1,49 \times 10^{11} \text{ m}$) e

$$P^* = 4,3 \times 10^{26} \text{ W}.$$

Desse total, cerca de 178.000 terawatts-ano chegam ao nosso planeta. Isto representa aproximadamente 15.000 vezes o atual consumo energético mundial⁽⁹⁾!

Considerando que essa energia é liberada a partir de reações termonucleares no interior do Sol, segundo nossos resultados, pode-se estimar, de $E = mc^2$, que cerca de 4,8 milhões de toneladas de matéria são convertidas em energia a cada segundo, na imensa fornalha solar!

Agradecimentos

Os autores agradecem ao estudante de Eng. Mecânica da Universidade de Caxias do Sul, Valdir de Bortoli, pelo auxílio prestado durante a realização destes experimentos.

Referências

1. BARTLETT, A. A. A large solar calorimeter. **Physics Teacher**, v. 24, n. 8, p. 484-487, 1986.

2. BASSO, D. **Desenvolvimento, construção e calibração de radiômetros para a medida da radiação solar**. 1980. Dissertação (Mestrado) – Escola de Engenharia, UFRGS, Porto Alegre.
3. GANIEL, U; KEDEM, O. Solar energy – How much do we receive? **Physics Teacher**, v. 21, n. 9, p. 573-575, 1983.
4. HOLMAN, J. P. **Transferência de calor**. São Paulo: McGraw-Hill, 1983.
5. DUFFIE, J. A.; BECKMAN, W. A. **Solar engineering of thermal processes**. New York: John Wiley & Sons, Inc., 1974.
6. BAKULIN, P. I.; KONONOVICH, E. V.; MOROZ, V. I. **Curso de astronomía general**. Moscou: Mir, 1987.
7. Handbook of chemistry and physics, 60a ed., CRC Press, Boca Raton, FL, 1979-1980.
8. DUPUY, D. L. Measuring solar luminosity with a photodiode. **American Journal of Physics**, v. 57, n. 9, p. 826-828, 1989.
9. DAVIS, G. R. Energía para el planeta Tierra. **Investigación y Ciencia**, n. 170, p. 105-113, 1990.