



Jean Michel da Silva Pereira^{1#} , Natasha Soares Monteiro da Silva¹, Paulo Victor Santos Souza¹

Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Rio de Janeiro, Volta Redonda, RJ, Brasil.

Palavras-chave

experimentos de baixo custo
videoanálise
conservação de energia
eficiência energética

Resumo

Este artigo apresenta uma proposta de prática experimental simples e de baixo custo, inspirada em um desafio viral da internet, visando à aplicação no ensino de física. O experimento consiste na construção de um carrinho impulsionado pela reação entre refrigerante e bala de menta, cujo movimento é registrado por vídeo e analisado com o *software* Tracker. A atividade permite explorar conceitos como transformação e conservação de energia, leis de Newton, trabalho e energia, além de eficiência energética, podendo ajudar na promoção do letramento científico e no engajamento dos estudantes, em alinhamento com a Base Nacional Comum Curricular (BNCC). Um modelo teórico foi desenvolvido e os parâmetros físicos obtidos por meio de videoanálise, incluindo coeficiente de atrito, velocidade de ejeção e taxa de conversão. Além disso, foi possível verificar o teorema trabalho-energia cinética com precisão satisfatória (erro inferior a 7%). A eficiência energética do sistema foi estimada em 31,4%, permitindo uma discussão crítica sobre perdas de energia e aplicações práticas. A proposta mostrou-se eficaz na integração entre teoria e prática, sendo aplicável no Ensino Médio e em disciplinas introdutórias de física no ensino superior.

1. Introdução

A física é uma ciência essencialmente experimental e uma compreensão dela implica necessariamente a realização de práticas experimentais por parte dos alunos [1]. Nos últimos anos, a videoanálise converteu-se em uma excelente ferramenta de aquisição e tratamento de dados experimentais e tem sido, por sua simplicidade, muito aplicada no ensino de física [2-4]. Uma questão

crítica para os professores de física é como aumentar a motivação e o envolvimento dos alunos na realização de atividades experimentais [5], além da preocupação com a importância de se promover o letramento científico na sala de aula de ciências [6]. Alguns métodos têm

A física é uma ciência essencialmente experimental e uma compreensão dela implica necessariamente a realização de práticas experimentais por parte dos alunos

sido investigados recentemente, como atividades experimentais investigativas [7] ou a realização de experimentos dentro do enfoque STEM [8].

[#]Autor de correspondência. E-mail: jean.pereira@ifrj.edu.br.

Este é um artigo de acesso livre sob licença Creative Commons



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

Uma abordagem que tem ganhado destaque recentemente é a realização de atividades experimentais inspiradas em desafios virais da internet [9]. Seguindo essa tendência, apresentamos neste trabalho uma prática experimental inspirada em um desses desafios virais: a mistura de refrigerante com bala de menta, um fenômeno que já tem sido explorado para propósitos didáticos [10-13]. Vídeos desse tipo de desafio são abundantes e acumulam estatísticas extraordinárias de interação, o que pode ser um fator motivador significativo para os estudantes [14]. Isso mostra que a inserção de vídeos postados no Youtube nas práticas educacionais cotidianas pode ser um fator motivador para os estudantes, desde que os vídeos sejam selecionados considerando os critérios adequados [15-16].

A prática experimental busca modelar fisicamente o movimento de um carrinho cujo combustível é a mistura de refrigerante e bala de menta e pode ser aplicado no estudo de processos de transformação de energia, bem como na compreensão do conceito de eficiência energética. O experimento é construído com material de baixo custo e um smartphone para a filmagem do movimento, que será posteriormente analisado com uso do software Tracker¹ [17]. Foi construído o protótipo de carrinho impulsionado por uma mistura de refrigerante com bala de menta. O carrinho movimenta-se sob a ação do impulso gerado pela reação sobre uma pista de corrida montada com o objetivo de limitar o movimento a uma única dimensão. As medidas experimentais para atestar a eficiência energética do protótipo foram feitas por videoanálise. Dessa maneira, é possível obterem-se parâmetros quantitativos com o objetivo de estudar as transformações das energias envolvidas no fenômeno, alinhando-se às habili-

Uma abordagem que tem ganhado destaque recentemente é a realização de atividades experimentais inspiradas em desafios virais da internet. Seguindo essa tendência, apresentamos uma prática experimental inspirada em um desses desafios

dades descritas na Base Nacional Comum Curricular (BNCC) [18].

