

Levando água à ebulição à temperatura ambiente?⁺*

Francisco Catelli

Mestrado Profissional em Ensino de Ciências e Matemática
Universidade de Caxias do Sul

Rodrigo Barbieri

Laboratório de Física – Universidade de Caxias do Sul

Vânia Elisabete Schneider

Mestrado Profissional em Ensino de Ciências e Matemática
ISAM – Instituto de Saneamento Ambiental

Universidade de Caxias do Sul

Caxias do Sul – RS

Resumo

É apresentado um procedimento experimental, de custo reduzido, no qual a ebulição da água à temperatura ambiente é evidenciada. Este procedimento envolve a introdução de água no interior de uma lâmpada fluorescente fora de uso, por meio de técnicas já descritas na literatura, e retomadas neste trabalho. Além da observação da ebulição à temperatura ambiente, a determinação da pressão interna de lâmpadas fluorescentes pode ser obtida experimentalmente de maneira consistente, através do uso de água de torneira posta previamente em ebulição, o que leva à eliminação das impurezas gasosas nela dissolvidas; é sugerida também uma técnica para tornar mais acurada a determinação do volume livre de água da lâmpada. Alguns cuidados para reduzir a níveis mínimos a contaminação por ocasião da execução deste procedimento em ambiente escolar são descritos.

⁺ Boiling water at room temperature?

^{*} *Recebido: fevereiro de 2014.
Aceito: junho de 2014.*

Palavras-chave: *Pressão de ebulição. Lei de Boyle. Pressão interna de lâmpadas fluorescentes.*

Abstract

A reduced cost experimental procedure, in which the boiling point of water at room temperature is obtained, is presented. This procedure involves the introduction of water inside a fluorescent lamp discarded by techniques already described in the literature and included in this study. In addition to the observation of the room temperature boiling, the internal pressure of fluorescent lamps can be experimentally consistently obtained through the use of tap water previously boiled, which leads to the elimination of gaseous impurities dissolved therein; it is also suggested a technique to make more accurate the determination of the volume occupied by gases in the lamp. Steps to reduce to a minimum level of contamination when performing this procedure in a school environment are described.

Keywords: *Pressure. Boiling point. Boyle's Law. Internal pressure of fluorescent lamps.*

I. Introdução

Sabe-se que a temperatura de ebulição da água depende da pressão (GREF, 1991, p. 48). Por conta deste fato, surgem esporadicamente afirmações curiosas como a de que se pode tomar chá em ebulição, na condição de fazê-lo em montanhas muito altas (na região do Tibete, por exemplo). Há relatos (na literatura não técnica) de exploradores que realizavam estimativas de altitudes a partir desta propriedade (BALF, 2002, p. 62) "*Termômetros escondidos registravam a temperatura da água do chá, o que permitia a posterior identificação das altitudes*".

Tais relatos sem dúvida colorem as aulas. Uma possibilidade ainda mais empolgante seria a de presenciar uma ebulição a baixa pressão (ver, por exemplo, a montagem experimental apresentada na Fig. 4).

Numa temperatura de 20°C, por exemplo, a água entraria em ebulição se a pressão fosse igual ou menor que 2,3 kPa (aproximadamente 17 mm Hg, GREF, op. cit.) Como regra, as escolas não dispõem de sistemas de produção de vácuo, tais como bombas e câmpulas; neste trabalho é explorada, então, uma alternativa

de baixo (na verdade, nenhum) custo: trata-se de uma extensão de um problema experimental proposto por Lange (1979, problema 27), que consiste em determinar a pressão no interior de uma lâmpada de bulbo. Vanelli e Delai (1989) e posteriormente Laburú e Silva (2004, p. 134-142) determinam essa pressão para uma lâmpada fluorescente de vapor de mercúrio. Nesses dois trabalhos sugere-se abrir uma das extremidades da lâmpada fluorescente fora de uso ("queimada"), previamente mergulhada em água; mais de 98% do volume interno da lâmpada é então rapidamente ocupado pelo líquido. Mas, um efeito não mencionado nas referências acima é o da ebulição da água à temperatura ambiente, efeito esse que será evidenciado mais adiante nesse trabalho.

