



Osmar Henrique Moura da Silva^{1#} , Carlos Eduardo Laburú¹ , Renato Akio Ikeoka¹ ,
Marcelo Alves de Carvalho¹

Departamento de Física, Universidade Estadual de Londrina, Londrina, PR, Brasil.

Palavras-chave

Ensino Médio
gases
teoria dos erros
inspiração epistemológica kuhniana

Resumo

Apresenta-se uma instrumentação para obtenção do coeficiente de dilatação volumétrica do ar a fim de estimar a temperatura do zero absoluto. Parte-se dos valores de referência de γ para gases ideais e da temperatura do zero absoluto indicado nos livros, com adequação dos resultados pela teoria dos erros. Há inspiração epistemológica kuhniana, no sentido de “ilustrar a teoria”, significando expor um paradigma ao aprendiz na busca de um valor-alvo de referência previamente conhecido por ele.

1. Introdução

Silva e Laburú [1] divulgaram um experimento simples e de custo reduzido para o estudo das transformações isobáricas no Ensino Médio mediante um método investigativo cuja inspiração epistemológica seguiu uma diretriz defendida em Silva e cols. [2] e Silva e Laburú [3], diretriz esta hipotética-dedutiva e que, segundo Gerike e cols. [4, p. 248], “é a visão epistemológica dominante na comunidade de educação científica nos últimos anos”. Todavia, por tal inspiração epistemológica procede-se na prática de laboratório escolar mediante falseamento e corroboração de hipóteses em uma perspectiva popperiana, diferentemente da que aqui

será proposta, de viés kuhniano, em que há “ilustração da teoria” [5]. Dessa perspectiva instrucional, o que significa expor um paradigma, e que é distinto de testar uma hipótese no viés popperiano, busca-se então um valor-alvo previamente conhecido pelos estudantes [6]. Cabe ressaltar, portanto, que a presente proposta de ensino no preserva uma

inspiração epistemológica implícita de visão pós-positivista, sendo essa uma recomendação que persiste há tempos na literatura em educação científica [7].

No que se refere ao material didático, objetiva-se avançar na exploração de uma versão de instrumentação de baixo custo [1], a fim de descrever atividades que

A presente proposta de ensino preserva uma inspiração epistemológica implícita de visão pós-positivista

Autor de correspondência. E-mail: osmarh@uel.br.

Este é um artigo de acesso livre sob licença Creative Commons



<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/3.0/>

Copyright © 2026, Copyright by Sociedade Brasileira de Física. Printed in Brazil.

possam ser viabilizadas no grau escolar recomendado para o Ensino Médio. Nesse sentido, para além da proposta de corroboração da transformação isobárica de gases, denominada lei de Charles, em carácter educacional investigativo [1], direciona-se aqui tal instrumentação para obtenção do coeficiente de dilatação volumétrica do ar, com o fim de estimar a temperatura do zero absoluto. Partindo dos valores de referência de γ dos gases ideais de $3,67 \times 10^{-3} \text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}$ e do valor de $-273,15 \text{ }^{\circ}\text{C}$ indicado nos livros didáticos, será adequada a teoria de erros [8] para os resultados a serem encontrados e, como será demonstrado, os erros experimentais obtidos seguem satisfatórios na prática abordada. Aliás, cabe avaliar que o presente trabalho avança em relação a outros estudos, como o de Mamédio e Araújo [9], que sugere a empregabilidade de uma distinta versão de baixo custo de termoscópio, mas limitando-o como termômetro. Já Kim e cols. [10] elaboram um arranjo experimental diferenciado para a determinação do zero absoluto, porém enfatizam que “a análise de dados e os cálculos tornam-se mais complexos” pelo método que eles ali viabilizam [10, p. 238].

Logo, a próxima seção contextualiza a versão de instrumentação acima para, posteriormente, descrever os procedimentos e resultados alcançados mediante atividade experimental destinada ao Ensino Médio. À medida que se coloca a estratégia didática dessa proposta como um produto educacional alternativo para o professor no ensino da física experimental de baixo custo, espera-se ao mesmo tempo contribuir com a linha de publicações similares consolidada na literatura de educação científica, “justificada pela consideração de contínua precariedade dos acervos de experimentos demonstrativos dos laboratórios escolares” [11, p. 70].