Este texto está organizado da seguinte forma: inicialmente, apresentamos a montagem experimental utilizada; em seguida, discutimos alguns elementos do modelo teórico para o movimento do carrinho, fundamentado nas leis de Newton; os resultados de um experimento piloto são então apresentados e analisados à luz do modelo teórico, e por fim, discutimos algumas potencialidades e limitações do experimento.

2. Montagem e procedimento experimental

A montagem experimental, mostrada na Fig. 1, é composta por um carrinho de brinquedo, uma garrafa de refrigerante de 600 mL, bala de menta, um canudo, cola, fita adesiva ou esparadrapo, ímã de neodímio, uma porca sextavada de 1/2 polegada, canaletas de PVC para fio, um smartphone para filmagem e um notebook para análise no *software* Tracker. Além disso, será necessária uma balança para verificar a massa do sistema antes do movimento e após o carrinho parar por completo. Para o tamanho do carrinho escolhido, verificou-se que uma garrafa de 600 mL é suficiente. Ela é anexada ao carrinho utilizando-se a fita adesiva. Em sua tampa deve-se fazer um furo de tamanho suficiente para passar e fixar com cola um pedaço do canudo que serve como escape para o líquido ejetado da garrafa pela reação. Para facilitar o momento de liberar a bala de menta dentro da garrafa foi utilizada a porca sextavada de 1/2 polegada e o ímã de neodímio. Por dentro da tampa colocou-se a porca e por fora o ímã, de modo que atração entre eles mantivesse ambos fixados à tampa. Na parte de dentro, a porca faz o apoio para prender a bala de menta. A pista de corrida foi confeccionada uti-

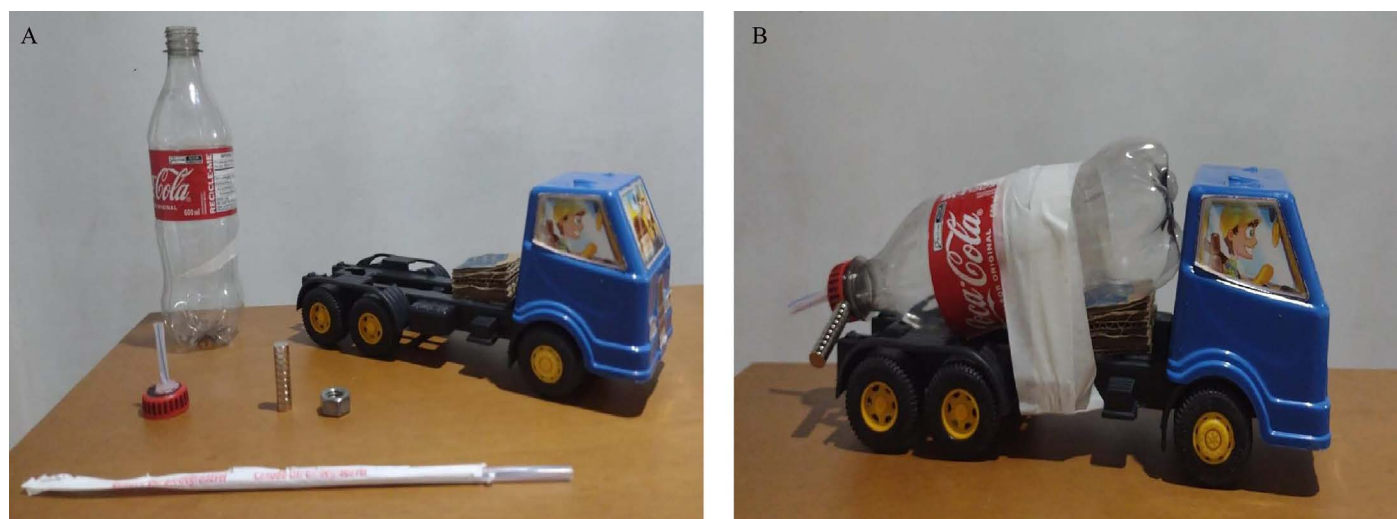


Figura 1 - A) materiais utilizados na montagem do carrinho; B) carrinho montado já fixado à garrafa pet de 600 mL.

lizando as canaletas de PVC. A espessura da canaleta dependerá do tamanho da roda do carrinho escolhido. No caso específico deste experimento, foram utilizadas canaletas de $50 \times 20 \times 2000$ mm. Outro importante aspecto para o experimento é um local adequado para sua realização. A propulsão gerada pela mistura de refrigerante com apenas um bala de menta é capaz de impulsionar o carrinho por distâncias maiores que 6 m. Por esse motivo, é necessário um espaço grande o suficiente, como uma quadra esportiva, para que a pista seja montada, como é ilustrado na Fig. 2. O tamanho total da pista utilizada foi de 8 m de comprimento.

