

Videoanálise e anemocoria: ensinando mecânica newtoniana com o estudo do movimento de frutos alados

Video Analysis and Anemochory: Teaching Newtonian Mechanics by Studying the Movement of Winged Fruits

Rafael Henriques Longaresi

ORCID: [0000-0001-8194-828X](https://orcid.org/0000-0001-8194-828X)

Marcus Vinicius Peres

ORCID: [0000-0002-9257-0507](https://orcid.org/0000-0002-9257-0507)

Jorge Alberto Lenz

ORCID: [0000-0002-9557-9267](https://orcid.org/0000-0002-9557-9267)

Arandi Ginane Bezerra Jr

ORCID: [0000-0002-5145-5131](https://orcid.org/0000-0002-5145-5131)

Giovani Gozzi

ORCID: [0000-0001-8873-2086](https://orcid.org/0000-0001-8873-2086)

Resumo

O ensino de física na contemporaneidade apresenta possibilidades para conjugar tecnologias de ensino a metodologias inovadoras, visando abordagens interdisciplinares, não segmentadas e com foco nos fundamentos dessa ciência: observação e seleção de fenômenos, realização de experimentos, modelagem matemática e utilização de recursos computacionais. No presente trabalho, apresentamos uma abordagem experimental associada à modelagem científica para o estudo da anemocoria (disseminação de sementes, pólen e frutos pelo vento) no contexto de aulas de física. As atividades de experimentação foram realizadas utilizando a vídeo análise por meio do software Tracker. A partir da caracterização do movimento de queda dos frutos da espécie *Tipuana tipu* (sâmara), foram feitos estudos de cinemática, dinâmica, conservação da energia e trabalho mecânico para descrever o movimento de queda e caracterizar os processos de conservação e transformação de energia. Essas atividades experimentais foram desenvolvidas em um curso de licenciatura em biologia e abordou os princípios físicos relacionados com a dispersão de frutos, evidenciando o papel da transferência de energia entre o fruto e o ar, e possibilitando um ensino integrado de fundamentos da cinemática, da mecânica e das correlações entre física e biologia. A proposta apresenta, portanto, caráter interdisciplinar e tem o condão de ser utilizada nos diversos níveis de ensino.

Palavras-chave: Ensino de física. Ensino interdisciplinar. Videoanálise. Tracker. Anemocoria.

Abstract

*The teaching of physics in the present era offers opportunities to combine teaching technologies with innovative methodologies, aiming at interdisciplinary, non-segmented approaches that focus on the fundamentals of this science: the observation and selection of phenomena, the performance of experiments, mathematical modeling and the use of computer resources. In this paper, we present an experimental approach combined with scientific modeling for the study of anemochory (dispersal of seeds, pollen and fruits by the wind) in the context of physics classes. The experimental activities were carried out using video analysis through the Tracker software. Based on the characterization of the falling movement of the fruits of the species *Tipuana tipu* (sâmara), studies of kinematics, dynamics, conservation of energy and mechanical work were carried out to describe the falling movement and characterize the processes of conservation and transformation of energy. These experimental activities have been developed in a biology course that addresses the physical principles of fruit dropping and emphasizes the role of energy transfer between the fruit and the air, allowing for an integrated teaching of the fundamentals of kinematics, mechanics and of correlations between physics and biology. The proposal is therefore interdisciplinary and can be used at all levels of education.*

Keywords: *Physics teaching. Interdisciplinary teaching. Videoanalysis. Tracker. Anemochory.*

1. Introdução

A educação, na contemporaneidade, vivencia um momento conturbado, considerados os desdobramentos da pandemia. Além disso, no caso brasileiro, está em processo a inserção do Novo Ensino Médio, baseado na Base Nacional Comum Curricular (BNCC). Neste sentido, há importantes implicações para o ensino de física, com a proposta de integração ao conceito mais amplo de Ciências da Natureza. As novas práticas docentes agora enfrentam o desafio de alinhar e unir conteúdos pertencentes às áreas de ciências que antes eram abordados de maneira disciplinar. Emerge, então, a necessidade de proporcionar um “letramento científico” (BRASIL, 2018, p. 547) dos estudantes, visando a um aprendizado mediado pela interconexão de diversos aspectos da formação, incluindo resolução de problemas e análise de dados sustentados pelo uso e suporte da tecnologia. De fato, programas antigos de incentivo à ciência – PSSC (Chiaverina, 2006; Goldwasser, 2006), NUFFIELD (Barros *et al.*, 2015), PEF (Pacca, 1990) – já observavam a necessidade de investimento em práticas experimentais para o aprimoramento educacional, o que é retomado e amplificado com os desafios demandados pela nova BNCC. Por exemplo, a habilidade EM13CNT301 versa sobre a utilização da experimentação para:

“Construir questões, elaborar hipóteses, previsões e estimativas, empregar instrumentos de medição e representar e interpretar modelos explicativos, dados e/ou resultados experimentais para construir, avaliar e justificar conclusões no enfrentamento de situações-problema sob uma perspectiva científica.” (BRASIL, 2018, p. 559).

Sendo assim, os cursos que preparam os futuros professores devem estar voltados para a formação consciente de profissionais que estarão, em pouco tempo, à frente de processos que se desenrolam em um mundo tão dependente de tecnologia. Entretanto, os conteúdos não são os únicos elementos que deveriam se integrar às necessidades educacionais atuais. Este processo deve ser mediado por ações que utilizem práticas, metodologias e equipamentos modernos, presentes na vida de estudantes e professores para que ocorra uma potencialização no desenvolvimento de habilidades e competências. Busca-se, então, para as Ciências da Natureza e suas tecnologias:

“Investigar situações-problema e avaliar aplicações do conhecimento científico e tecnológico e suas implicações no mundo, utilizando procedimentos e linguagens próprios das Ciências da Natureza, para propor soluções que considerem demandas locais, regionais e/ou globais, e comunicar suas descobertas e conclusões a públicos variados, em diversos contextos e por meio de diferentes mídias e tecnologias digitais de informação e comunicação (TDIC).” (BRASIL, 2018, p. 553).

Seria o caso de apontar outras habilidades (EM13CNT204, EM13CNT205, EM13CNT301, EM13CNT302) (BRASIL, 2018, p. 554 – 560) presentes na BNCC que ressaltam a importância de discussões científicas mediadas pelo uso de tecnologias como ferramentas imprescindíveis ao processo de ensino e aprendizagem.

É neste contexto mais geral que se insere o trabalho aqui apresentado. O estudo da dispersão de sementes mediada pelo vento (anemocoria) apresenta-se como uma intersecção entre os conhecimentos de física e biologia, propiciando atividades que estejam relacionadas às habilidades demandadas pela educação brasileira atual, incluindo a inserção circunstanciada e crítica de tecnologia, no caso, a videoanálise por meio do programa Tracker (Lenz *et al.*, 2014; Peres *et al.*, 2021). Configura-se assim uma articulação entre formação de professores, atividades mediadas por Tecnologias Digitais de Informação e Comunicação (TDIC), com a realização de prática experimental, englobando análise de dados e atividade interdisciplinar (Rangel *et al.*, 2012; Luca *et al.*, 2018). Isto desponta como uma atividade singular, mas exemplar e de impacto, que também dialoga com o ensino de física, ensino este que, cada vez mais, busca dialogar com a contemporaneidade (Silva *et al.*, 2019; Studart, 2021; Moreira, 2021).