A sequência está estruturada da seguinte forma: inicialmente, variações de técnicas apresentadas na literatura (LABURÚ; SILVA, op. cit.) para a abertura do lacre de uma lâmpada fluorescente são apresentadas no item "procedimento experimental". Em seguida, a fundamentação teórica que dá conta do cálculo (simplificado) da pressão interna da lâmpada é estabelecida na chamada "técnica experimental 1"; resultados preliminares são então obtidos. Esses resultados indicam pressões internas para uma lâmpada fluorescente significativamente maiores do que aqueles fornecidos pelos fabricantes. A seguir, um primeiro refinamento é sugerido ("técnica experimental 2"), considerando a altura da coluna de água no interior da lâmpada; os resultados para a pressão interna ainda são discrepantes em relação aos fornecidos na literatura. Refinamentos adicionais da técnica experimental (o cálculo mais acurado do volume final ocupado pelo gás e a eliminação parcial das impurezas gasosas contidas na água de torneira) levarão a valores de pressões interna das lâmpadas florescentes consistentes com os fornecidos na literatura; essa é a "técnica experimental 3". Por fim, o aspecto mais original desse trabalho (em relação à literatura referenciada) é apresentado, e consiste na colocação em evidência da ebulição da água à temperatura ambiente através de recursos alternativos: água é introduzida numa região de baixa pressão – o interior de uma lâmpada fluorescente – e a ebulição pode então ser observada, à temperatura ambiente.

II. Procedimento experimental

Para a abertura da extremidade da lâmpada fluorescente, retomaremos aqui a técnica de Laburu e Silva (2004) com uma variação, de modo a permitir um maior controle da entrada da água na lâmpada. Uma maneira segura (do ponto de vista da liberação de poluentes para o ambiente) de abrir uma das extremidades da lâmpada, previamente mergulhada na água de uma bacia (Fig. 1, 2 e 3) é a de, em

primeiro lugar, expor o lacre de uma de suas extremidades, como pode ser visto na imagem da direita da Fig. 3.

A seguir, a extremidade deste lacre (que aparece escurecida na foto) é presa com os bicos finos de um alicate. Essa extremidade da lâmpada, o alicate e a mão são, então, introduzidos na água contida em uma bacia grande, como na Fig. 3 (esquerda). A extremidade da lâmpada deve inicialmente ser colocada num ângulo rasante em relação à água, de modo a evitar que algum ar fique aprisionado na reentrância da extremidade exposta. A lâmpada é em seguida posicionada na posição (aproximadamente) vertical e o lacre é quebrado, apertando os mordentes do alicate.

A água entrará pela abertura do lacre quebrado e subirá pela lâmpada, por efeito da pressão baixa que existe no interior da lâmpada; o processo de enchê-la é razoavelmente lento, da ordem de uns 30 segundos. Marque (use uma etiqueta de papel autocolante, ou uma caneta que escreva no vidro) até qual altura a água subiu; para retirar a água, basta quebrar o lacre da extremidade superior, da mesma forma descrita acima, mantendo a lâmpada na posição vertical. Com isso, a probabilidade de liberar algum mercúrio metálico junto com a água descartada diminui bastante, visto que este tende a se depositar na extremidade inferior interna, recurvada, da lâmpada. Por fim, as extremidades da lâmpada devem ser secas e lacradas cuidadosamente com fita adesiva. A lâmpada está pronta para o descarte, o qual deve ser feito segundo as normas de sua região (Ver Anexo 1).

Tanto Vanelli e Delai (1989), quanto Laburu e Silva (2004) sugerem formas bastante práticas para o cálculo da pressão interna da lâmpada. São sugeridas aqui três técnicas experimentais mais ou menos equivalentes, mas de graus de complexidade crescentes.

Dependendo dos objetivos e tempo disponível, o professor leitor que decidir integrar essa atividade às suas aulas poderá optar pela “técnica experimental 1”, a mais simples, a qual é descrita a seguir, com a inclusão (ou não) da correção devida à altura da coluna de água (essa correção configuraria a “técnica experimental 2”).

Se um cálculo da pressão interna da lâmpada fluorescente, mais acurado e consistente com os dados da literatura, for almejado, então a medição mais cuidadosa do volume e a eliminação parcial das impurezas gasosas (técnica experimental 3) deverá ser considerada.

A ebulição da água à temperatura ambiente, abordada na parte final dessa sequência, é, sem dúvida, o aspecto mais original desse trabalho, e pode ser destacada conjuntamente com qualquer uma das três técnicas experimentais acima referidas.

II.1 Técnica experimental 1: Cálculo simplificado da pressão interna da lâmpada fluorescente

Na Fig. 2-a, h_0 é a altura da lâmpada vazia, antes de ser preenchida por água, e p_0 é a pressão interna da lâmpada, que se quer determinar (VANELLI; DELAI, 1989).