2. Proposta de instrumentação

A versão da instrumentação de baixo custo de Silva e Laburú [1, p. 3] é basicamente identificada como “um termoscópio caseiro, feito de uma seringa de 20 mL de plástico com um canudo de refresco transparente fixado na extremidade do bico da seringa”. A seringa é adaptada na posição horizontal no interior de um recipiente aberto¹. O êmbolo da seringa permanece imóvel na indicação de 20 mL, permanecendo do lado de fora do recipiente, bem como o bico da seringa com o canudo ali acoplado (Fig. 1A).

Para proceder à coleta de dados experimentais, é preciso inicialmente deixar uma quantidade de água na temperatura ambiente dentro do recipiente até encobrir a seringa (Fig. 1B). Após isso, acoplar o canudo contendo uma gota d’água a cerca de 1 cm da extremidade do canudo, junção esta que se faz na ponta da seringa com um curto e fino tubo de látex (tripa de mico), conforme a Fig. 1B. Tal condição possibilita

Direciona-se aqui tal instrumentação para obtenção do coeficiente de dilatação volumétrica do ar, com o fim de estimar a temperatura do zero absoluto

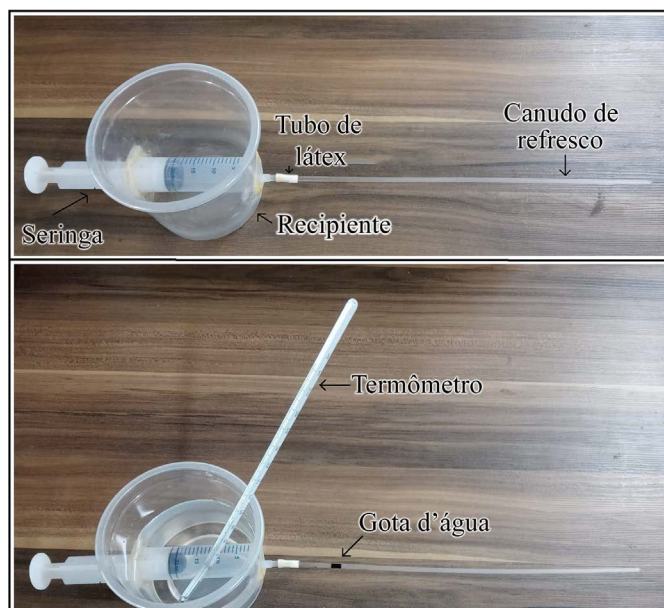


Figura 1 - A) Instrumentação de baixo custo; B) Arranjo experimental para tomada de dados. Fonte: Ref. [1].

alterar a temperatura do ar interno da seringa (sistema) quando se acrescentam quantias extras de água quente ou fria após a gota ter avançado. A temperatura da água é medida agitando-se a água no recipiente com o próprio termômetro, após haver equilíbrio térmico da água com o gás². As alterações de temperatura do sistema (ar aprisionado) são percebidas pelo deslocamento da gota d’água no interior do canudinho de plástico, consequentemente das variações de volume do sistema até haver ajuste da pressão interna com a pressão atmosférica. Isso ocasiona sucessivas transformações isobáricas para quaisquer medidas entre distintas posições em que a gota se encontrar imóvel ao longo do canudo.

3. Direcionamentos procedimentais, analíticos e epistemológicos

A princípio, partindo-se do arranjo experimental indicado na Fig. 1B, três esclarecimentos são inicialmente significativos para apresentar aos alunos: 1) o conceito de temperatura está relacionado à medida do grau de agitação das partículas do sistema (ar), que de modo indireto se estabelece por um termômetro, em razão da dilatação térmica (da substância ar) na condição de variação diretamente proporcional à temperatura; 2) mediante a quantidade de ar do sistema, o mesmo sofre um aquecimento ou resfriamento à pressão atmosférica, dilatando-se ou contraindo-se, o que muda a posição da gota d’água no interior do canudo (capilar)³; 3) um questionamento como “A temperatura do gás (ar) estudado (sistema) pode ser medida por um termômetro inserido na água que há no recipiente?” tem a finalidade de explorar o conceito de equilíbrio

térmico e serve para subsidiar a compreensão do momento adequado para se anotar uma medida, ou seja, no momento em que a gota d'água permanecer imóvel.