2. Metodologia

2.1 Amostras

Os frutos alados, chamados de sâmara, (Martins e Oliveira, 2001) foram coletados de algumas árvores encontradas no campus de Rio Claro da Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho (UNESP). Estes frutos possuem o formato de uma hélice, como apresentado na Figura 1.



FIGURA 1: Imagem fotográfica do fruto tipo sâmara utilizados no experimento.

Dentre os frutos coletados, foram selecionados ao acaso sete exemplares. Os frutos selecionados foram caracterizados quanto a sua massa e área superficial. As massas destes frutos foram determinadas com uma balança digital e as áreas das faces dos frutos foram estimadas. Para isso, a massa de folhas de papel com o contorno de cada um dos frutos foi obtida e comparada à massa de um quadrado com área de 1 cm² do mesmo papel. Os resultados obtidos para a massa e a área das faces dos frutos alados estão apresentados no Quadro 1.

Quadro 1: Dados de massa e área obtidos dos sete frutos selecionados ao acaso.

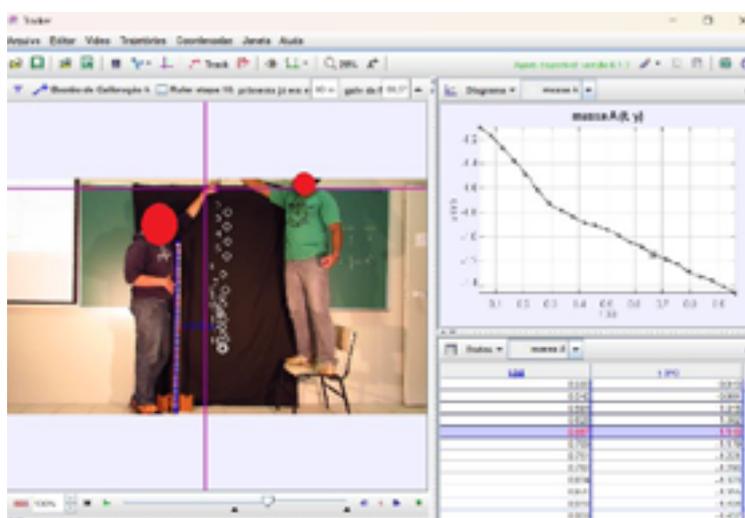
FRUTO	MASSA DO FRUTO (g)	ÁREA DO FRUTO (cm ²)
I	0,2686 ± 0,0001	7,1 ± 0,7
II	0,3028 ± 0,0001	7,6 ± 0,8
III	0,3526 ± 0,0001	8,7 ± 0,9
IV	0,3641 ± 0,0001	9 ± 1
V	0,4005 ± 0,0001	10 ± 1
VI	0,4774 ± 0,0001	11 ± 2
VII	0,7688 ± 0,0001	13 ± 2

2.2 Metodologia para coleta

O aparato experimental para a caracterização do movimento de queda dos frutos alados foi composto por um tecido preto de 3x2 m², uma câmera fotográfica digital e uma escala graduada com 1,2 m de comprimento, conforme apresentado na Figura 2. Um tecido preto foi utilizado como pano de fundo durante a aquisição das imagens para melhor visualização dos frutos alados. A escala foi posicionada logo à frente do fundo preto e a câmera fotográfica foi posicionada, com uso de um tripé, a 2 m de distância do fundo preto e a 1 m de altura para minimização da paralaxe. Os frutos foram abandonados de uma altura de 2 m logo à frente do fundo preto e ao lado da escala de referência, enquanto a câmera fotográfica filmava o movimento (60 quadros por segundo). Em seguida foi utilizado o processo de videoanálise, definido como:

“...a videoanálise configura uma nova forma de ensinar física – e isto vai além da ideia de metodologia – porque a videoanálise possibilita mobilizar a tecnologia (o smartphone, o computador, as planilhas eletrônicas) juntamente com os objetos, que são os corpos em movimento cuja trajetória se deseja estudar, e os autores do processo, que são os estudantes e o professor.” (Bordin *et al.*, 2022)

Sendo assim, ao soltar a sâmara, é possível marcar a trajetória do fruto e analisar aspectos físicos relacionados à queda do corpo.

**FIGURA 2:** Imagem obtida a partir de um dos vídeos para caracterização do movimento dos frutos alados.

Com este aparato, foram realizadas coletas de imagens para caracterização do movimento de queda de cada um dos frutos alados descritos na seção 2.1. Para este estudo, foram considerados apenas os vídeos em que o fruto alado apresentou movimento unidirecional, isto é, aqueles em que não houve deslocamento dos frutos na direção paralela ao chão.

Os dados da posição dos frutos alados como função do tempo foram obtidos como grandezas escalares, utilizando o *software* livre Tracker (*Open Source Physics*). Estes dados foram coletados adotando-se o chão como origem do referencial e valores positivos para posições acima do chão.

2.3 Abordagem à Aprendizagem

O presente trabalho representa a organização de dados coletados durante o ensino dos conceitos da mecânica newtoniana para alunos dos cursos de licenciatura em Física e licenciatura em Biologia. No entanto, a aplicação dos conceitos discutidos pode ser desenvolvida também no ensino médio, possibilitando diferentes objetivos de aprendizagem. Para além dos conceitos discutidos e apresentados nesse trabalho, sugerimos a aplicação da metodologia de coleta e tratamento de dados para alunos do Ensino Médio como forma do professor engajar os estudantes em um problema real autêntico, conduzindo-os em uma aprendizagem potencialmente significativa.

A discussão sobre as metodologias de aprendizagem que podem ser potencializadas pelo uso da videoanálise é extensa e não cabe nesse trabalho. No entanto, para o professor da etapa do Ensino Médio, sugerimos a aplicação a partir dos princípios do planejamento reverso elaborado por Wiggins e McTighe (2019); ou a utilização da metodologia peer instruction (instrução pelos colegas), conforme descrito por Nascimento e Oliveira (2020), numa abordagem de ensino de funções afins e quadráticas e conceitos da cinemática. Ambas as sugestões permitem ao professor realizar um planejamento estratégico que possa abordar os seguintes objetivos de aprendizagem: capacitar o aluno na coleta e tratamento de dados, construção gráfica de funções matemática de primeiro e segundo grau, associar os parâmetros das funções matemáticas com grandezas físicas escalares da cinemática, determinar a equação horária para movimento acelerados e não acelerados, entre outros. Tais objetivos de aprendizagem incorporam o letramento científico preconizado pela BNCC, garantido através do “envolvimento em processos de leitura, comunicação e divulgação do conhecimento científico, fazendo uso de imagens, gráficos, vídeos, notícias, com aplicação ampla das tecnologias da informação e comunicação” (BRASIL, 2018, pg.551).

3. Resultados e Discussão

Com a metodologia da coleta de dados proposta, foram obtidos os dados cinemáticos dos sete frutos alados durante o processo de queda. A partir destes dados, foi possível construir gráficos de posição $y(t)$, velocidade $v(t)$ e aceleração $a(t)$ dos frutos em função do tempo. A Figura 3 apresenta

os gráficos correspondentes ao movimento do fruto alado VII. Todos os dados apresentados ao longo do texto serão relativos ao fruto VII, ao menos que se especifique o contrário.