Na Fig. 2-b, h_1 é a altura da lâmpada não preenchida por água, após o lacre ter sido rompido; p_1 é a pressão dos gases aí confinados, a qual será tomada como aproximadamente igual à pressão atmosférica do local. (Na técnica experimental 2, essa pressão será corrigida por um fator que é da ordem de 9/10 da pressão atmosférica local).

A lei de Boyle é empregada para o cálculo de p_0 (o produto pV pode ser considerado constante, dado que a temperatura não varia de forma significativa):

$$p_0V_0 = p_1V_1 \quad (1),$$

ou

$$p_0Ah_0 = p_1Ah_1. \quad (2)$$

Então,

$$p_0 = p_1 \frac{h_1}{h_0}. \quad (3)$$

Em uma das medidas efetuadas, foram obtidos os valores $h_0 = 118$ cm e $h_1 = 1,7$ cm (ver Fig. 3, foto da esquerda).

Para uma pressão de 689 mm Hg (Caxias do Sul, RS), chega-se a um valor de p_0 de aproximadamente 9,9 mm Hg.

Dado que há diversas aproximações não controladas nessa versão (e também na versão 2, a seguir) não foram apresentadas as incertezas nas medições¹. Na técnica experimental 3 há maior controle, e as incertezas são, então, apresentadas.

¹ A título de exemplo: a suposição que a lâmpada é um cilindro perfeito é razoável quando todo o volume dela é considerado; já na situação em que ela está parcialmente cheia de água, o volume remanescente é consideravelmente menor, e o fato de uma das "tampas" do cilindro assim formado não ser plana introduz um erro significativo. Essa questão é levada em conta na versão 3; ver também a imagem à direita na Fig. 1.



Fig. 1 – À esquerda: quebrando o lacre da extremidade da lâmpada, sob a água. O lacre é o tubo central, com a extremidade mais escura, que aparece na imagem da direita.

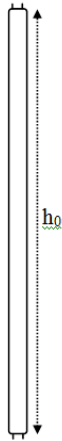


Fig. 2-a

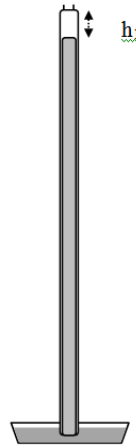


Fig. 2-b

Fig. 2-a – Lâmpada, antes da abertura do lacre. Sua área de secção reta é “A”, e sua altura, h_0 ; seu volume interno será então igual a $h_0 \times A$. Fig. 2-b – Lâmpada, após ter tido o seu lacre rompido dentro d’água. A nova altura do espaço da lâmpada não preenchido por água é h_1 .

II.2 Técnica experimental 2: cálculo da pressão interna da lâmpada fluorescente levando em conta a pressão devida à coluna de água

A pressão p_1 , após a água ter sido introduzida, é de fato um pouco menor do que os 9,9 mm Hg calculados anteriormente, devido à coluna d'água no interior da lâmpada. Essa água tenderia, se saísse, a diminuir a pressão p_1 dos gases confinados na parte superior da lâmpada, antes tomada como a pressão atmosférica do local. Para corrigir o valor dessa pressão, basta levar em conta que a altura de uma coluna d'água de 10,34 m (aproximadamente²) produz na sua parte inferior uma pressão de 1 atm, ou 760 mm Hg.



Fig. 3 – Na imagem à esquerda a água colorida (água da torneira com corante alimentar adicionado) subiu de tal modo que aproximadamente 1,8 cm de altura na extremidade superior ficaram livres de água. Na imagem da direita, a água, também da torneira (também com corante adicionado), mas previamente colocada em ebulição por cerca de 30 minutos, sobe mais: apenas cerca de 1 cm da parte superior ficam livres de água. Esse volume deve ser medido diretamente, conforme descrito a seguir, na “técnica experimental 3”.

² Considere a pressão atmosférica igual a $1,013 \times 10^5$ Pa, a massa específica ρ da água igual a 1000 kg/m^3 , a gravidade igual a $9,8 \text{ m/s}^2$ e obtenha h (em metros) a partir da expressão $p = \rho gh$.

Tomando aproximadamente 112 cm da coluna d'água (já descontada a parte que está imersa no recipiente) encontramos que a pressão devida a ela é $(112 \text{ cm} \times 760 \text{ mm Hg})/1034 \text{ cm} = 82,3 \text{ mm Hg}$.

Fazendo a pressão p_1 igual a $(689 - 82,3) \text{ mm Hg}$ e recalculando por meio da expressão 3, chega-se a uma pressão p_0 de 8,7 mm Hg, aproximadamente.