Inicialmente, o smartphone é posicionado de forma que seja capaz de filmar toda a extensão da pista de PVC. Nesse momento, a filmagem já pode ser iniciada e o vídeo editado posteriormente para utilizar somente a parte do movimento do carrinho. Isso facilita realizar o experimento sem auxílio de outra pessoa para iniciar e parar a gravação no momento exato em que o sistema é liberado para o movimento.

Com o carrinho já montado e preparado, a garrafa preenchida de refrigerante será parte do combustível. Essa etapa deve ser feita cuidadosamente, pois a bala de menta é então colocada na parte interna da tampa da garrafa, presa pelo conjunto formado pela porca sextavada e o ímã de neodímio. A garrafa pode, então, ser fechada. Utilizando-se a balança, a massa inicial do sistema deve ser pesada e anotada. No caso desse experimento, o valor inicial de massa foi $m_0 = 839$ g.

No início da pista, os ímãs de neodímio podem ser retirados rapidamente, liberando a porca sextavada e, conseqüentemente, a bala de menta no interior da garrafa, iniciando a reação. Imediatamente antes de pôr o sistema na pista e liberá-lo, pode-se sacudir a garrafa para potencializar a reação química. Após isso, o carrinho é solto para iniciar o movimento e percorrer a trajetória limitada pela pista até perder todo combustível propulsor e entrar em repouso. Nesse instante, a filmagem é interrompida e a massa final do sistema é verificada com a balança, que para o experimento em questão foi de $m_f = 209$ g.

A propulsão gerada pela mistura de refrigerante com apenas um bala de menta é capaz de impulsionar o carrinho por distâncias maiores que 6 m

Uma vez encerrada a gravação, o vídeo do movimento é transferido para um computador para que se possa realizar a videoanálise adequada com o Tracker e obter os parâmetros físicos relevantes, como a velocidade e a aceleração do sistema em função do tempo.

A versão do Tracker utilizada foi a 5.1.5. Inicialmente, utilizou-se o ícone “Abrir”, localizado na barra de ferramentas, para carregar o vídeo. Uma vez que o vídeo se encontrava na tela, utilizou-se o ícone “Ajustes de Corte de Vídeo” para editá-lo e selecionar apenas o movimento do carrinho. Posteriormente, selecionou-se “Fita Métrica com Transferidor/Novo/Bastão de Medição”; para isso, foi necessário ajustá-lo sobre alguma medida conhecida. Na sequência, clicou-se no ícone “Mostrar ou ocultar os eixos de coordenadas” e localizaram-se os eixos de acordo com o desejado. Por fim, para obterem-se os gráficos, selecionou-se “Trajetórias/Novo/Ponto de Massa”. Essa etapa pode ser realizada

de dois modos: no primeiro, o ponto de massa pode ser inserido manualmente, *frame a frame*, utilizando-se a tecla SHIFT e clicando com o botão esquerdo do mouse. No segundo, esse ponto pôde ser inserido automaticamente ao se pressionarem as teclas CTRL + SHIFT e clicar com o botão es-

querdo do mouse; na segunda alternativa, aparece a janela “Trajetória automática”, onde o botão “pesquisar” deve ser clicado.

3. Fundamentação teórica

O fenômeno químico que gera a reação usada como propulsão para o carrinho ocorre porque o refrigerante possui alta concentração de CO_2 , em equilíbrio com a água de sua composição, que vai sendo liberado lentamente. Porém, tal equilíbrio é muito delicado e pode ser facilmente quebrado por agitação ou pela adição de um sólido com superfície porosa, que é o caso da bala de menta. Ao ser inserida no refrigerante, ela causa um desequilíbrio que resulta em uma reação que acelera a expulsão do CO_2 de maneira muito abrupta, gerando uma espécie de *spray* [13].