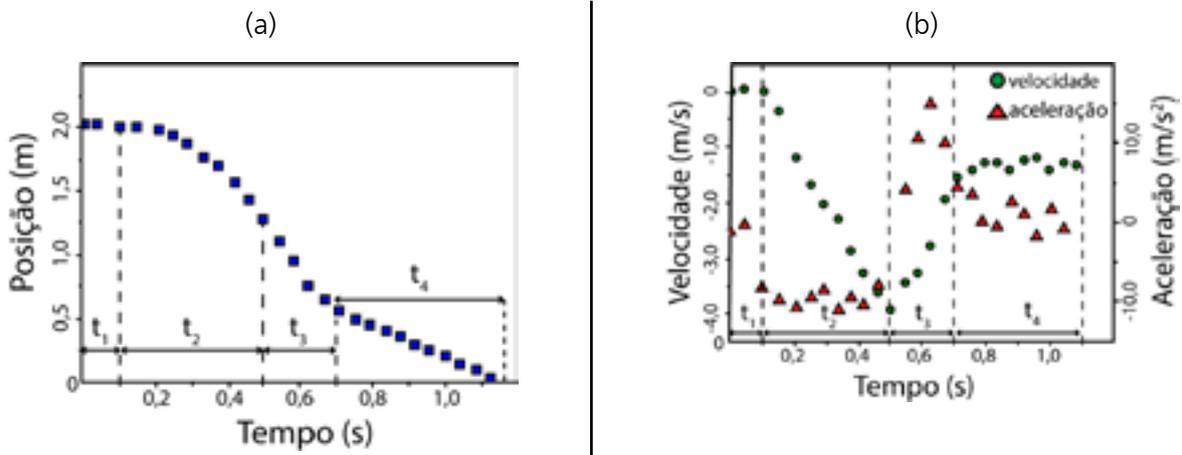


FIGURA 3: Dados coletados do movimento de queda do fruto VII:

(a) posição vs. tempo e em (b) velocidade vs. tempo e aceleração vs. tempo.

Conforme representado pela Figura 3, os resultados apresentam, do ponto de vista cinemático, comportamentos distintos ao longo do tempo, os quais serão discriminados pelos intervalos de tempo de t_1 a t_4 (Figura 3(a)). Nos instantes iniciais (t_1), para tempos inferiores a 0,1 s, verificou-se invariância da posição, bem como velocidade e aceleração nulas. Este intervalo de tempo corresponde àquele anterior ao fruto alado ser abandonado. Para tempos entre 0,1 e 0,5 s (t_2), o movimento de queda do fruto apresentou características de movimento uniformemente variado (MUV): aumento do módulo da velocidade, aceleração constante (aproximadamente -10 m/s^2) e variação da posição sendo matematicamente descrita por uma função parabólica com concavidade voltada para baixo, em concordância com os valores da aceleração. Neste intervalo de tempo, o fruto alado apresentou orientação vertical, na qual a asa do fruto se posiciona paralelamente ao deslocamento (Figura 4).

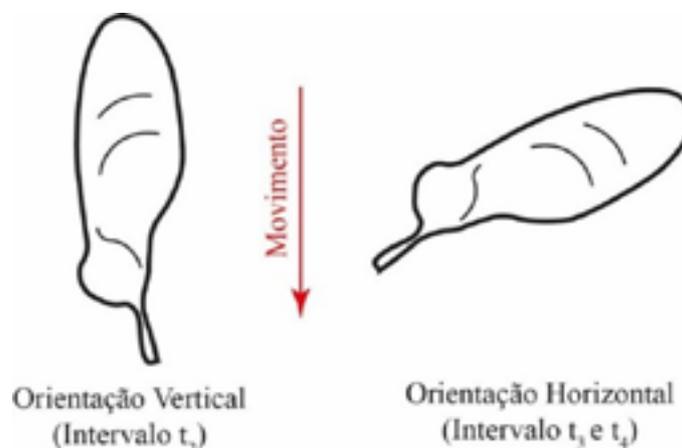


FIGURA 4: Esquema da orientação do fruto alado em relação ao movimento.

Para tempos entre 0,5 e 0,7 s (t_3), o fruto alado passa da orientação vertical para a orientação horizontal, onde a asa do fruto se posiciona obliquamente ao movimento e inicia o típico movimento giratório. Neste intervalo de transição, as velocidades dos frutos tiveram suas magnitudes reduzidas por um processo em que a aceleração apresentou dependência temporal. Para tempos superiores a 0,7s (t_4), os frutos apresentaram variações uniformes (lineares) da posição em função do tempo, com velocidade aproximadamente constante ($\sim 1,3$ m/s) resultante da aceleração ter valores que oscilam próximo de zero nesse intervalo. Neste intervalo de tempo, pode-se caracterizar o movimento como inercial ou movimento uniforme. Esta análise indica que o fenômeno natural da queda das sâmaras possibilita discussões acerca de quatro situações tipicamente abordadas no ensino da cinemática: o repouso (t_1), o movimento uniformemente variado (t_2), o movimento com aceleração variável (t_3) e o movimento uniforme (t_4). Além disso, este experimento permite a conexão direta entre fundamentos da cinemática, da dinâmica e de conservação da energia.

Considerando os dados de aceleração em função do tempo (Figura 3(b)), foi possível determinar, a partir da 2ª Lei de Newton, a força resultante que age sobre o fruto alado durante todos os intervalos de movimento de queda, como apresentado na Figura 5(a). Em consonância com a análise cinemática, pode-se verificar uma força resultante nula no intervalo t_1 , quando o experimentador exerce sobre o fruto alado uma força de igual intensidade, mesma direção e sentido oposto à força peso com o objetivo de manter o fruto alado em uma posição fixa. Seguindo com uma análise equivalente, ao cessar a força que o experimentador exerce sobre o fruto, uma força resultante constante, com magnitude de $7,5 \pm 0,8$ mN, correspondente a força peso, atua sobre o fruto durante o intervalo t_2 . Muito embora as forças de arraste estejam sempre presentes quando da queda em meios materiais, no intervalo t_2 , o fruto cai sob a ação majoritária da atração gravitacional. Neste intervalo de tempo, devido à orientação vertical dos frutos, a força de arraste apresenta magnitude desprezível (Figura 5(b)) em relação à força peso. Assim, o movimento do fruto pode, em boa aproximação, ser considerado como de queda livre, o qual é mais comumente abordado no contexto na educação básica.

Contudo, no contexto da experimentação aqui apresentada, a partir do caráter estacionário da força peso, foi possível quantificar também a força de arraste, dado que a força resultante obtida experimentalmente (\vec{F}_{Res}) é composta pela adição da força de arraste ($\vec{F}_{arraste}$) e da força peso ($m\vec{g}$), onde m representa a massa do fruto alado e g a aceleração de atração gravitacional:

$$\vec{F}_{Res} = m\vec{g} + \vec{F}_{arraste} \quad (1)$$

Portanto, a partir de uma aplicação direta da 2ª Lei de Newton (Equação 1), foi possível quantificar a força de arraste ao longo do tempo (Figura 5(b)). Deste modo, no intervalo t_2 ,

em que o movimento é aproximadamente de queda livre, a força de arraste possui módulo aproximadamente nulo. Porém, durante o intervalo t_3 , a força resultante muda de sentido devido à ação da força de arraste, a qual resulta da mudança de orientação do fruto alado. Nesse intervalo, a força de arraste passa a retardar o movimento de queda do fruto. O módulo da força de arraste, neste intervalo de tempo, varia de zero ($t = 0,4$ s) até 20 mN ($t = 0,6$ s). No equilíbrio, intervalo t_4 , como se pode verificar na Figura 5, a força de arraste apresenta igual magnitude e sentido oposto à força de atração gravitacional ($\vec{F}_{Res} = 0$) e o fruto passa a se deslocar com velocidade constante (velocidade limite) com módulo de aproximadamente 1,2 m/s (Figura 3(b)).