Fabricantes e entidades governamentais³ de controle dos descartes de lâmpadas apontam como pressão típica no interior dessas o valor de 2,5 mm Hg, sensivelmente menor que os 8,7 mm Hg, obtidos acima; a pressão medida é mais de três vezes maior do que a especificada na literatura (nota de rodapé 6).

Uma hipótese para explicar essa diferença é a de que impurezas gasosas dissolvidas na água que penetra na lâmpada são acrescidas ao gás que lá estava previamente. Então, para verificar essa hipótese, seria necessário eliminar, pelo menos em boa parte, essas impurezas; isso pode ser feito facilmente fervendo a água por um tempo longo⁴, permitindo assim que as bolhas contendo as impurezas gasosas dissolvidas na água (de torneira) sejam expulsas.

Além dessas impurezas gasosas dissolvidas na água que penetra na lâmpada, é necessário retomar o cálculo do volume V_1 : supor a lâmpada como sendo um cilindro não produz resultados acurados, dado que uma das "tampas" desse cilindro está longe de ser plana (a outra "tampa" é a superfície da água, essa sim, razoavelmente plana). Essas hipóteses levam então à versão 3 do experimento.

³ Ver, por exemplo, <<http://alkimia.tripod.com/lampadas.htm>> ou <<http://www.epa.gov/ttn/catc/dir1/mercury.txt>>.

⁴ Cabe um comentário a respeito do processo de levar a água à ebulição: para evitar que gases sejam novamente retidos pela água após a ebulição, convém evitar ao máximo movimentá-la. Então, a ebulição (efetuada por meio de um ebulidor de imersão, por exemplo) deve ser realizada no mesmo recipiente no qual será posteriormente introduzida a lâmpada, preferencialmente sem movimentá-lo do lugar onde a ebulição foi realizada. (Um alerta de segurança: durante a ebulição, o ebulidor não deve nunca tocar o fundo e as paredes do recipiente. Uma maneira prática de garantir isso é prender o cabo isolado do ebulidor com uma pinça (como as usadas para prender tubos de ensaio), acoplada a um tripé). Não há necessidade de adicionar corante; isso foi feito na figura 3 para destacar o nível de água na foto. Caso ele seja adicionado, isso deve ser feito antes de colocar a água em ebulição (se for colocado depois, a agitação feita para dissolvê-lo pode acrescentar novamente algumas impurezas gasosas à água).

II.3 Técnica experimental 3: refinamento da medida do volume de gás remanescente, eliminação parcial das impurezas gasosas da água

Então, como argumentado acima, há pelo menos duas fontes de "contaminação" dos resultados obtidos até aqui. Uma delas é a que se refere ao fato de o interior da lâmpada ser tomado aproximadamente como um cilindro, o que introduz erros bastante significativos ao estimar o volume livre de água V_1 da lâmpada, e isso se deve ao fato de a "tampa" superior do cilindro imaginário de altura h_1 (Fig. 2-b) não ser plana. As extremidades da lâmpada (ver Fig. 3) possuem uma reentrância e no centro, uma espécie de pequeno tubo, ao qual chamamos de "lacre". A água previamente fervida sobe num nível tal que atinge a reentrância, tornando necessária a medida direta do volume. Essa medida direta será descrita mais abaixo.

A segunda fonte de contaminação dos resultados, também já referida acima, diz respeito à eventual presença de gases dissolvidos na água (da torneira) que é sugada pela lâmpada. E, de fato, essa hipótese é confirmada: o volume da lâmpada não preenchido com água (dessa vez, previamente fervida) diminuiu consideravelmente (ver novamente a Fig. 3, à direita).

A medição direta do volume V_1 pode ser efetuada da seguinte maneira: após ter marcado o nível até o qual a água subiu, quebra-se o lacre da parte superior com o alicate, o que libera a água para sair pela abertura inferior. Após ter retirado cuidadosamente toda a água da lâmpada, tape o orifício pelo qual o ar entrou com massa de modelar; posicione agora a lâmpada na vertical, com o orifício tapado na parte inferior. Com uma pipeta, coloque água pela abertura superior até a marca do nível que a água atingiu ao penetrar na lâmpada, controlando a quantidade introduzida. O volume assim determinado fica em torno de 5 ml.

Na tabela 1, são listados os dados de uma dessas medições, a uma temperatura ambiente de 22 °C; o resultado indica uma pressão de $(2,8 \pm 0,4)$ mm Hg, valor consistente com o informado pelos fabricantes (2,5 mm Hg, nota de rodapé 6).

