

Um tema negligenciado em textos de física geral: A vaporização da água



.....
Fernando Lang da Silveira

Instituto de Física, Universidade
Federal do Rio Grande do Sul, Porto
Alegre, RS, Brasil
E-mail: lang@if.ufrgs.br
.....

Introdução

Adúvida expressa a seguir, respondida no setor Pergunte ao Centro de Referência para o Ensino de Física¹ (CREF) do IF-UFRGS, é recorrente:

Sabemos que à pressão atmosférica, a água vaporiza na temperatura de 100 graus centígrados. Então por que a água da superfície de um lago vaporiza se está à temperatura ambiente? Grato! [1]

Esta dúvida tem sido reiterada nos últimos três anos, aparecendo em diversos outros questionamentos dirigidos ao sítio do CREF. A recorrência também está evidente no fato de que somente esta postagem conta já com mais de nove mil acessos. No momento em que este artigo estava sendo redigido, mais uma vez ela apareceu, desta vez expressa por um estudante de física da UFPE:

A água muda do estado líquido para o gasoso a 100 °C. Essa mudança pode ser por evaporação, ebulição ou calefação, certo? (supondo pressão constante). Mas quando a água de uma barragem, ou da roupa em um varal, evapora, eles não estão a 100 °C. Como isso se explica?

O perguntante, após a leitura da antiga postagem acima referida, agradeceu dizendo: “Obrigado! Meus conceitos é que estavam errados. Risos.”.

A razão de tal dúvida talvez se deva ao fato de que a vaporização da água (e de outras substâncias) é tratada de ma-

neira inadequada em livros texto de física, sejam de Ensino Médio, sejam de ensino superior, quando reduzem a passagem do estado líquido para o estado gasoso exclusivamente ao particular processo de ebulição.

É bem sabido que a vaporização, passagem da água do estado líquido para o estado gasoso (vapor), pode se dar por evaporação e por ebulição [2,3]. A evaporação acontece exclusivamente na interface do líquido com o gás externo (usualmente ar) e ocorre na temperatura ambiente desde que o ar não esteja saturado de vapor de água, isto é, que a umidade relativa do ar seja inferior a 100% [2,4]. A evaporação pode se dar em qualquer temperatura e por ser um efeito de superfície, depende da área de interface do líquido com o ar, acontecendo mais rapidamente conforme a temperatura se eleva e

A evaporação pode se dar em qualquer temperatura e por ser um efeito de superfície, depende da área de interface do líquido com o ar. A ebulição se caracteriza pela formação de bolhas de vapor no interior do líquido

se houver correntes de ar sobre a superfície.

A ebulição se caracteriza pela formação de bolhas de vapor no interior do líquido. A condição para tal é que a pressão de vapor saturado seja no mínimo igual à pressão total na região onde as bolhas ocorrem.

Um bem conhecido texto utilizado em disciplinas de física geral na universidade [5] é completamente omissivo em relação ao processo de evaporação. Em outros conhecidos livros-texto de Ensino Médio e ensino superior, excelentes em muitos aspectos, encontramos as seguintes afirmações equivocadas:

Toda a mudança de fase ocorre a determinada temperatura, para determinada pressão, independentemente do sentido

O tema da vaporização, especialmente a evaporação, tem sido abordado de forma negligente em muitos textos de física geral. Curvas reais de aquecimento da água, obtidas experimentalmente, são apresentadas e confrontadas com aquelas encontradas na literatura e em materiais da internet. Evidências de sublimação do gelo também são apresentadas.

da transformação. Assim, à pressão atmosférica normal, a água se solidifica (ou o gelo se funde) a $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ e se vaporiza (ou se liquefaz) a $100\text{ }^{\circ}\text{C}$. [6] (grifo nosso)

A temperatura em que um líquido evapora e se transforma em gás é o ponto de ebulição. [7]

Desta forma os dois textos afirmam peremptoriamente que a mudança do estado líquido para o gasoso ocorre somente por ebulição. Parecem desconhecer a possibilidade de vaporização em temperaturas inferiores a do ponto de ebulição, isto é, por evaporação. Em ambos os textos são apresentadas as curvas de aquecimento da água a 1 atm, semelhantes ao gráfico da Fig. 1, isto é, o gráfico da temperatura da água em função da energia a ela fornecida, indicando explicitamente que a vaporização acontece apenas no trecho DE. Em outro livro-texto de Ensino Médio [8], apesar de discutir a evaporação, também apresenta uma curva de aquecimento para a água com a indicação de que o vapor acontece apenas no trecho DF.