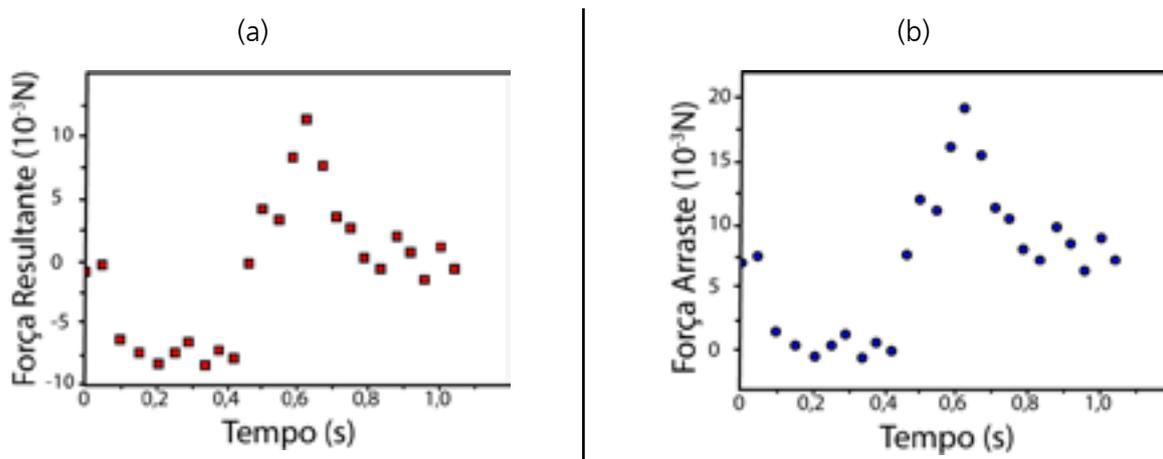


FIGURA 5: Dados da força que atua sobre o fruto alado – VII como funções do tempo; (a) da força resultante obtida diretamente pelo produto entre a aceleração e a massa do fruto; (b) da força obtida pela diferença entre a força resultante e a força de atração gravitacional entre o fruto alado e a Terra

Com esta metodologia, podemos associar os fundamentos de dinâmica com aqueles da cinemática. No intervalo inercial t_1 , de equilíbrio estático, a força resultante que atua sobre o fruto alado apresenta-se como nula. No intervalo t_4 , no qual uma nova condição inercial é verificada, a nulidade da força resultante também é verificada. Por outro lado, na condição em que, em boa aproximação, apenas a força de atração gravitacional atua sobre o fruto alado (intervalo t_2) verifica-se movimento uniformemente variado, especificamente um movimento acelerado retrógrado ($v < 0$ devido ao referencial adotado), típico do fenômeno de queda livre. E, por fim, no intervalo t_3 , no qual a força de arraste que se opõe ao movimento apresenta magnitude dependente do tempo, o sistema apresenta movimento com aceleração variável.

Para além das correlações entre os fundamentos da cinemática e da dinâmica, a ação de uma força conservativa e dissipativa permite ao problema estudado uma abordagem integrada dos fundamentos da conservação e da transferência de energia. A Figura 6 apresenta o gráfico das energias potencial gravitacional, cinética e mecânica (encarte do gráfico) do fruto alado como funções do tempo. A energia potencial gravitacional do fruto apresentou um padrão de variação

no tempo análogo àquele da posição em relação ao tempo (Figura 2(a)), uma vez que estes dados foram obtidos diretamente pelo produto da posição do fruto com a força peso. A energia cinética, por sua vez, foi obtida a partir da velocidade do fruto alado, apresentando tendências análogas às desta variável.

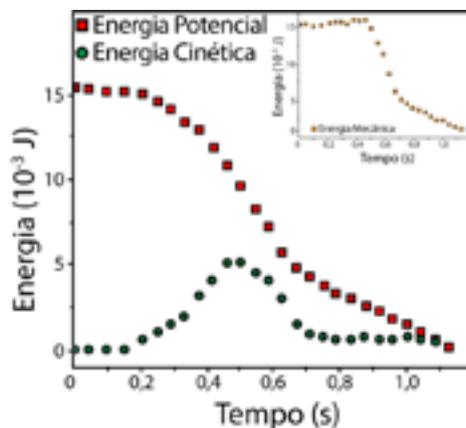


FIGURA 6: Gráficos das energias em função do tempo obtidos da caracterização do movimento do fruto alado – VII: energia potencial gravitacional, cinética e mecânica.

Em concordância com as análises anteriores da dinâmica e da cinemática, os intervalos t_1 e t_2 correspondem ao período no qual o movimento de queda do fruto pode ser descrito pela ação majoritária da força conservativa, nominalmente a força peso. No instante inicial ($t = 0s$), o fruto possui apenas energia potencial gravitacional. Para instantes posteriores, $0 < t < 0,5 s$, o fruto passa a ter sua energia potencial gravitacional convertida em energia cinética como resultado do trabalho realizado pela força peso. Ao longo dos intervalos t_1 e t_2 , a energia mecânica permaneceu com valores aproximadamente constantes, conforme evidenciado no encarte da Figura 6, indicando a razoabilidade de se desprezar a ação da força de arraste dissipativa segundo o Teorema da Conservação da Energia Mecânica (Equação 2) (Halliday *et al.*, 1996):

$$\Delta E_{mec} = \Delta K + \Delta U = 0, \quad (2)$$

onde ΔE_{mec} representa a variação da energia mecânica, ΔK representa a variação da energia cinética e ΔU a variação da energia potencial. Nos intervalos t_3 e t_4 , a atuação da força de arraste muda a dinâmica-cinemática do sistema e, devido a ela, verifica-se uma sistemática redução da energia mecânica do fruto com o passar do tempo; ou seja, a força de arraste provoca a dissipação de energia do sistema. Para sistemas com forças não-conservativas, a energia mecânica do sistema possui um decréscimo dado pelo trabalho realizado pela força não-conservativa. Matematicamente (Equação 3), expressamos a afirmação acima por (HALLIDAY):

$$\Delta E_{mec} = -f_{n.c.} \cdot d \quad (3)$$

onde $-f_{n.c.}d$ representa a força não-conservativa e “d” a distância percorrida pelo corpo sob ação da força não-conservativa. Portanto, como a força de arraste promove uma redução da energia mecânica do sistema, podemos afirmar que ela se caracteriza como sendo uma força dissipativa e, portanto, podemos associar a essa força uma taxa temporal de conversão dessa energia.