De acordo com a 3ª lei de Newton, ao ser lançado para trás o *spray* resultante da reação química gera



Figura 2 - Carrinho em movimento sobre a pista de PVC montada em uma quadra esportiva.

uma força motora que impulsiona o carrinho no sentido oposto, movimentando-o para frente em um movimento acelerado, tal como no movimento de um foguete que expela uma nuvem resultante da queima do combustível [19-20]. Tal força pode ser escrita como

$$F_{mot} = bV_e, \quad (1)$$

onde V_e é a velocidade de ejeção e b é a taxa de conversão, um parâmetro que indica quão rápido a reação está consumindo o combustível disponível e que consideraremos como sendo constante [21]. Ela está relacionada à taxa de variação de massa de combustível pela relação

$$\frac{dm}{dt} = -b, \quad (2)$$

cujas solução é

$$m(t) = m_0 - bt, \quad (3)$$

sendo m_0 a massa inicial do sistema.

Além da força motora de propulsão, há ainda a força de atrito, $F_{at} = \mu mg$, e a força de resistência do ar, R_{ar} . Aplicando-se a segunda lei de Newton ao problema em questão, chega-se à equação de movimento

$$V_e b + \mu g m(t) + R_{ar} = m \frac{dv}{dt}, \quad (4)$$

onde μ é o coeficiente de atrito. A Eq. (4) está de acordo com a literatura [19, 21-22].

Como hipótese simplificadora, partiremos do princípio de que a resistência do ar pode ser desconsiderada. Tal hipótese será mais bem justificada na seção de resultados. Dessa maneira, a Eq. (4), combinada com a Eq. (3), fornece a equação de movimento

$$V_e b + \mu g(m_0 - bt) = (m_0 - bt) \frac{dv}{dt}, \quad (5)$$

cujas solução fornece o modelo matemático que descreve a velocidade do sistema,

$$v(t) = V_e \ln \left(\frac{m_0}{m_0 - bt} \right) - \mu g t. \quad (6)$$

A função horária de aceleração do carrinho também pode ser obtida a partir da derivada temporal da Eq. (6),

$$\frac{dv}{dt} = a(t) = \frac{V_e b}{m_0 - bt} - \mu g. \quad (7)$$

Trata-se, portanto, de um modelo simples e que pode ser facilmente entendido por professores da educação básica.

4. Resultados e discussão

O software Tracker permite, por meio da análise do vídeo do movimento, extrair o gráfico da evolução temporal de diversos parâmetros físicos relevantes. A partir dos valores retirados do gráfico da velocidade como função do tempo (Fig. 3), é possível determinar os parâmetros que faltam para completar a Eq. (6) do modelo matemático deduzido acima, ou seja, V_e , b e o coeficiente de atrito cinético, μ .

Iniciaremos pelo μ , pois utilizando seu valor é possível justificar a hipótese simplificadora na qual se desconsidera a força de resistência do ar. Essa hipótese se justifica pelo fato de a força de atrito ser muito mais intensa em comparação a R_{ar} .

Para o cálculo do máximo valor de atrito consideram-se as seguintes hipóteses: a) após o carrinho atingir sua máxima velocidade no tempo t_{max} , não há mais força motora e b) na iminência de o carrinho entrar em repouso, só há força de atrito.

Levando em conta tais informações, é possível estimar o valor máximo da força de atrito atuante no sistema, considerando que a aceleração nesse trecho é consequência somente dela. A aceleração média no trecho final pode ser calculada pela equação

$$A_{média} = \frac{\Delta V}{\Delta t}, \quad (8)$$

que, para o intervalo final, $\Delta t = 5,00 \text{ s} - 4,83 \text{ s}$, é aproximadamente $A_{média} = 0,640 \text{ m/s}^2$.