Uma pesquisa na Internet leva a muitas referências, inclusive em vídeo-aulas, onde se encontram a afirmação explícita de que, abaixo do ponto de ebulição, existem apenas o estado líquido e o estado sólido [9-12].

O verbete da Wikipédia sobre calor latente em português apresenta uma curva para a água semelhante à da Fig. 1 [13], indicando a existência de vapor somente a partir de $100\text{ }^{\circ}\text{C}$. Entretanto, no eixo das abscissas, ao invés de expressar a energia trocada com a substância, encontra-se como variável independente o tempo. Não há qualquer referência no texto sobre ser ou não constante a taxa de transferência de energia.

Portanto, fica bem caracterizado que o tema da vaporização tem sido tratado em muitos textos de física de forma no

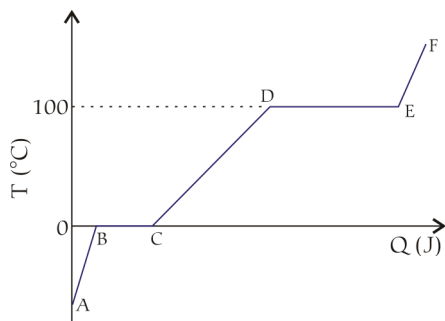


Figura 1: Curva de aquecimento da água.

mínimo negligente.

O objetivo deste artigo é o de apresentar evidências experimentais sobre o negligenciado tema da evaporação da água em curvas de aquecimento. Também serão apresentadas evidências de vaporização de água no estado sólido, isto é, de sublimação do gelo.

Experimentos de aquecimento da água

Uma lata de refrigerante com a parte superior aberta, colocada em um recipiente de isopor apropriado para a lata, foi usada como calorímetro. Na lata adicionou-se 290 g de água na temperatura ambiente (aproximadamente $16\text{ }^{\circ}\text{C}$). Com auxílio de um aquecedor elétrico, alimentado por um transformador variável (variac), de um amperímetro e de um voltímetro conectados ao aquecedor, de um termômetro digital, de um cronômetro e de uma balança, foram realizadas as medidas necessárias à construção de curvas de aquecimento da água.

Alimentando o aquecedor com o variac e determinando com auxílio do voltímetro e do amperímetro as medidas de tensão e corrente, respectivamente, pode-se estimar a potência elétrica dissipada pelo aquecedor em contato com a água. Cinco diferentes potências foram utilizadas.

Para cada potência de aquecimento mediu-se, em intervalos de tempo de um ou dois minutos, a temperatura da água no calorímetro. Antes de se iniciar e ao final do aquecimento, a massa total do calorímetro sem o aquecedor foi medida com o objetivo de verificar a perda de massa do líquido por evaporação.

A partir da potência elétrica e do intervalo de tempo em que esta potência se desenvolveu, pode-se obter facilmente a energia elétrica dissipada no aquecedor e transferida ao conteúdo do calorímetro. A esta energia está associada a temperatura registrada pelo termômetro no interior do calorímetro, registrada no eixo das ordenadas do gráfico apresentado na Fig. 2, em função da respectiva energia transferida ao calorímetro, para cinco diferentes potências. A linha contínua representa a temperatura do conteúdo do calorímetro calculada sob a suposição de que toda a energia transferida aqueça o conteúdo do calorímetro, sem perdas de energia para o entorno e sem evaporação. As massas evaporadas desde o início do aquecimento até o final também estão indicadas na figura.