Tabela 1 – Pressão interna de uma lâmpada, calculada a partir do procedimento descrito na técnica experimental 3 (volume V_1 medido diretamente e eliminação parcial dos gases dissolvidos na água por meio de uma longa ebulição prévia), e através da equação 1. A pressão devida à coluna de água também foi devidamente levada em conta, como descrito na versão 2. Φ é o diâmetro interno da lâmpada, em mm, h_0 é a altura da lâmpada, em cm, h_1 é a altura da lâmpada não preenchida com água, também em cm, V_1 é o volume livre da lâmpada após a água ter penetrado e p_1 é a pressão interna da lâmpada, em mmHg.

Φ (mm)	h_0 (cm)	h_1 (cm)	V_1 (mL)	p_1 (mmHg)
37,7±0,3	118,2±0,4	117,4±0,3	5,5±0,5	2,8±0,4

III. Ebulição da água à temperatura ambiente

Como mencionado na introdução, a água pode entrar em ebulição à temperatura ambiente (20 °C) se a pressão for menor que 17 mm Hg⁵. Na Fig. 4, uma montagem envolvendo bomba de vácuo, dispositivos de medição e campânula revela (imagem inferior) a presença de bolhas num copo de becker contendo água a 21,4 °C, submetida a uma pressão inferior a 4 mm Hg (veja a legenda da figura para maiores detalhes).

Do ponto de vista do ensino médio, que é a perspectiva na qual esse trabalho foi elaborado, tais dispositivos (bombas de vácuo, medidores de pressão, sistemas de vácuo) quase nunca estão disponíveis. Mas, conforme esse trabalho pretende estabelecer, essa ebulição à temperatura ambiente pode ser verificada sem o concurso de tais dispositivos. Em qualquer uma das três técnicas experimentais descritas acima, pressões inferiores a 17 mm Hg são determinadas. Então, a água deveria entrar em ebulição à temperatura ambiente, e isso de fato ocorre! Sempre que o lacre é quebrado, podem ser notadas bolhas no interior da água que penetra na lâmpada, durante boa parte do processo. Essas bolhas (Fig. 5), em conjunto com a teorização feita, constituem evidências da ebulição da água, à temperatura ambiente.

⁵ Trata-se aqui de uma transição de fase, uma passagem da fase líquida para a fase de vapor, e isso ocorre quando a pressão de vapor da amostra supera a pressão externa. Para o leitor que se interessa por uma abordagem mais aprofundada do que a usualmente apresentada no ensino médio sugere-se, por exemplo, Glasstone (1978).

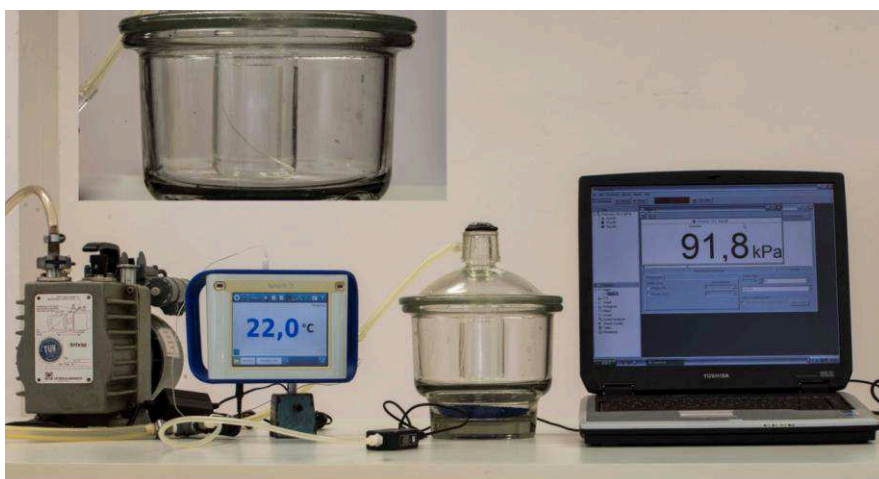


Fig. 4 – Na parte superior da foto é mostrado um sistema de vácuo, no qual uma bomba está ligada a um dissecador, dentro do qual foi colocado um becker com água da torneira; a temperatura e a pressão (atmosférica, do ambiente) são monitoradas. A imagem aumentada mostra uma ampliação do becker; não se notam bolhas na água. Na figura inferior, a bomba de vácuo foi ligada, e a pressão reduzida a um valor inferior a 0,5 kPa (ou pouco menos de 4 mmHg; esse seria o menor valor de pressão detectável pelo instrumento empregado); note (na imagem ampliada do dissecador) a formação das borbulhas, atestando a ebulição da água a 21,4 °C.