Logo

$$F_{at} = m_f A_{med} = 0,209 * 0,64 = 0,13376 \text{ N},$$

onde $m_f = 0,209 \text{ kg}$ é a massa final do sistema, medida logo após o término do experimento. Com isso, o coeficiente de atrito pode ser calculado como

$$F_{at} = \mu mg, \quad (9)$$

de onde se segue que, $\mu_c = 0,64/9,8 = 0,065$. Portanto, a força de atrito máxima, $F_{at \text{ max}}$, pode ser facilmente obtida pela Eq. (9), porém utilizando a massa inicial do sistema, m_0 ,

$$F_{atmax} = \mu_c m_0 g = 0,065 * 0,839 = 0,536 \text{ N}.$$

Uma vez conhecido o valor de $F_{at \text{ max}}$, pode-se verificar se a simplificação feita na Eq. (4) se justifica, ou seja, determinar se é possível desconsiderar a resistência do ar.

Para isso, deve-se primeiro calcular o valor de R_{ar} pela relação

$$R_{armax} = \frac{1}{2} \rho C_x V^2, \quad (10)$$

na qual ρ é a densidade do ar, C_x é o coeficiente de arrasto aerodinâmico, A é a área de seção reta do carri-

nho e V , sua velocidade. Vale ressaltar que tal cálculo é feito para o R_{ar} máximo, uma vez que se considera o quadrado da velocidade. Os valores usados na conta da Eq. (10) são apresentados na Tabela 1. Para C_x foi considerada a aproximação de o carrinho ter um formato cilíndrico. Já para a velocidade, como o interesse é determinar o valor máximo de R_{ar} , foi utilizada a máxima velocidade atingida pelo carrinho durante sua trajetória obtida no gráfico da Fig. 3.

Aplicando-se esses valores na Eq. (10), encontra-se o valor máximo da resistência do ar que atua no carrinho durante seu movimento, que é de $R_{ar\ max} = 0,0260\ N$.

De posse dos valores de $F_{at\ max}$ e $R_{ar\ max}$, pode-se compará-los,

$$\frac{F_{atmax}}{R_{armax}} = \frac{0,536}{0,026} = 20,65$$

Logo, a força de atrito é cerca de 20 vezes superior quando comparada à força de resistência do ar, o que torna plausível a simplificação empregada na dedução da Eq. (6).

Para completar o modelo matemático, falta apenas determinar os valores dos parâmetros restantes, V_e e b . Para isso, considera-se o momento da trajetória no qual o carrinho atinge sua maior velocidade, V_{max} . Nesse instante, a Eq. (6) se reduz a

Tabela 1: Grandezas utilizadas no cálculo da força de resistência do ar.

Grandeza	Valor
ρ	1,230 kg/m ³
C_x	0,900
A	0,0113 m ²
V	2,040 m/s

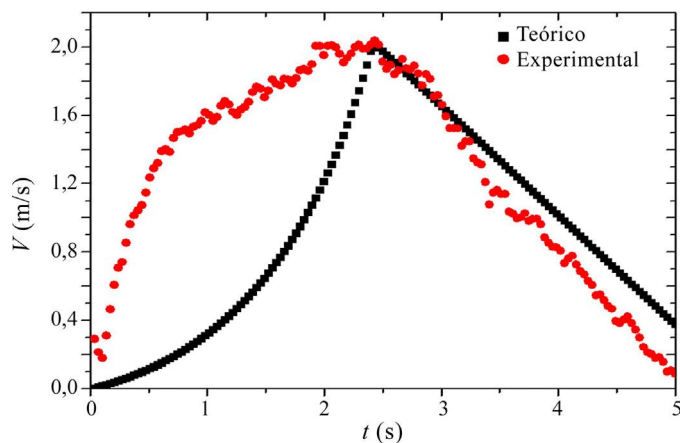


Figura 3 - Velocidade do carrinho em função do tempo. O gráfico vermelho representa os dados experimentais obtidos no Tracker; o gráfico preto é o valor teórico deduzido pela Eq. (6).

$$v_{max}(t_{max}) = V_e \ln \left(\frac{m_0}{m_f} \right) - \mu g t_{max}, \quad (11)$$

na qual a única incógnita é o valor da velocidade de escape, V_e . Substituindo-se os valores das demais grandezas, obtém-se que

$$2,040 = V_e \ln \left(\frac{0,839}{0,209} \right) - 0,640 \times 2,430, \quad (12)$$

$$V_e = \frac{3,5952}{1,3898} = 2,605\text{ m/s}.$$

Para se obter o valor do parâmetro b , utiliza-se um raciocínio semelhante, uma vez que o valor de V_e é agora conhecido,

$$v(t) = 2,605 \ln \left(\frac{0,839}{0,839 - 2,430b} \right) - 0,640 \times 2,430,$$

$$2,04 = 2,605 \ln \left(\frac{0,839}{0,839 - 2,43b} \right) - 1,555,$$

cujo resultado fornecido para b é

$$b = 0,259\text{ kg/s}. \quad (13)$$

Após todas essas deduções, é possível escrever o modelo matemático da Eq. (6) em termo dos dados do experimento como

$$v(t) = 2,605 \ln \left(\frac{0,839}{0,839 - 0,259t} \right) - 0,640t. \quad (14)$$