Com respeito à tomada de dados experimentais, enquanto valores de temperatura do sistema (ar interno da seringa), são obtidos por uso de um termômetro mergulhado na água do recipiente (Fig. 1B); Silva e Laburú [1] orientam para o seguinte procedimento para medição dos respectivos volumes do sistema: considera-se o volume do sistema (volume total V_T) igual à soma dos volumes da seringa (V_S) e do volume de ar do canudo (V_C) até a gota, ou seja,

$$V_T = V_S + V_C. \quad (1)$$

Uma vez que o V_S é sempre 20 mL, esses autores (ibid.) indicam que o V_C deve ser medido sabendo-se o volume por centímetro do canudo (cm/mL). Para se determinar isso, os autores sugerem usar uma seringa de plástico de 10 mL⁴ para funcionar como proveta, enchendo-se a mesma várias vezes com o canudo com água a uma determinada altura (maior possível para aumentar a precisão, assim como o volume de água medida) e despejando-a nessa seringa até determinada escala em mL. Diante do comprimento do canudo e de quantos foram necessários para atingir certa escala em mL da seringa (maior possível, conforme dito), tem-se: $x = \text{mL (anotado na seringa)}/\text{cm (utilizados de canudo)} = \text{volume de água em mL/cm de canudo (que representa o volume de ar em mL/cm do canudo)}$.

Quanto aos resultados almejados, como se verá mais adiante para os dois objetivos experimentais em foco, existem certos valores-alvo já consolidados nos livros didáticos, que são valores de referência para efeitos comparativos.

Agora, como estratégia didática, essa atividade experimental é adequada segundo a perspectiva de 'ilustração da teoria' [6], assim compatibilizada com a inspiração epistemológica kuhniana de modo instrucional a expor um paradigma [5] e não testar uma hipótese [2], orientação esta de inspiração popperiana. Nessa perspectiva, portanto, é possível avaliar os erros absoluto e relativo de valores medidos [8, p. 15] em relação aos valores-alvo pelas equações

$$E_a = |x_0 - x'|, \quad (2)$$

e

$$E_r = \frac{|x_0 - x'|}{|x'|}. \quad (3)$$

Em termos estratégicos, alguns esclarecimentos são necessários. Para evitar alterações de observações/dados pelos alunos ao almejam a 'resposta correta', pode ser prudente apresentar esse valor teórico x' (va-

lor-alvo ou de referência) logo após a obtenção do valor medido x_0 . Propõe-se, nesse sentido, confrontar o valor experimental dessa medição x_0 com o valor-alvo x' (da literatura), mais para confirmá-lo, dentro da inspiração kuhniana, por aplicação do paradigma [5], do que para estabelecer qualquer corroboração mediante algum teste de hipóteses em perspectiva popperiana [2].

Todavia, cabe ao professor avaliar a possibilidade de fornecer previamente um valor de referência para os alunos na atividade de laboratório dentro dessa perspectiva kuhniana, na consideração de que "o principal objetivo do ensino de ciências é o de fazer com que os estudantes aprendam as teorias vigentes e saibam adequadamente aplicá-las aos fenômenos", Hodson [apud 5, p. 3]. Prevalece, nesse sentido, a inspiração epistemológica direcionada para o ensino diante da qual toda medição depende de um paradigma (teoria) que a guie e somente a partir dele torna-se possível orientar-se na tomada de decisão de como e do que medir, assim como de qual valor numérico obter. Isso determina que, à luz de uma compreensão teórica prévia, ou no caso de uma expectativa de resultado conhecido, o experimento deva conformar-se e ajustar-se para que os valores apareçam. Por esse entendimento, portanto, é justificável os alunos saberem de antemão os resultados desejados experimentalmente (valores-alvo ou de referência).

Em resumo, os raciocínios, ações e observações devem ser guiados por atividades experimentais mediante paradigmas conhecidos (teorias ensinadas) que são aplicados aos resultados esperados, distinguindo-se de orientações educacionais fundamentadas em um teste de hipóteses, ou mesmo daquelas orientações de postura empírico-indutivista, epistemologicamente mais criticável.