Observa-se na Fig. 2 que, conforme diminui a potência do aquecedor, além de aumentar a massa evaporada, maiores são as diferenças entre os valores preditos pe-

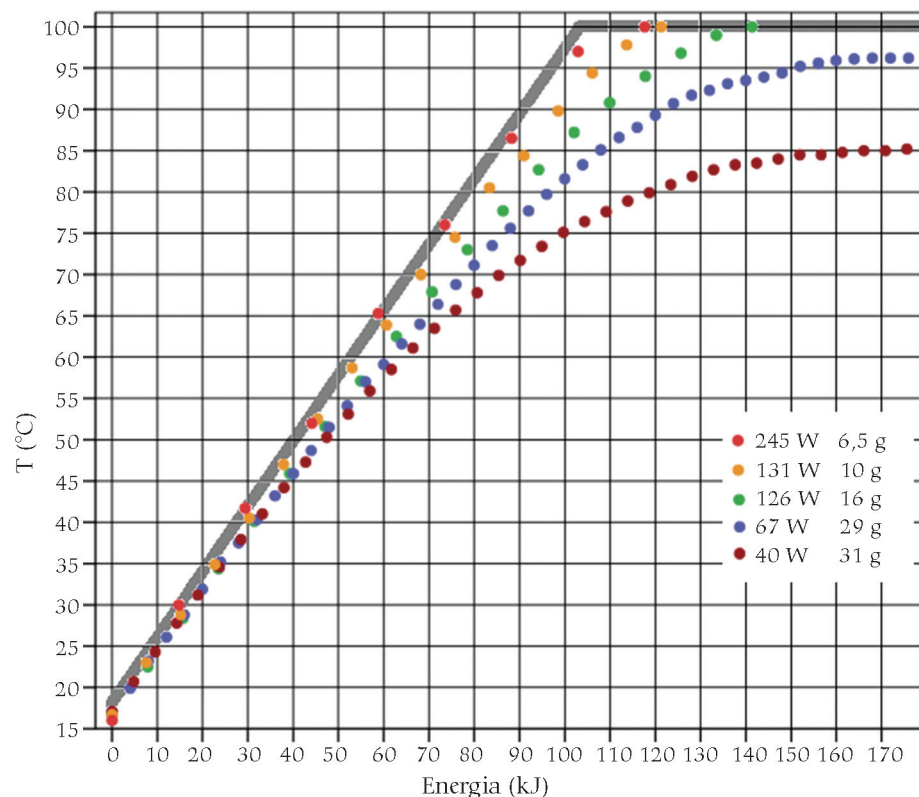


Figura 2: Curvas de aquecimento do conteúdo do calorímetro em função da energia elétrica dissipada no aquecedor, para cinco diferentes potências.

la linha contínua e os valores experimentais. O intervalo de tempo total em que o aquecedor esteve ligado é diferente para as diferentes potências, sendo em ordem decrescente da potência respectivamente 8 min, 16 min, 18 min, 44 min e 80 min. Nota-se também que, para as duas potências mais baixas, a temperatura se estabilizou em valores inferiores à do ponto de ebulição da água (96 °C e 85 °C), por causa das perdas de energia para o entorno, principalmente por evaporação.

Se toda a energia introduzida no calorímetro houvesse sido utilizada para elevar a temperatura da água até o seu ponto de ebulição, conforme está indicado pela linha contínua na Fig. 2, seriam necessários aproximadamente 102,6 kJ. De fato foram necessários para atingir 100 °C com as três maiores potências no aquecedor, 117,7 kJ, 121,3 kJ e 141,3 kJ respectivamente. A diferença entre a energia efetivamente necessária para levar o conteúdo do calorímetro à temperatura de ebulição da água e a energia de 102,6 kJ é em sua maior parte atribuída às perdas por evaporação conforme discute-se a seguir.

O calor de vaporização da água entre 16 °C e 100 °C é variável, situando-se respectivamente entre 2,45 kJ/g e 2,26 kJ/g [14]. Calculando a energia demandada para evaporar as massas de água nos três processos mais potentes, e usando-se como calor de vaporização o valor de 2,3 kJ/g, encontra-se respectivamente para as massas de 6,5 g, 10 g e 16 g, respectivamente, as energias 15 kJ, 23 kJ e 37 kJ. Ou seja, nos três casos esta quantidade de energia para evaporar explica a necessidade de um maior aporte energético do que o previsto pelo modelo usual, que desconsidera a evaporação, supondo erroneamente que a vaporização da água ocorra apenas por ebulição. É importante notar que, assim que a temperatura atingiu 100 °C, o aquecedor foi desligado e consequentemente a vaporização da água nos três casos aconteceu principalmente em temperaturas inferiores à do ponto de ebulição.