Cabe aqui uma palavra a respeito das bolhas e da ebulição da água. Kikoin e Kikoin (1976, p. 351) definem “ebulição” como sendo “[...] o processo de vaporização de um líquido obtido pela rápida formação e crescimento de bolhas de vapor que se rompem para o exterior na superfície do líquido”⁶.

Os autores citados acrescentam que o surgimento de bolhas de vapor no interior de água pura (a 100 °C, nas CNTp) é possível, mas é bastante improvável que elas cresçam, e o fenômeno da ebulição (formação de bolhas) não se observa.

Entretanto, a situação muda se existir ar (ou outro gás) dissolvido na água e (ou) adsorvido nas paredes do recipiente. Nesse caso, as bolhas de vapor se formam e crescem, de forma bem visível, como pode ser visto na imagem inferior das Fig. 4 e 5.

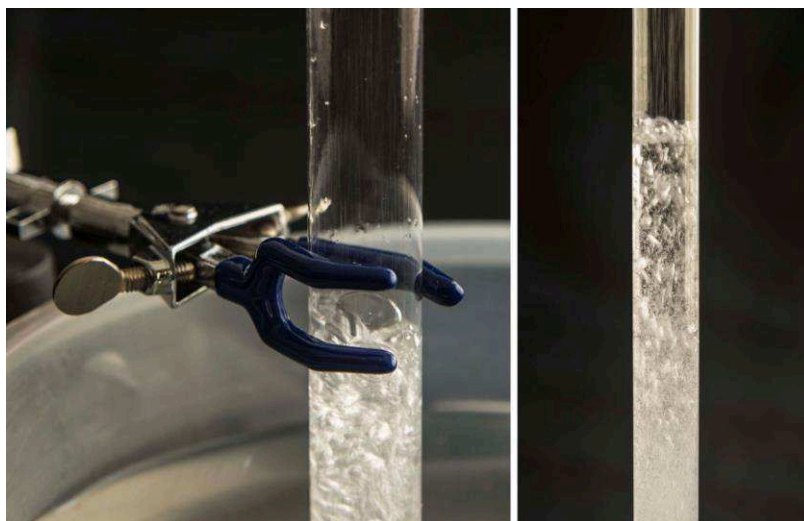


Fig. 5 – Na imagem à esquerda, percebe-se a turbulência da água que penetra na lâmpada, provocada em boa parte pela abundante formação de bolhas. Na imagem da direita, as borbulhas continuam claramente visíveis, mesmo após a água ter ocupado uma parte significativa do volume da lâmpada: em ambas as imagens, a água está em ebulição, à temperatura ambiente. A lâmpada empregada nessas fotos não possui recobrimento interno (é conhecida no comércio como "lâmpada germicida"), o que permite a obtenção de imagens mais claras das bolhas.

⁶“By boiling is meant the process of vaporization of a liquid attended by the rapid formation and growth of vapour bubbles that break outward through the surface of the liquid”.

IV. Conclusão

Em função do exposto acima, pode-se afirmar que a água, ao penetrar no interior da lâmpada fluorescente, de fato entra em ebulição à temperatura ambiente, e essa afirmação é feita com base nas borbulhas observadas; esse é o dividendo mais empolgante da execução desse procedimento em sala de aula. Como dividendo derivado pode-se mencionar também o procedimento de retirar os gases dissolvidos na água através de uma longa fervura, o que faz a água subir no interior da lâmpada a uma altura ainda maior; a medida das pressões passa então a ser consistente com os dados fornecidos pelos fabricantes. Convém notar que o valor de 2,5 mm Hg para a pressão interna de uma lâmpada fluorescente, especificado na nota de rodapé 6, é um valor típico; fabricantes diferentes poderão eventualmente produzir lâmpadas fluorescentes com pressões internas também diferentes. De qualquer modo, o objetivo foi atingido, a saber, o controle dos gases dissolvidos na água que penetra na lâmpada e o cálculo mais acurado do volume V_1 levam a valores de pressão interna muito mais próximos dos esperados. (Compare os 8,5 mm Hg obtidos com a técnica 2 com os $(2,8 \pm 0,4)$ mm Hg da técnica 3, e esses dois valores com o especificado pelos fabricantes, 2,5 mm Hg).

Mas, talvez, o dividendo maior seja a motivação dos alunos: quando o professor destaca que as bolhas observadas indicam a ebulição, alguns deles pedem para tocar na lâmpada, para "ver se ela está quente". Esta reação é perfeitamente explicável a partir do fato de que, no cotidiano, a ebulição da água está sempre associada a temperaturas elevadas, da ordem de 100 °C.