4. Resultados e análises

Pelo procedimento anteriormente descrito, encontrou-se um valor aproximado de 0,067 mL por cm do canudinho de refresco (Fig. 1B) utilizado na atividade experimental. Ainda cabe salientar que Silva e Laburú [1] indicam a necessidade dos cálculos da dilatação da seringa de plástico que detém o sistema para obtenção da dilatação real. No caso, a seringa de plástico é fabricada em polipropileno, material com coeficiente de dilatação volumétrica de $450 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$, sendo considerado aí o volume fixado da mesma em 20 mL (ou $2 \times 10^{-5} \text{ m}^3$).

A Tabela 1 exhibe resultados experimentais de um aquecimento com valores de volumes reais do sistema para os dois objetivos traçados, quais sejam: 1) estimar o coeficiente de dilatação térmica do ar; 2) estimar o valor correspondente do zero absoluto na escala Celsius.

Existem certos valores-alvo já consolidados nos livros didáticos, que são valores de referência para efeitos comparativos

4.1. Coeficiente de dilatação térmica do ar: valor-alvo de $3,67 \times 10^{-3} \text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}$

Como valor-alvo ou de referência, pode-se adotar o coeficiente de expansão (dilatação) médio volumétrico do ar a 0 °C de $3,67 \times 10^{-3} \text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}$, valor coerente com a condição na qual “o gás sofre expansão sob pressão constante” [12, p. 136].

Pela instrumentação indicada na Fig. 1B, estabeleceu-se um procedimento de coleta de dados cujos resultados estão exibidos na Tabela 1, em que a seringa (e o sistema) foi posta em banho-maria para que lentamente a temperatura do sistema fosse alterada enquanto a pressão permanecesse constante, ao se medirem correspondentes volumes reais do sistema. A Fig. 2 apresenta a equação que relaciona V com T e exibe a reta (mínimos quadrados) ajustada aos pontos experimentais relacionados com as duas últimas colunas à esquerda na Tabela 1. Cabe mencionar que a reta exibida na Fig. 2 (bem como na Fig. 3, mais adiante) está construída mediante um programa de computador. Em caráter de ensaio, ela indica resultados típicos para o professor interessado. Em uma situação com os alunos na escola, é viável o uso de papel milimetrado para estabelecer, por meio de uma régua, um traço retilíneo (reta) que melhor se ajuste na distribuição dos pontos (dados) feitos manualmente no papel milimetrado⁵. A extrapolação dos dados dessa reta por prolongamento com a régua vai indicar um valor próximo ao estabelecido pelo programa de computador, restando, assim, avaliar os erros absoluto e relativo com os alunos.

Na Fig. 2, a tangente da reta ajustada aos pontos experimentais é dada pela equação

$$\text{tg}\theta = \frac{\Delta V}{\Delta T} = \frac{V_f - V_i}{T_f - T_i} \tag{4}$$

No caso, o coeficiente angular da reta (= $\text{tg}\theta$) equivale a 0,068. Mediante a equação para a dilatação volumétrica

$$\Delta V = V_0 \gamma \Delta T, \tag{5}$$

e em consideração com a Eq. (5), obtém-se o seguinte valor experimental para o coeficiente de dilatação volumétrica γ , ao se dividir a $\text{tg}\theta$ por V_0

$$\frac{0,068}{20,11} \approx 0,00338 \text{ }^{\circ}\text{C} = \gamma.$$

Tabela 1: Resultados experimentais de um aquecimento do sistema. A primeira coluna da esquerda refere-se à distância entre a gota d’água e a extremidade da seringa, para estimar o volume V_c em mL. Obs.: valores com arredondamento de números.

Distância (cm)	V_c (cm ³)	V_T (volume aparente do sistema) (cm ³)	Dilatação volumétrica da seringa (cm ³)	Volume real do sistema (cm ³)	Temperatura (°C)
1,70	0,11	20,11	0	20,11	27,00
3,30	0,22	20,22	0,02	20,24	29,00
6,00	0,40	20,40	0,05	20,45	32,00
9,00	0,60	20,60	0,08	20,68	35,00
12,10	0,81	20,81	0,11	20,81	38,50
14,70	0,98	20,98	0,14	21,12	42,00
19,10	1,28	21,28	0,18	21,46	46,50