A Figura 7(a) representa os dados do trabalho e da potência dissipada pela força de arraste em função do tempo. A potência dissipada (Equação 4) foi obtida a partir da taxa de variação temporal do trabalho realizado,

$$P_{diss} = \frac{dW(t)}{dt} \quad (3)$$

ou seja, foi obtida a partir da diferenciação da curva do trabalho em relação ao tempo, $W(t)$. Como a força de arraste passa a ter relevância para instantes $t \geq 0,5$ s, o trabalho e a potência dissipada por essa força nos intervalos t_1 e t_2 são nulos. Ao longo do intervalo t_3 , ocorre um súbito aumento do trabalho realizado como consequência do surgimento da força de arraste e, no intervalo t_4 , o trabalho passa a ter acréscimos menores devido à constância da força de arraste (Figura 5(b)). A potência dissipada apresenta um máximo (60 mW) no instante $t = 0,6$ s, correspondente ao instante em que a força de arraste apresenta a magnitude máxima (20 mN). No intervalo t_4 , durante o qual a velocidade do fruto foi aproximadamente constante, a potência dissipada foi aproximadamente constante e com intensidade de (11 ± 2) mW.

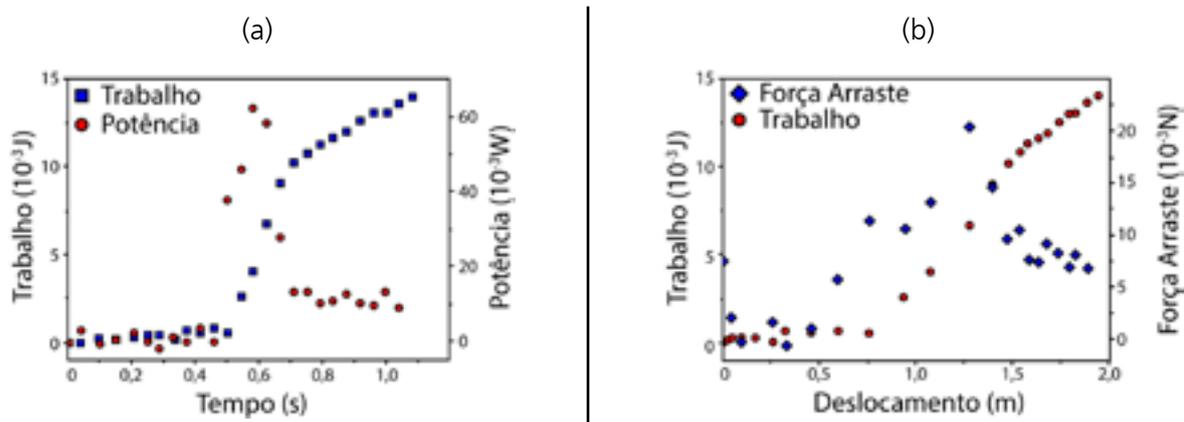


FIGURA 7: (a) Trabalho mecânico e potência de dissipação em função do tempo; (b) trabalho mecânico e magnitude da força dissipativa em função do deslocamento

A força de arraste pode ser determinada por dois procedimentos distintos, um deles a partir dos fundamentos de dinâmica (Método Dinâmica Newtoniana), Figura 5(b), e outro a partir do fundamento de trabalho mecânico (Método Diferencial da Energia), Figura 7(b). Os resultados obtidos por esses dois procedimentos foram equivalentes, demonstrando a correlação entre os

fundamentos de dinâmica e de conservação/dissipação da energia. Independentemente do método empregado para a determinação da força de arraste, foi possível determinar a dependência da força de arraste com a velocidade relativa do fruto em relação ao fluido (considerado estático). Para tanto, se avaliou a magnitude da força de arraste e da velocidade dos frutos nos regimes em que a força de arraste não foi desprezível, isto é, nos intervalos t_3 e t_4 . Estes resultados estão apresentados na Figura 8(a), onde se verifica uma dependência linear do logaritmo da magnitude da força de arraste com o logaritmo da velocidade dos frutos, conforme apresentado na Equação 4(a). Deste modo, pode-se determinar empiricamente a dependência da força de arraste com a velocidade do fruto (Equação 4(b)).

$$\log(F_{arraste}) = \log(k) + n \cdot \log(v) \quad (4a)$$

$$F_{arraste} = kv^n \quad (4b)$$

onde k e n são constantes empíricas que podem ser determinadas a partir do ajuste linear dos dados. O ajuste dos dados obtidos do fruto adotado como exemplo neste estudo está representado na Figura 8(a) pela reta tracejada e determina o expoente n como $(1,1 \pm 0,2)$ e a constante de proporcionalidade k como $(6,46 \pm 0,07) \times 10^{-3}$ N.s/m.

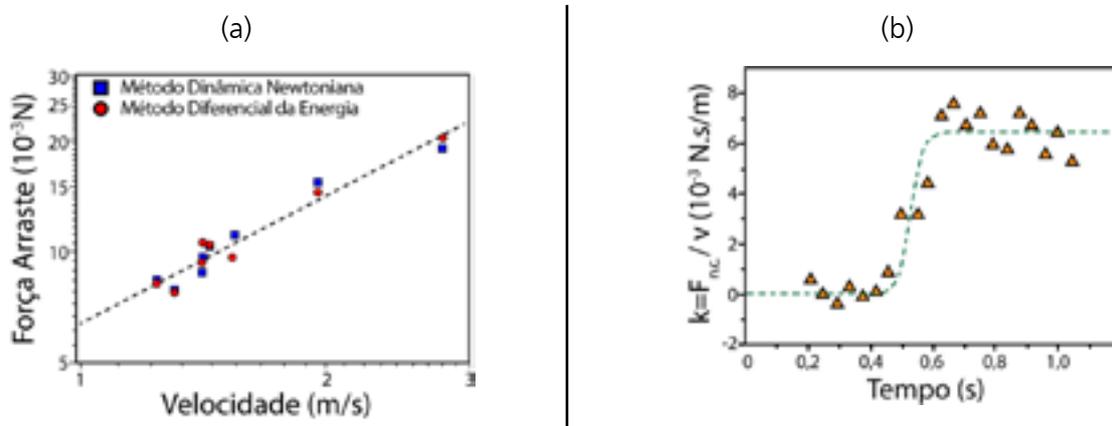


FIGURA 8: (a) Força dissipativa em função da velocidade do fruto alado; (b) constante de proporcionalidade da força dissipativa em função do tempo

Assumindo o expoente n como sendo unitário para este fruto específico, é possível determinar a constante de arraste k como uma função do tempo. Tomando a relação da Equação 4(b) dependente do tempo, $k(t) = \frac{F_{arraste}(t)}{v(t)}$, podemos graficar $k(t)$ conforme representado na Figura 8(b). Em conformidade com os estudos da cinemática, dinâmica e conservação da energia, verificou-se que nos intervalos t_1 e t_2 , intervalos em que o fruto se encontra com orientação vertical, a constante de proporcionalidade é nula, de maneira que não há força dissipativa significativa atuando sobre o fruto alado. Nos intervalos em que o fruto se encontra com orientação horizontal, em t_3 e t_4 , a constante de proporcionalidade foi não nula, apresentando um comportamento de crescimento no intervalo t_3 , e tendendo ao valor estacionário

de $(6,5 \pm 0,8) \cdot 10^{-3} \text{ N.s/m}$ no intervalo t_4 . A partir do momento em que as forças de arraste e peso se equilibram (intervalo t_4), o movimento torna-se estacionário e o fruto passa a cair com uma velocidade constante denominada de velocidade limite. Essa mesma fenomenologia é o motivo pelo qual uma gota de chuva, por exemplo, chega ao solo com uma velocidade constante.