Há, entretanto, cuidados adicionais que devem ser respeitados. O primeiro cuidado, bastante óbvio, é o que diz respeito ao manuseio de objetos de vidro, como a lâmpada. O segundo cuidado diz respeito aos poluentes gerados no manuseio de tais lâmpadas. As lâmpadas fluorescentes de mercúrio (o nome diz!) contêm diversos poluentes potenciais, entre eles o mercúrio metálico. Então, fica uma última pergunta: como controlar e reduzir a níveis aceitáveis a poluição gerada pela abertura da lâmpada, tal como descrito nas referências, em sala de aula? O que são estes "níveis aceitáveis"? Para responder a essa questão é necessária uma análise química da água retirada do interior da lâmpada; os resultados de uma dessas análises, feita com a água retirada de uma lâmpada na qual foi executado um dos procedimentos descritos, é apresentado no Anexo 1. Dessa análise, e de uma consulta às normas, depreende-se que esses níveis são de fato aceitáveis, desde que o experimento seja realizado com os cuidados descritos nesse trabalho.

Agradecimentos

Os autores agradecem a empresa EMPALUX pelo fornecimento de um endereço eletrônico contendo dados técnicos da pressão interna de lâmpadas fluorescentes tubulares; ao laboratório de Química da Universidade de Caxias do Sul (LQUI) pelo empréstimo do dissecador e ao Instituto de Saneamento e Meio Ambiente (ISAM), também da Universidade de Caxias do Sul, pelas análises de determinação de metais pesados. Os autores agradecem também aos revisores do CBEF pelas valiosas contribuições.

Bibliografia

ABNT NBR 10004. Resíduos Sólidos – Classificação. Revisão 2004. Rio de Janeiro, 2004.

ATKINS, W.; PAULA, J. de **Physical – Chemistry**. 9. ed. Oxford: Oxford University Press, XXXII, 2010. 972 p.

BALF, T. **O último rio**. São Paulo: Manole, 2002.

BRASIL. Conselho Nacional de Meio Ambiente (CONAMA). Resolução N° 357, de 17 de Março de 2005. Dispõe sobre a classificação de corpos de água e diretrizes ambientais para seu enquadramento, bem como estabelece as condições e padrões de lançamento de efluentes, e dá outras providências.

GLASSTONE, S. **Termodinamica para químicos**. 5.ed. Madrid: Aguilar, 1978.

GRAF, Grupo de Reelaboração do Ensino de Física. **Física 2 – Física Térmica e Óptica**. Universidade de São Paulo, EDUSP 1991. 366 p. Disponível em: <<http://www.if.usp.br/gref/termo/termo3.pdf>>.

KIKOIN, KIKOIN. **Molecular Physics**. Moscou: Mir, 1976.

LABURÚ, C. E.; SILVA, O. H. M. da Determinação da pressão interna de lâmpadas fluorescentes (um experimento de baixo custo). **Caderno Brasileiro de Ensino de Física**, Florianópolis, v. 21, n. 2, p. 134-142, 2004. Disponível em: <<https://periodicos.ufsc.br/index.php/fisica/article/view/9999/9246>>.

LANGE, V. N. **Problemas experimentales ingeniosos de física**. Moscou: Mir, 1979.

LIDE D. R. **CRC: Handbook of Chemistry and Physics**. 85. ed. Taylor & Francis, 2004.

SKOOG, D. A.; HOLLER, F. J.; NIEMAN, T. A. **Princípios de análise instrumental**. 5. ed. Porto Alegre: Bookman, 2002.

USEPA. Mercury Emissions from the Disposal of Fluorescent Lamps. Final Report. Washington: 1 v. Disponível em: <www.usepa.gov>.

VOGEL, A. R.; MENDHAM, J.; DENNEY, R. C.; BARNES, J. D.; THOMAS **Métodos de análise química quantitativa**. 6. ed. Editora LTC, 2002.

VANELLI, C.; DELAI, R. Medida da pressão interna de uma lâmpada fluorescente. **Caderno Catarinense de Ensino de Física**, Florianópolis, v. 6, n. 3, p. 253-254, 1989.

Anexo 1 - Poluentes presentes no interior de lâmpadas fluorescentes

As lâmpadas fluorescentes oferecem risco de contaminação com mercúrio metálico Hg^0 e suas formas oxidadas Hg^{+2} e Hg_2^{+2} , além de metais como Ba, Cd, Cr, Pb e Sb. A quantidade de mercúrio em uma lâmpada fluorescente padrão, de 120 cm de comprimento e 3,8 cm de diâmetro) de 40 W, modelo T12 é de 21 mg, aproximadamente (USEPA, 1997).