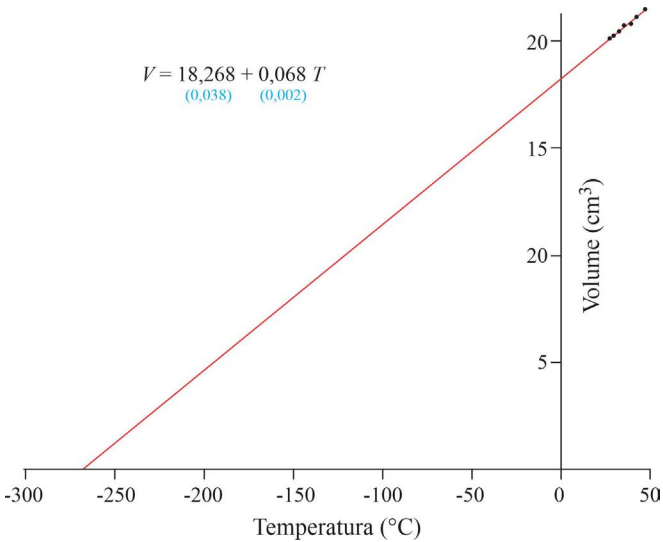


Figura 2 - Gráfico da relação entre volume e temperatura ($R^2 = 0,99327$). Obs.: valores dos coeficientes, bem como das incertezas (em azul), seguem com arredondamentos.

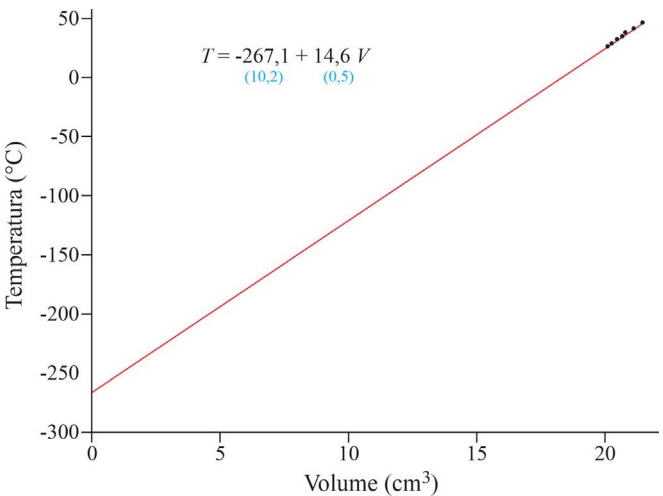


Figura 3 - Gráfico da relação entre temperatura e volume ($R^2 = 0,99327$). Obs.: valores dos coeficientes, bem como das incertezas (em azul), seguem com arredondamentos.

Para quantificar e qualificar os erros da medição, esse resultado experimental de $0,0034\text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}$, que representa o valor medido x_0 , pode ser então comparado com o valor de referência x' de γ ($0,00367\text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}$) a partir das Eqs. (2) e (3). Assim sendo, o erro absoluto (E_a) resulta em $|0,00338-0,00367|$, o que equivale a $0,00029\text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}$ ou $2,9 \times 10^{-4}\text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}$. Já com a Eq. (3), o erro relativo ($\%E_r$) é $\approx 0,08$, correspondendo a 8% em relação ao valor-alvo (ou de referência).

4.2. Zero absoluto: valor-alvo de -273,15 °C

Por definição, o intervalo de temperatura relativo à unidade na escala Celsius é o mesmo da escala Kelvin, ou seja, a variação de 1 K corresponde à variação de 1 °C, de modo que para a obtenção da medida da temperatura de um sistema na escala Kelvin, o valor da correspondente temperatura T_C medida em graus Celsius é

$$T_C = T - T_0, \quad (6)$$

onde $T_0 = 273,15\text{ K}$ [12, p. 132]. Como indicado nos livros didáticos para a temperatura mais baixa possível de ser atingida na natureza ($T = 0\text{ K}$), o valor-alvo do zero absoluto na escala Celsius é de $-273,15\text{ }^{\circ}\text{C}$: “...-273,15 °C corresponde à menor temperatura concebível, pelo menos para os gases” [15, p. 380]. Aliás, historicamente, nesse contexto, é interessante ler as palavras escritas pelo próprio Lord Kelvin, em seu artigo *On an absolute thermometric scale*:

... quando refletimos que o frio infinito deve corresponder a um número finito de graus no termômetro (de ar) abaixo de zero; uma vez que se estendermos o estrito princípio da graduação, acima indicado [6] suficientemente longe, devemos chegar a um ponto que corresponde a um volume de ar reduzido a nada, o que seria indicado como -273° na escala ($-100/0,366...$) ... [16, p. 104].