Nos dois processos de aquecimento que levaram a temperatura a se estabilizar em valores inferiores à do ponto de ebulição, as demandas energéticas apenas para evaporar a água foram maiores ainda (66,7 kJ e 71,3 kJ), perfazendo em ambos os casos 38% da energia total liberada pelo aquecedor.

Desta forma, fica evidente que a vaporização da água não somente acontece

em temperaturas inferiores à do ponto de ebulição (se assim não fosse, as roupas molhadas jamais secariam quando penduradas em um varal) como também as demandas energéticas devido à evaporação podem ser importantes, acarretando inclusive que a temperatura de ebulição não seja atingida apesar do aporte energético do aquecedor.

Evidências de vaporização do gelo

Gelo vaporiza! Isto é, gelo sublima! Uma evidência de que a água sólida sublima é encontrada em bandejas de gelo, em freezers que operam em temperaturas inferiores ao do ponto de solidificação da água. A Fig. 3 representa a massa de água em uma bandeja de gelo em um freezer na temperatura de aproximadamente -18 °C,

ao longo de pouco mais de 5 meses de observação. Inicialmente foi colocada na bandeja cerca de 390 g de água. Em poucas horas ocorreu o congelamento e depois, de tempos em tempos, a

bandeja era rapidamente retirada do freezer para a medida de sua massa. Desta forma pode-se acompanhar a lenta perda de

Gelo sublima. Uma evidência de que a água sólida sublima é encontrada em bandejas de gelo, em freezers que operam em temperaturas inferiores ao do ponto de solidificação da água

massa na bandeja, constatando-se que em 158 dias não mais restava gelo no recipiente. Outro experimento sobre a vaporização do gelo se encontra na postagem *É verdade que gelo vaporiza?* [15].

Outra evidência da sublimação do gelo é encontrada em embalagens hermeticamente fechadas em um freezer. Em um pote com tampa hermética foi colocada no freezer uma certa porção de carne moída e cozida. Algumas horas depois, o pote foi retirado do freezer, removida a tampa e realizada a foto 1 da Fig. 4. Toda a massa de alimento no pote já estava sólida na temperatura de cerca de -18 °C, conforme se pode perceber na fotografia. O pote foi fechado hermeticamente e por precaução ainda colocado em um saco plástico lacrado.

Cerca de dois meses se passaram para a realização da foto 2 da Fig. 4. Conforme se observa, apareceu junto à parte interna da tampa do pote uma camada de gelo. Dado que o pote se encontrava hermeticamente fechado, este gelo se originou por sublimação da água do alimento, após o congelamento, e posterior cristalização na tampa.