Assim, foi possível deduzir um modelo matemático que representa a equação horária da velocidade do carrinho. O gráfico desse modelo é apresentado na Fig. 3 e comparado à curva obtida experimentalmente.

A Fig. 3 compara o gráfico da velocidade do carrinho obtido experimentalmente (vermelho) com o modelo teórico (preto). Observa-se que ambos os gráficos apresentam a mesma tendência de aumento acentuado da velocidade até aproximadamente $t = 2,460\text{ s}$, regime no qual a força de impulso gerada pelo spray expelido na reação de refrigerante com bala de menta é mais intensa que as outras. Nesse instante, o carrinho atinge sua máxima velocidade, o que é mostrado pelos dois gráficos. Após isso, as forças dissipativas passam a dominar o movimento do sistema, que começa a ser freado. Esse efeito é claramente observado tanto no gráfico experimental quanto no modelo teórico deduzido. A análise do gráfico mostra também que a hipótese presente no modelo de que o combustível se consome linearmente não parece tão razoável. Contudo, isso não invalida a análise como exercício didático de modelagem.

Uma vez que a função da velocidade é obtida, é possível determinar ainda como varia a energia ciné-

tica do carrinho em função do tempo. Para isso, utiliza-se a Eq. (3), que descreve como ocorre a variação da massa em função do tempo, completa com o valor da taxa de conversão obtido na Eq. (13). Isso permite determinar o valor da energia cinética, E_c , conforme a equação

$$E_c(t) = \frac{1}{2} m(t) v^2(t). \quad (15)$$

O resultado obtido pelos dados experimentais fornecidos pelo *software* Tracker são apresentados na Fig. 4 (A). Nela pode ser observado que no início do movimento o carrinho adquire energia cinética em uma taxa relativamente alta, seguido por um pequeno platô e, logo após, uma queda abrupta. No intervalo entre o início do movimento e a energia cinética máxima obtida, a variação da energia cinética apresentada pelo carrinho é de aproximadamente $\Delta E_c = 0,736$ J.

Com o objetivo de validar o resultado observado para a variação da energia cinética, pode-se utilizar o teorema trabalho-variação da energia cinética

$$\Delta E_c(t) = W_t, \quad (16)$$

onde W_t é o trabalho total realizado durante o percurso. Os dados fornecidos pelo Tracker permitem obter o valor da aceleração experimentada pelo carrinho durante o movimento. A partir da combinação desses valores com os da massa dada pela Eq. (3), é possível obter o valor da força resultante sobre o carrinho durante todo o percurso, conforme a segunda lei de Newton. Depois disso, basta fazer o gráfico desses valores em função da distância percorrida. O resultado é apresentado na Fig. 4 (B).

A partir do gráfico da Fig. 4 (B), é possível calcular o valor do trabalho total realizado por meio da equação

$$W_t = \int F(x) dx. \quad (17)$$

O resultado obtido para o trabalho total foi de cerca de 0,788 J, que é muito próximo ao obtido para a variação da energia cinética máxima, conforme prediz a Eq. (17), o que evidencia que embora os resultados tenham como base algumas suposições e aproximações, estas não invalidam a modelagem apresentada.