Considerando isso, uma maneira prática de se obter o limite inferior para a temperatura na escala Celsius é a extrapolação para zero do volume de um gás sob pressão constante ou, nas palavras de Kelvin, é estimar a temperatura para qual “o volume do gás reduz-se a nada”[7]. A Fig. 2 estabelece essa extrapolação com a reta em que o valor correspondente para a temperatura é de $-267,1\text{ }^{\circ}\text{C}$, valor que representa, para os mesmos dados experimentais coletados, o coeficiente linear identificado no gráfico da relação entre a temperatura e o volume da Fig. 3.

Pela Fig. 3, portanto, cabe analisar que, graficamente, quando $V = 0$ tem-se $T \approx -267,1\text{ }^{\circ}\text{C}$, resultado

este que representa o valor medido x_0 para a estimativa da temperatura mais baixa possível de acordo com os valores da Tabela 1. A partir das Eqs. (2) e (3), e na consideração do valor-alvo x' igual a $-273,15\text{ }^{\circ}\text{C}$, tem-se os respectivos erros absoluto e relativo: $E_a = 6,05\text{ }^{\circ}\text{C}$; $E_r \approx 0,0221 = 2,21\%$.

5. Considerações finais

Este trabalho buscou dar continuidade à exploração de uma versão de instrumentação simples e de baixo custo recentemente divulgada para uso no Ensino Médio e inserida no contexto da lei de Charles (transformação isobárica), cuja proposta estabeleceu um método investigativo dessa lei com os alunos, a partir de uma inspiração epistemológica implícita de tendência popperiana. Alternativamente, contribui-se agora mostrando a viabilidade dessa mesma instrumentação, mas no contexto da dilatação térmica e termometria, diferenciando-se com uma perspectiva epistemológica implícita de viés kuhniano e que propõe a aplicação didática da apresentação prévia da teoria ou, no caso, do adiantamento do conhecimento do resultado a ser encontrado em contraposição à proposta de teste de hipóteses.

Uma observação importante a acrescentar nas colocações anteriores é a de que o professor poderia esclarecer os estudantes que o gás real ar se aproxima em comportamento, nas condições tratadas, de um gás ideal teórico, o que afasta muitas concepções de senso comum dos aprendizes pelas quais a física não trata do mundo real, servindo apenas para passar na prova, e pertence ao âmbito teórico imaginativo. Com isso, este estudo ampara o emprego de atividades experimentais quantitativas no Ensino Médio, levando em conta que uma das razões contrárias a isso, por parte dos professores, está na dificuldade de enfrentarem o tratamento de dados experimentais com os alunos.

Dentro dessa perspectiva epistemológica kuhniana, espera-se subsidiar o professor interessado em aplicar a teoria dos erros nesse grau escolar, à medida que a atividade prática discutida resulta em inevitáveis erros experimentais. Nesse sentido, as interpretações mostram-se mais coerentes com os resultados de um experimento, mediante o domínio e a previsão do contexto teórico aprendido pelo sujeito antes da realização experimental, além de fortalecer o entendimento do que os alunos estão procurando.

Recebido em: 23 de Fevereiro de 2026

Aceito em: 8 de Junho de 2026

Notas

¹Um pote de plástico descartável de 500 mL que as sorveterias disponibilizam para os clientes.

²Identificado o equilíbrio térmico quando a gota d'água no canudo permanecer imóvel.

³Previamente, aí, é sensato realizar uma demonstração qualitativa para os alunos dos fenômenos da dilatação (expansão) e contração do ar da seringa, observando o deslocamento da gota, respectivamente, ao aumentar ou diminuir a temperatura desse ar.

⁴Sem o êmbolo e com a ponta da seringa tampada.