Deste modo, a evolução temporal da constante de proporcionalidade foi representada por uma função empírica, Equação 5.

$$k(t) = k_0 \left[1 - \frac{1}{1 + \exp\left(\frac{t - t_0}{\sigma}\right)} \right] \quad (5)$$

onde k_0 representa a constante de arraste no regime estacionário, t_0 representa o instante de tempo em que ocorre a transição da orientação vertical para a orientação horizontal e σ representa a duração do processo de transição. Com o ajuste dos dados experimentais, foram obtidos os valores de $(6,5 \pm 0,8) \cdot 10^{-3} \text{ N.s/m}$ para a constante k_0 , $(0,633 \pm 0,006) \text{ s}$ para t_0 e $(15 \pm 6) \cdot 10^{-3} \text{ s}$ para a constante σ .

Com este procedimento, realizamos o estudo do movimento dos sete frutos alados apresentados na seção 2.1. Contudo, para a análise conjunta dos dados obtidos de todos os frutos, empregamos a normalização apresentada na Equação (6).

$$\frac{F}{F_0} = \left(\frac{V}{V_0} \right)^n \quad (6)$$

onde F_0 e V_0 representam, respectivamente, a força de arraste e a velocidade do fruto no regime estacionário (intervalo t_4). A Figura 9(a) apresenta os dados experimentais ajustados pela Equação 6.

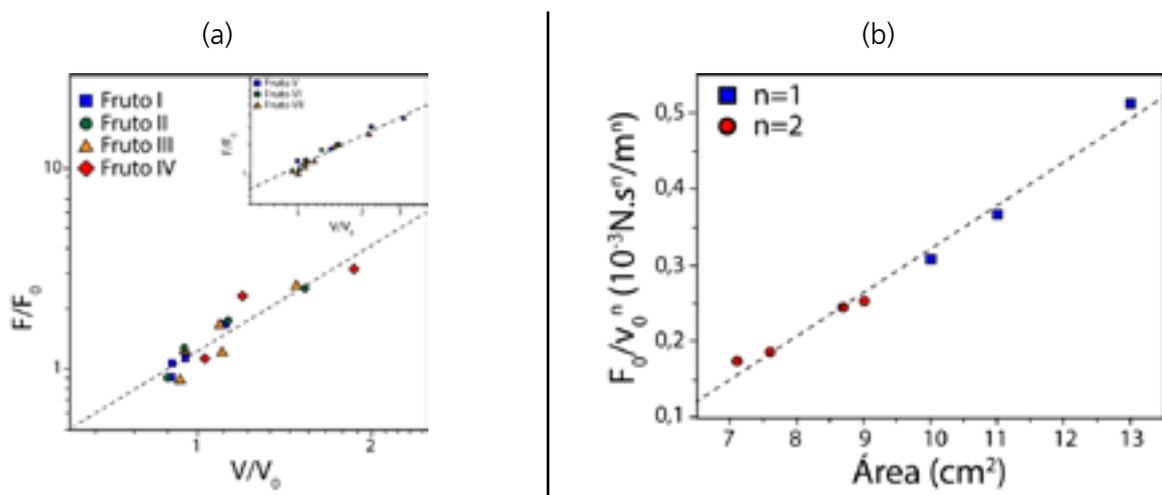


FIGURA 9: Força dissipativa em função da velocidade do fruto alado: (a) para os frutos I a IV, e, no encarte, para os frutos V a VII; em (b) dependência da constante de arraste em função da área do fruto

Podemos identificar na Figura 9(a) dois comportamentos distintos dos frutos alados: os frutos I a IV apresentaram potência n igual a $(1,9 \pm 0,3)$, e os frutos V a VII apresentaram potência n igual a $(1,1 \pm 0,8)$. Embora estes valores sejam iguais considerando a incerteza experimental, os frutos que apresentam maior área e maior massa estão sujeitos a uma força de arraste proporcional a sua velocidade, enquanto os frutos que possuem menor massa e menor área sofrem a ação da força de arraste proporcional ao quadrado de sua velocidade. A Figura 9(b) apresenta a constante de arraste obtida para cada um dos frutos alados, no regime estacionário, em função da área destes frutos. Estas constantes foram obtidas dos dados de força de arraste e velocidade no regime estacionário e demonstram que, independentemente do valor da potência n , a constante de arraste k foi proporcional à área do fruto.

Com base nos resultados anteriores, é possível equacionar todo o fenômeno de queda dos frutos alados com base na Segunda Lei de Newton, conforme descrito pela Equação 7,

$$g - \frac{k(t)}{m} (\dot{y}(t))^n = \ddot{y}(t), \quad (7)$$

onde g representa a aceleração da atração gravitacional, m representa a massa do fruto alado; $y(t)$, a posição do fruto; n , o expoente da força de arraste e $k(t)$ é a constante de arraste em função do tempo (Equação 5 e Figura 8(b)). Nos intervalos em que a função $k(t)$ apresenta valores independentes do tempo, é possível solucionar a equação (7) analiticamente. No intervalo t_2 , para o qual $k(t)$ é aproximadamente nulo, a solução da equação (7) é apresentada pela Equação 8 e descreve o movimento de queda livre.

$$\ddot{y}(t) = g \quad (8a)$$

$$\dot{y}(t) = g \cdot t \quad (8b)$$

$$y(t) = \frac{1}{2} g \cdot t^2 \quad (8c)$$

Contudo, no intervalo t_4 , para o qual $k(t) = k_0$, a solução da Equação (7) descreve a queda com arraste. Nesta condição, para $n=1$, a solução da Equação (7) segue conforme apresentado na Equação (9).

$$\ddot{y}(t) = \left(g - \frac{k_0}{m} v_4 \right) \exp \left(-\frac{k_0}{m} \cdot t^* \right) \quad (9a)$$

$$\dot{y}(t) = \frac{m}{k_0} g + \left(v_4 - \frac{m}{k_0} g \right) \cdot \exp \left(-\frac{k_0}{m} \cdot t^* \right) \quad (9b)$$

$$y(t) = \frac{m}{k_0} g t^* + \frac{m}{k_0} \left(\frac{m}{k_0} g - v_4 \right) \exp \left(-\frac{k_0}{m} \cdot t^* \right) + \beta \quad (9c)$$

onde $\beta = y_4 + \frac{m}{k_0} \left(v_4 - \frac{m}{k_0} g \right)$, $t^* = t - t_4$. As soluções apresentadas na Equação (9) devem respeitar as seguintes condições de contorno: no instante inicial, quando a força de arraste passa a ser constante, $t = t_4$, $\dot{y}(t_4) = v_4$ e $y(t_4) = y_4$. Além disso, para tempos muito longos $t \rightarrow \infty$, $\ddot{y}(t) \rightarrow 0$, em conformidade, $m \cdot g = k_0 \cdot \dot{y}(t \rightarrow \infty)$ e, como consequência, $\dot{y}(t \rightarrow \infty) = \frac{m \cdot g}{k_0}$.

A Figura 10 (a) apresenta a comparação entre os resultados experimentais e os teóricos apresentados nas equações (8) e (9). Nesta figura, se verifica que os resultados teóricos apresentam boa correspondência à experimentação apenas nos limites em que $k(t)$ é independente do tempo; isto é, para os intervalos t_2 e t_4 . Contudo, para o intervalo t_3 , onde $k(t)$ é dependente do tempo, o resultado teórico obtido analiticamente não representa os resultados experimentais satisfatoriamente. Para obter uma resolução teórica mais geral, válida para quaisquer valores de n e para quaisquer instantes de tempo, a equação (7) pode ser solucionada numericamente considerando-se $k(t)$ conforme descrito na equação (5). Deste modo, é possível obter resultados teóricos correspondentes àqueles experimentais para quaisquer instantes, conforme se apresenta na Figura 10 (b).