Por fim, os dados experimentais permitem ainda uma discussão em relação à eficiência energética, ε , do processo. De toda a energia disponibilizada pela reação química, apenas uma parte é utilizada pelo movimento do carrinho, exatamente como ocorre no caso de um foguete real [22]. Utiliza-se então a relação para o cálculo da eficiência energética como a razão entre a energia utilizada (ou o trabalho realizado) pela energia total, E_T , disponibilizada pela reação química, conforme a Eq. (18)

$$\varepsilon = \frac{W_T}{E_T}. \quad (18)$$

Para obter a energia total disponibilizada pela reação, vamos considerar que o trabalho total é o resultado da diferença entre o trabalho realizado pelo impulso do *spray*, W_I , gerado na reação e o trabalho da força de atrito, W_{fat} . Portanto, a energia disponível é dada por

$$W_I = W_T + W_{fat}. \quad (19)$$

A força de atrito em função do tempo pode ser obtida combinando-se a Eq. (6) com a Eq. (3). Com procedimento idêntico ao feito para a força resultante para obter o trabalho total, pode-se determinar o trabalho da força de atrito. Após a análise, o valor obtido é de aproximadamente 1,463 J. Com isso, o trabalho da

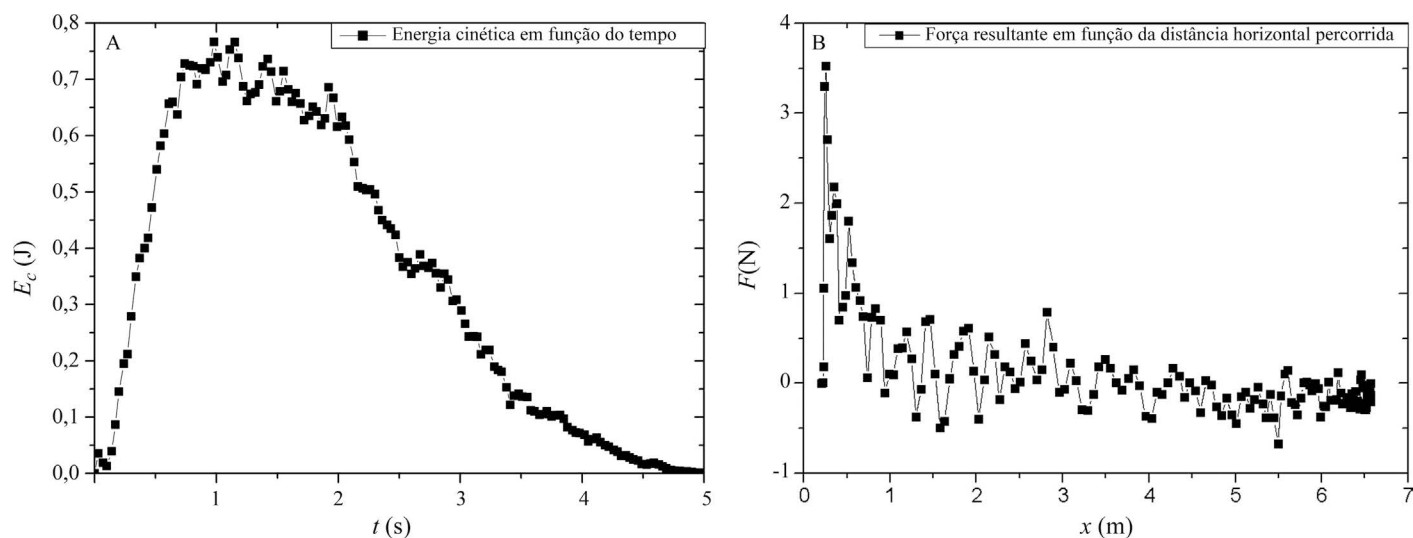


Figura 4 - (A) gráfico da energia cinética do carrinho em função do tempo; (B) gráfico representando a força resultante atuando sobre o carrinho em função da distância percorrida.

força de impulso será 2,551 J. Logo, a eficiência energética do processo é de

$$\varepsilon = \frac{0,788}{2,551} \times 100 = 31,4\%. \quad (20)$$

É uma eficiência relativamente baixa, porém já se esperava que o processo não apresentasse uma eficiência muito relevante.

6. Considerações finais

Conforme exposto acima, foi apresentado um experimento relativamente simples e de baixo custo com potencial de aplicação tanto em turmas de Ensino Médio como no ensino superior. Um modelo teórico foi apresentado e sua validade foi avaliada a partir dos dados experimentais, permitindo obter informações de praticamente todos os tópicos relevantes dentro das disciplinas que estudam mecânica contemplados na Base Nacional Comum Curricular [18], como velocidade instantânea, aceleração e força resultante, traba-

lho total realizado e a teoria trabalho-energia cinética. Foi possível ainda fazer considerações acerca da energia utilizada e calcular a eficiência do processo, o que permite a utilização do experimento para trabalhar tópicos relacionados a gasto de energia, inclusive por meio de uma abordagem interdisciplinar.