Conclusão

A vaporização da água é, por razões óbvias, um assunto com inúmeras apli-

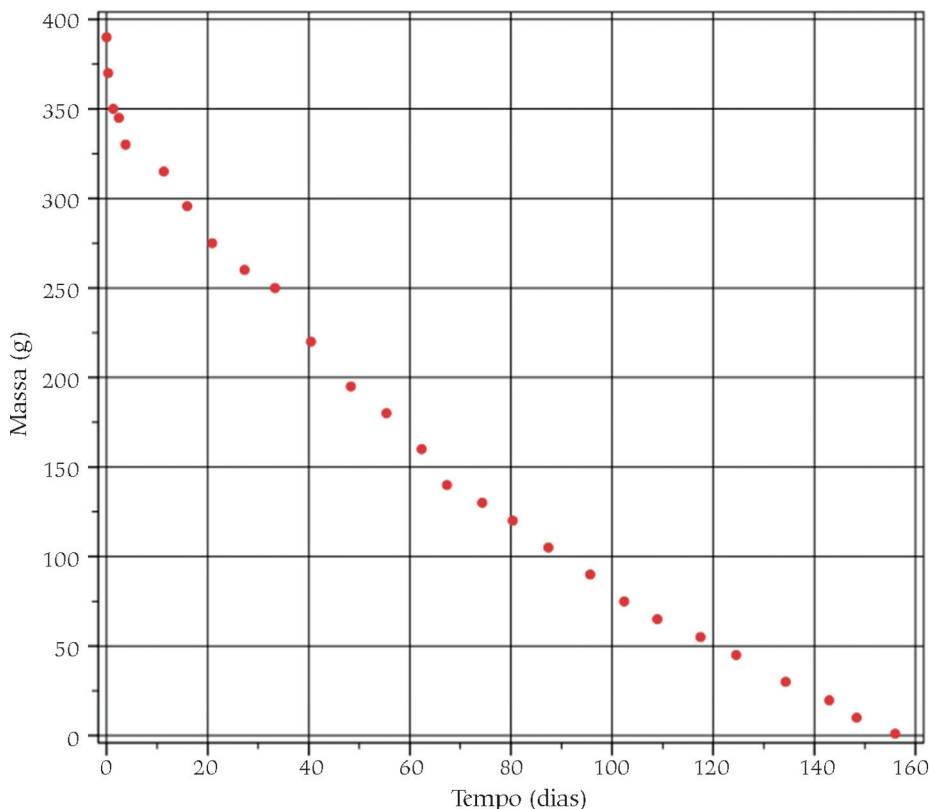


Figura 3: Massa de gelo em uma bandeja em um freezer ao longo de 158 dias.

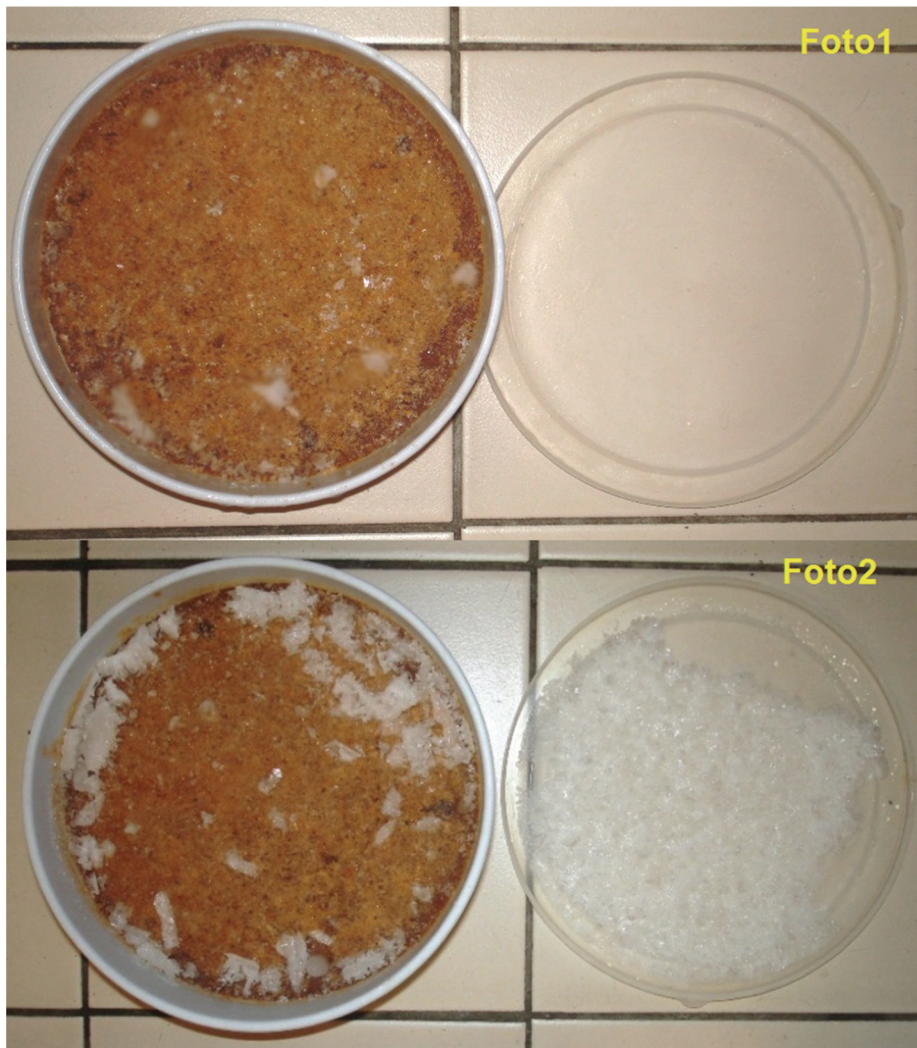


Figura 4: Aparência do interior de um pote com alimento congelado, algumas horas após o congelamento e dois meses depois.