A norma brasileira estabelece que o mercúrio, por sua capacidade de bioacumulação em ecossistemas e por seu potencial de migrar do resíduo para o ambiente, é classificado como Resíduo Classe I – Perigoso. É uma substância tóxica, Anexo F – Listagem n° 6, código de substância U 151, e um poluente, código D 011, com limite máximo do extrato de $0,1 \text{ mg.L}^{-1}$, em testes de lixiviação, conforme valores de referência da World Health Organization (WHO) e complementos com a Portaria n° 56 de 13/04/77, do Ministério da Saúde (ABNT NBR 10004, 2004).

De acordo com o National Electrical Manufacturers Association –NEMA, em um trabalho conjunto com a empresa fabricante de lâmpadas Sylvania, o conteúdo de mercúrio em uma lâmpada fluorescente é provavelmente 0,2 % (0,042 mg) de mercúrio elementar (fase vapor) e 99,8% (20,958 mg) de mercúrio divalente incorporado ao pó de fósforo (Usepa97).

Ao realizar o experimento em sala de aula os cuidados descritos neste trabalho devem ser obedecidos; o nível de contaminação provocado pela água descartada (em torno de 5 litros) é muito baixo, conforme será mostrado a seguir. A Ta-

bela 2 apresenta os resultados referentes à análise de uma amostra da água de torneira e desta mesma água após ter sido retirada do interior da lâmpada fluorescente. Essa análise foi obtida junto ao Instituto de Saneamento Ambiental (ISAM), da Universidade de Caxias do Sul.

Tabela 2 – Resultados da análise de água utilizada no experimento de determinação da pressão interna das lâmpadas fluorescentes. A água da torneira foi analisada antes (segunda coluna) e depois de ter sido "sugada" pela lâmpada fluorescente e posteriormente retirada (terceira coluna). A concentração dos metais foi obtida por espectrofotometria de absorção atômica⁷.

Determinação	Água da torneira	Água da lâmpada fluorescente
pH	7,71	7,64
Sólidos Totais	128,0 mg/L	151,0 mg/L
Sólidos Suspensos	<10,0 mg/L	10,0 mg/L
DQO	<10,0 mg/L	13,0 mg/L
Antimônio	<0,001 mg/L	0,060 mg/L
Bário	0,018 mg/L	3,27 mg/L
Cádmio	<0,001 mg/L	<0,001 mg/L
Chumbo	0,004 mg/L	0,007 mg/L
Cromo T	<0,001 mg/L	<0,001 mg/L
Mercúrio	<0,001 mg/L	<0,001 mg/L

⁷ A técnica de Espectrometria de Absorção Atômica em Chama (FAAS) consiste em conduzir uma amostra líquida por um fluxo de gás oxidante até uma chama onde ocorre a atomização das espécies presentes na amostra (SKOOG e MOLLER, 2002). Esta atomização ocorre a altas temperaturas, da ordem de 1700 a 3000 °C. A dissociação destas espécies resulta em um gás atômico e muitos destes átomos ionizam-se formando cátions e ânions. Os elétrons ao sofrerem um salto quântico depois de devidamente excitados por uma fonte de energia, devolvem a energia recebida para o meio, voltando assim para seu nível de energia de origem. A detecção das espécies é feita através de um sistema que utiliza uma lâmpada de cátodo oco que emite radiação com o mesmo comprimento de onda do elemento a ser determinado (VOGEL *et al.*, 2002). A Espectrometria de Absorção Atômica em Forno de Gravite (GFAAS) e Espectrometria de Absorção Atômica com Geração de Hidretos (HFAAS) são variantes desta técnica.

Os resultados apresentados na tabela permitem afirmar que a rejeição de mercúrio na água utilizada é nula, dentro da resolução dos aparelhos empregados; para o lançamento de efluentes o CONAMA estabelece uma concentração máxima de mercúrio de $0,01 \text{ mg.L}^{-1}$. Para o bário, o CONAMA estabelece o valor máximo de $5,0 \text{ mg.L}^{-1}$, maior do que o que foi encontrado na água, após ter passado pelo interior da lâmpada. A concentração de antimônio não está especificada nessa resolução do CONAMA.

Então, como conclusão, pode-se asseverar que as providências apontadas ao longo do trabalho, desde que cuidadosamente seguidas, garantem uma execução razoavelmente segura do experimento. As condições de armazenamento seguro das lâmpadas descartadas e sua posterior destinação final são descritas, por exemplo, em

<<http://www.fepam.rs.gov.br/perguntas/perguntadetalhe.asp?categoria=1.Residuos>>.