Embora alguns dos resultados apresentados no texto mostrem valores muito razoáveis do ponto de vista teórico, fica claro que o modelo apresenta diversas limitações. No entanto, a mais relevante se mostrou aquela na qual se considera que o combustível se consome linearmente. Essa limitação foi introduzida devido à dificuldade em se obter experimentalmente, e de forma mais precisa, o modelo real pelo qual a massa varia com o tempo. Portanto, melhorias que possibilitem uma modelagem mais precisa passam, necessariamente, pela melhora na capacidade de determinar esse parâmetro.

Recebido em: 14 de Outubro de 2024

Aceito em: 15 de Janeiro de 2025

Nota

¹O *software* Tracker pode ser obtido para diferentes sistemas operacionais no endereço eletrônico <https://physlets.org/tracker/>, acesso em 17/6/2024.

Referências

- [1] T.A. Borges, Caderno Brasileiro de Ensino de Física **19**, 291 (2002).
- [2] V.L.B. Jesus, D.G.G. Sasaki, Revista Brasileira de Ensino de Física **36**, 3503 (2014). [doi](#)
- [3] F.S. Neto, P.V.S. Souza, Phys. Educ. **53**, 055022 (2018). [doi](#)
- [4] P.V.S. Souza, C.J.V. Silva, W.F. Balthazar, Revista Brasileira de Ensino de Física **41**, 257 (2019).
- [5] V.R.A. Moraes, J. Taziri, Investigações em Ensino de Ciências **24**, 72 (2019). [doi](#)
- [6] I.S. Siqueira, C.M. Monteiro, A.C. Intorne, P.V.S. Souza, Experiências em Ensino de Ciências **18**, 663 (2023).
- [7] P.V.S. Souza, F. Santos Neto, M. Maximo-Pereira, Revista Brasileira de Ensino de Ciências e Matemática **4**, 482 (2021). [doi](#)
- [8] P.V.S. Souza, E.A. Lima, R.S. Dutra, M.A. Dias, Revista de Enseñanza de la Física **33**, 479 (2021). [doi](#)
- [9] C.M. Monteiro, I.S. Siqueira, A.C. Intorne, P.V.S. Souza Revista do Professor de Física **6**, 337 (2022). [doi](#)
- [10] F.C. Alves, G.B. Silva, in: *Anais do XII Encontro Paulista de Pesquisa em Ensino de Química*, Sertãozinho, 2023, editado por (IFSP-STZ, Sertãozinho, 2023). [doi](#)
- [11] C.T. Silva Nunes, K.S. Lima, M.L. Santos, E.L. da Silva, Scientia Plena **10**, 087206 (2014). [doi](#)
- [12] T.S. Coffey, American Journal of Physics **76**, 551 (2008). [doi](#)
- [13] D.A.T. Pires, P.F.L. Machado, Química Nova na Escola **35**, 166 (2013). Disponível em http://qnesc.sbq.org.br/online/qnesc35_3/05-RSA-18-12.pdf, acesso em 20/6/2025.
- [14] Power Test, YouTube, 11 de abril de 2021. Disponível em https://www.youtube.com/watch?v=_c9SQS6c-3A, acesso em 26/6/2024.
- [15] C.K. Schneider, L. Caetano, L.O.M. Ribeiro, Revista Novas Tecnologias na Educação **10**, 1 (2012). [doi](#)
- [16] T. Jones, K. Cuthrell, Computers in the Schools **28**, 75 (2011). [doi](#)
- [17] X-Test, YouTube, 15 de agosto de 2020. Disponível em <https://www.youtube.com/watch?v=wy82fVRnytM&t=37s>, acesso em 18/6/2024.
- [18] Brasil, *Base Nacional Comum Curricular* (Ministério da Educação, Brasília, 2018).
- [19] R.H. Gowdy, Am. J. Phys. **63**, 229 (1995). [doi](#)
- [20] S.K. Bose, Am. J. Phys. **51**, 463 (1983). [doi](#)
- [21] T. Claessens, The Physics Teacher **55**, 558 (2017). [doi](#)
- [22] P.R. Blanco, Physics Education **54**, 065001 (2019).