cações práticas. O desleixo com o qual o tema tem sido abordado em muitos textos de física geral, inclusive em livros que sob outros aspectos são muito bons, talvez explique as dificuldades que reiteradamente são apresentadas no CREF em relação à vaporização. As dúvidas sobre o tema manifestadas por professores são muitas; à guisa de exemplo indica-se especialmente a postagem com o título de *Sobre água no ar*² [16].

Qualquer texto que aborde a vaporização não deve cometer o equívoco de reduzir tal processo à ebulição, como costuma acontecer. Mesmo que a evaporação não seja tratada em detalhes, é obrigatória uma referência a este processo e no mínimo a sua caracterização macroscópica deve ser feita, bem como uma menção explícita de que ela está sendo desprezada na representação usual de curvas de aquecimento da água. A explicação microscópica, evitada também neste artigo, envolve conhecimentos de termodinâmica usualmente não desenvolvidos em textos de física geral.

Agradecimento

Agradeço à professora Maria Cristina Varriale (IM-UFRGS) pela leitura crítica e sugestões.

Nota

¹<http://www.if.ufrgs.br/cref/?area=normas>.

Referências

- [1] Termodinâmica: vaporização da água, disponível em <http://www.if.ufrgs.br/cref/?area=questions&id=107> (acessado em 18/07/2016).
- [2] A.P. Maiztegui e J.A. Sabato, *Introducción a la Física* (Ed. Kapeluz, Buenos Aires, 1974). Disponível em http://pt.slideshare.net/Zulema_964/maiztegui-sabatointroduccion-a-la-fisica-i, acessado em 18/7/2016.
- [3] Diferencie ebulição de evaporação!, disponível em <http://www.if.ufrgs.br/cref/?area=questions&id=261>, acessado em 18/7/2016.
- [4] Umidade relativa: o que é e como se determina, disponível em <http://www.if.ufrgs.br/cref/?area=questions&id=711>, acessado em 18/7/2016.
- [5] D. Halliday, R. Resnick e J. Walker, *Fundamentos de Física* (LTC, Rio de Janeiro, 2009).
- [6] A. Gaspar, *Compreendendo a Física - Vol. 2* (Attica, São Paulo, 2011), p. 352.
- [7] W. Bauer, G.D. Westfall e H. Dias, *Física para Universitários: Relatividade, Oscilações, Onda e Calor* (AMGH, Porto Alegre, 2013), p. 182.
- [8] M. Pietrocola, A. Pogbin, R. Andrade e T.R. Romero, *Física em Contextos - Vol. 2* (FTD, São Paulo, 2011), p. 240.
- [9] http://mundoeducacao.bol.uol.com.br/upload/conteudo_legenda/Od2a577d0f90b8b05dc0738a70d930ad.jpg, acessado em 18/7/2016.
- [10] <http://emuc2014.blogspot.com.br/2014/02/graficos-mudanca-de-estado-fisico.html>, acessado em 18/7/2016.
- [11] https://www.youtube.com/watch?v=Yk8ZMi5_ZPk, acessado em 18/7/2016.
- [12] <https://www.youtube.com/watch?v=FFdCotqzA-Y>, acessado em 18/7/2016.
- [13] https://pt.wikipedia.org/wiki/Calor_latente#/media/File:MFJ2.JPG, acessado em 18/7/2016.
- [14] N.I. Kochkin e M.G. Chirkévitch, *Prontuário de Física Elementar* (MIR, Moscou, 1982).
- [15] É verdade que gelo vaporiza?, disponível em <http://www.if.ufrgs.br/cref/?area=questions&id=1624>, acessado em 18/7/2016.
- [16] Sobre a água no ar, disponível em <http://www.if.ufrgs.br/cref/?area=questions&id=1597>, acessado em 18/7/2016.