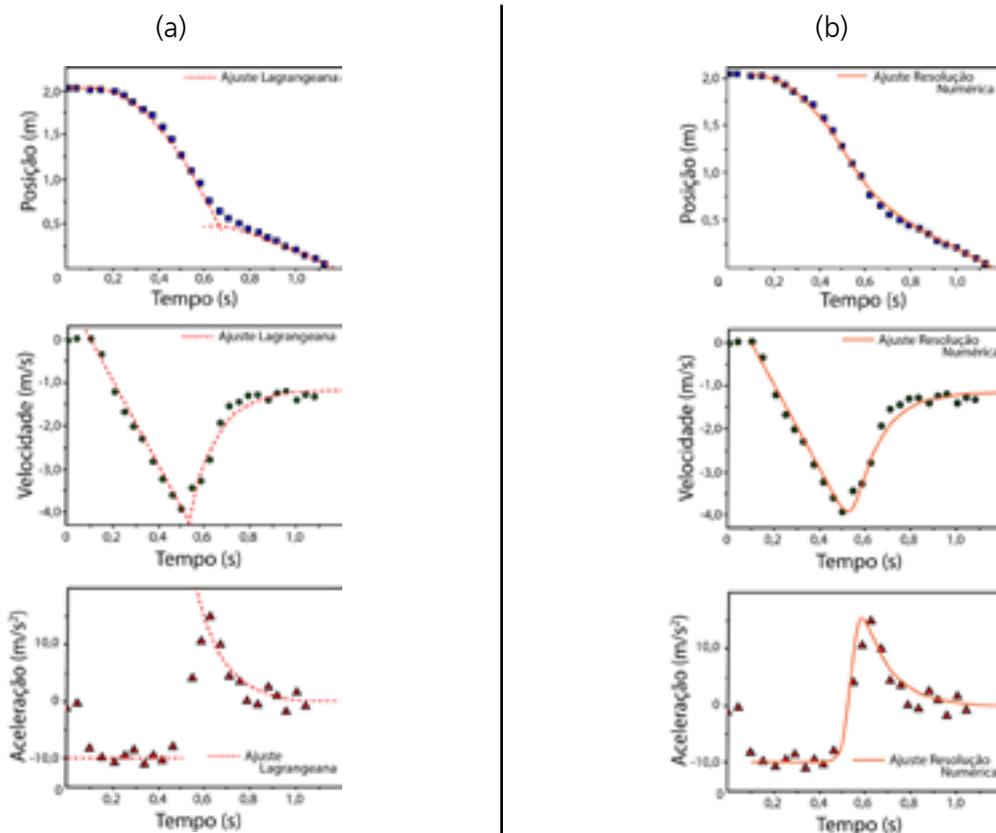


FIGURA 10: Representação das equações de movimento do fruto alado VII a partir (a) da resolução analítica das equações de movimento e (b) da resolução numérica das equações de movimento. Em ambos os casos, assumiu-se uma dependência da força dissipativa com o tempo

4. Conclusão

No presente estudo, apresentamos a caracterização do movimento de queda de frutos alados da espécie *Tipuana tipu* (sâmara) com o objetivo de integrar a dispersão de sementes mediada pelo vento (anemocoria) às aulas de ensino dos conteúdos sobre mecânica newtoniana e cinemática. O conteúdo abordado se utilizou do potencial de um laboratório livre, onde o estudante pode estar em contato com o objeto de estudo presente em seu cotidiano. No nosso trabalho, a interdisciplinaridade entre física e biologia foram utilizados para apresentar o conceito de anemocoria. A partir de uma abordagem investigativa e centrada nos alunos, foi utilizado o *software Tracker* para aquisição de dados: dependência temporal da posição dos frutos alados durante a queda. A partir deste conjunto de dados, foi possível a abordagem de diversos fundamentos de cinemática, dinâmica, conservação da energia e trabalho, forças dissipativas e modelagem matemática em mecânica clássica.

O estudo da queda de frutos alados possibilitou a investigação e a modelagem de diferentes fundamentos de cinemática, tais como, repouso, movimento uniforme, movimento uniformemente acelerado e movimento com aceleração variável, colocando em evidência o uso de novas tecnologias para o tratamento dos dados na descrição fenomenológica do movimento. A experimentação a céu aberto possibilitou ao estudante vivenciar o realismo do movimento através do movimento não ideal, sujeito a ação de forças não conservativas: força de arraste. Nesta perspectiva, a abordagem experimental permitiu a quantificação da força dissipativa (força de arraste), utilizando os fundamentos da dinâmica newtoniana, descrevendo sua dependência temporal, com a velocidade e com a área do objeto.

Sumariamente, o trabalho apresenta a caracterização do movimento de queda de frutos alados de *Tipuana tipu* (sâmara) como alternativa para a integração de diferentes fundamentos de mecânica clássica, abordando desde os conceitos de cinemática e dinâmica à modelagem matemática de sistemas não-conservativos. Para além do núcleo disciplinar, por se tratar da caracterização do processo físico envolvido na anemocoria, a experimentação a céu aberto pôde favorecer uma abordagem interdisciplinar entre física e biologia. Portanto, a prática em um laboratório livre possui grandes potencialidades na realização de atividades experimentais conceitualmente mais elaboradas e laboratorialmente menos complexas e que abordam efeitos reais.

Agradecimentos

Os autores agradecem as instituições de ensino Unesp, UFSCar e UTFPR por acreditarem na ciência e apoiarem o seu desenvolvimento, bem como a melhoria na educação pública.

Referências

- BARROS, L. G.; CERQUEIRA Jr, W. & DUTRA, G. **Física Moderna no Ensino Médio: O que o Projeto Nuffield de Física tem a nos dizer?** In: X Encontro Nacional de Pesquisa em Educação em Ciências, Águas de Lindóia, 2015.
- BORDIN, G. D.; PERES, M. V.; FLORCZAK, M. A.; LENZ, J. A. & BEZERRA Jr, A. G. **Uma Revisão Sistemática de Literatura sobre a Utilização do Software de Videoanálise Tracker em Alguns Periódicos Brasileiros.** Revista Abakós, v. 10, n. 1, p. 89-116, 2022.
- BRASIL. **Ministério da Educação.** Base Nacional Comum Curricular. Brasília, 2018.
- HIAVERINA, C. **Teaching PSSC Physics: a remembrance of things past.** (American Association Physics Teachers, 2006).
- CUPANI, A. **Filosofia da tecnologia: um convite** (Editora da UFSC, Florianópolis, 2011).
- DE LUCA, G.; DOS SANTOS, S. A.; DEL PINO, J. C. & PIZATTO, M. C. **Experimentação contextualizada e interdisciplinar: uma proposta para o ensino de ciências.** Revista Insignare Scientia, v. 1, n. 2, 2018.
- GARCIA, V. G. **A videoanálise como mediadora da modelagem científica no Ensino de Mecânica.** Revista Brasileira de Ensino de Ciência e Tecnologia v. 10 (3) (2017).
- GOLDWASSE, E. **Reminiscences: PSSC Experiences Revisited** (American Association of Physics Teachers, 2006).
- HALLIDAY, D.; RESNICK, R. & WALKER, J. **Fundamentos de Física** (LTC – Livros Técnicos e Científicos Editora S.A., Rio de Janeiro, 1996), 4a ed., v. 1.
- LENZ, J. A.; SAAVEDRA FILHO, N. C. & BEZERRA Jr, A. G. **Utilização de TIC para o estudo do movimento: alguns experimentos didáticos com o softwareTracker.** Revista Abakós, v. 2, n. 2, Belo Horizonte, 2014.
- MARTINS, M. A. G. & OLIVEIRA, D. M. T. **Morfo-anatomia e ontogênese do fruto e da semente de Tipuana tipu (Benth.) O. Kuntze (Fabaceae: Faboideae),**

Revista Brasileira de Botânica, v. 24(1), 109-121, 2001.