⁵Esse procedimento, além capacitar melhor os alunos na construção gráfica, evita a discussão dos mínimos quadrados, pois não é assunto demandado nos documentos normativos que orientam a organização e o desenvolvimento do currículo na educação básica brasileira (Diretrizes Curriculares Nacionais - DCNs; Base Nacional Comum Curricular - BNCC). Entretanto, programas internacionais de avaliação, bem como nossas diretrizes curriculares, estabelecem que o processo para aprender ciência envolve um desafio representacional em uma variedade de contextos [13]. Coerentemente, vale ressaltar que a presente proposta busca o emprego de diferentes formas de comunicação no processo de ensino e aprendizagem, via múltiplas representações [14], descritivas (verbal, gráfica, tabular, diagramática, matemática), figurativas (pictórica, analógica ou metafórica), cinestésicas ou de gestos corporais (encenação, jogos), que usam objetos tridimensionais (3D) ou maquetes, experimentos etc.

Referências

- [1] O.H.M. Silva, C.E. Laburú, Revista Ciências & Ideias **15**, e24152650 (2024). [doi](#)
- [2] O.H.M. Silva, C.E. Laburú, S. Camargo, A.A.C. Chistófolo, Acta Scientiae **12**(2), 110 (2019). [doi](#)
- [3] O.H.M. Silva, C.E. Laburú, Revista Electrónica de Investigación en Educación en Ciencias **11**, 31 (2016). [doi](#)
- [4] N. Gericke, P. Höglström, J.A. Wallin, Studies in Science Education **59**, 245 (2023). [doi](#)
- [5] C.E. Laburú, O.H.M. Silva, A.C. Força, Revista Brasileira de Ensino de Física **34**, 2503 (2012). [doi](#)
- [6] O.H.M. Silva, A Física na Escola **23**, 240260 (2025). [doi](#)
- [7] O.H.M. Silva, C.E. Laburú, T.Q. Costa, Actio - Docência em Ciências (Curitiba) **8**, 1 (2023). Disponível em <https://periodicos.utfpr.edu.br/actio/article/view/17264/10147>, acesso em 13/2/2026.
- [8] S.H.B. Arenales, J.A. Salvador. *Cálculo Numérico: Uma Abordagem Para o Ensino a Distância* (EdUFSCar, São Paulo, 2010).
- [9] E.R. Mamédio, P.P. Araújo, Experiências em Ensino de Ciências **18**, 710 (2023). Disponível em <https://www.fisica.ufmt.br/eenciojs/index.php/eenci/article/view/1290>, acesso em 13/2/2026.
- [10] M. Kim, M.S. Kim, S. Ly, Journal of Chemical Education **78**, 238 (2001). [doi](#)
- [11] R.V. Fernandes, O.H.M. Silva, A Física na Escola, **19**(1), 69 (2021). Disponível em <http://www1.fisica.org.br/fne/phocadownload/Vol19-Num1/FNE-19-1-201206.pdf>, acesso em 13/2/2026.
- [12] R.A. Serway, W.J. Jewett Jr. *Princípios de Física (Volume 2) - Oscilações, Ondas e Termodinâmica*, 5ª ed. (Cengage Learning, São Paulo-SP, 2014).
- [13] Brasil. Ministério da Educação. Secretaria de Educação Básica. Diretoria de Currículos e Educação Integral /- Diretrizes Curriculares Nacionais Gerais da Educação Básica (MEC/SEB, Brasília, 2013). Disponível em https://www.gov.br/mec/pt-br/media/seb/pdf/d_c_n_educacao_basica_nova.pdf, acesso em 13/2/2026.
- [14] O.H.M. Silva, Revista Ciências & Ideias **14**, e23142237 (2023). [doi](#)
- [15] R.M. Eisberg, L.S. Lerner, *Física - Fundamentos e Aplicações, Volume 2* (McGraw-Hill do Brasil, São Paulo, 1982).
- [16] W. Thomson, Philosophical Magazine, October, 1848. Found in: *Mathematical and Physical Papers from Sir William Thomson (Lord Kelvin)* (Cambridge University Press, Cambridge, 1882), p. 100-106.
- [17] P.A. Tipler, G. Mosca. *Volume 1: Mecânica, Oscilações e Ondas, Termodinâmica* (LTC- Livros Técnicos e Científicos Editora, Rio de Janeiro, 2009).