MOREIRA, M. A. **Desafios no ensino da física. Revista Brasileira de Ensino de Física**, v. 43, p. e20200451, 2021.

NASCIMENTO, C. B. C. & OLIVEIRA, A. L. **A Metodologia ativa de instrução pelos colegas associada à videoanálise de experimentos de cinemática como introdução ao ensino de funções.** Revista Brasileira de Ensino de Física, v.42, p.e20190162, 2020.

PACCA, J. **Análise do Desempenho de Alunos Frente a Objetivos do Projeto de Ensino de Física.** In: Pesquisas sobre o Ensino de Física – Resumo das Dissertações de Mestrado em Ensino de Ciências, modalidade Física, apresentadas nos anos de 1976 a 1982, org. Hamburger, Ernst. 1990.

PERES, M. V.; LENZ, J. A.; BEZERRA Jr, A. G. & BORDIN, G. D. **A produção de um material utilizando o softwareTracker para abordagem do experimento da difração de elétrons.** Revista Comunicações, v. 28, p. 71-93, 2021.

PERSSON, J. R. & HAGEN, J. E. **Videos Determine the Moon's "g".** Physics Education, v. 46, n. 1, p. 12-13, 2011.

RANGEL, F. O.; DOS SANTOS, L. S. F. & RIBEIRO, C. E. **Ensino de Física mediado por tecnologias digitais de informação e comunicação e a literacia científica.** Caderno Brasileiro de Ensino de Física, v. 29 (ed. Especial 1), 2012.

SAAVEDRA FILHO, N. C.; LENZ, J. A.; BEZERRA Jr A. G.; FLORCZAK, M. A. & GARCIA, V. G. **A videoanálise como mediadora da modelagem científica no Ensino de Mecânica.** Revista Brasileira de Ensino de Ciências e Tecnologia, v. 10, n. 3, Ponta Grossa, 2017.

SILVA, J. B.; SALES, G. L. E. & CASTRO J. B. **Gamificação como estratégia de aprendizagem ativa no ensino de Física.** Revista Brasileira de Ensino de Física, v. 41(4), 2019.

STUDART, N. **Complexidade na Física e seu Ensino: Apresentação da Edição Especial.** Revista Brasileira de Ensino de Física, v. 43, p. e20210031, 2021.

WIGGINS, G. & MCTIGHE, J. **Planejamento para a compreensão: alinhando currículo, avaliação e ensino por meio do planejamento reverso.** 2ª ed. (ampliada), Porto Alegre: Penso, 2019.

Sobre os autores

Rafael Henriques Longaresi

Possui graduação em Física Bacharelado pela Universidade Federal de São Carlos (2006), mestrado em Ciência e Engenharia de Materiais pelo Instituto de Física de São Carlos (2008) e doutorado em Ciências e Engenharia de Materiais pelo Instituto de Física de São Carlos (2012). Atualmente é professor Adjunto IV na Universidade Federal de São Carlos do Departamento de Física, Química e Matemática (DFQM) do Centro de Ciências e Tecnologias para a Sustentabilidade (CCTS) do campus Sorocaba. Possui experiência na área de Física, com ênfase em Física da Matéria Condensada atuando em projetos na área de pesquisa com ênfase no desenvolvimento de compósitos de matrizes poliméricas com reforços de fibras, cristais, moléculas conjugadas e TMDs (Transition Metal Dichalcogenides). A partir de 2021, dedica-se a atuar na área de ensino de física e ciências, desenvolvendo trabalhos e projetos com tema central no uso e aplicação de impressora 3D através da criação de objetos educacionais aplicados em metodologias ativas de forma estruturada - majoritariamente utilizando a aprendizagem baseada em projetos - e abordagens didáticas transdisciplinares envolvendo a educação STEAM e o movimento Maker.

email: longaresi@ufscar.br

Marcus Vinicius Peres

Doutor em Ensino de Ciências e Matemática pela Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Mestre em Ensino de Ciências pela UTFPR no Programa de Pós Graduação em Formação Científica, Educacional e Tecnológica (2016). Possui graduação em Licenciatura em Física pela Universidade Tecnológica Federal do Paraná (2015). Professor do ensino fundamental, médio e graduação de instituições de ensino presentes em Curitiba e região. Possui experiência nas áreas de Ensino de Física; Ensino de Física Moderna; Ensino de Ciências; Tecnologias Digitais de Informação e Comunicação; Videoanálise.

email: markinhusperes@gmail.com

Jorge Alberto Lenz

Possui graduação em Licenciatura Plena Em Física pela Universidade Federal de Santa Maria, mestrado em Física pela Universidade Federal de Santa Catarina e doutorado em Física pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Atualmente é Professor Titular do Ensino Básico Técnico e Tecnológico do Departamento Acadêmico de Física do Campus Curitiba da Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR). Tem experiência na área de Física, com ênfase em Propriedades Ópticas e Espectroscopia da Matéria Condensada; Outras Interações da Matéria com Radiações e Partículas, atuando principalmente nos seguintes temas: laser de alta potência, processamento com laser, ablação por laser (laser ablation), deposição de filmes finos por laser pulsado, corte de materiais com laser e formação de nanopartículas por ablação com laser. Atua no ensino de Física com tecnologias livres, em especial, a videoanálise.

email: lenz@utfpr.edu.br

Arandi Ginane Bezerra Jr

Possui Graduação em Física - UFPR (1990). Mestrado em Física - UFPR (1993). Doutorado em Física - UFPE (1999). Pós-doutorado em Biofísica - University of Guelph, Canadá (2003-2005). Pós-doutorado em Nanobiofotônica - University of Guelph, Canadá (2016-2017). Atualmente, é Professor Titular da Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR), atuando no Departamento Acadêmico de Física (DAFIS), no programa de pós-graduação *stricto sensu* em Formação Científica, Educacional e Tecnológica (PPGCET) - do qual é um dos fundadores - e no programa de pós-graduação *stricto sensu* em Física e Astronomia (PPGFA) - do qual também é um dos fundadores. Tem experiência nas áreas de: Nanofotônica, com ênfase na síntese de nanopartículas por ablação via laser, com ênfase em SERS e MEF; Fotônica, com ênfase em óptica não-linear; Biofísica, com ênfase em espectroscopia Raman e de infravermelho. Também atua no Ensino de Ciências, com ênfase em formação de professores e em divulgação científica, particularmente, no ensino de Física Moderna e Contemporânea, no ensino de Biologia e de Ciências, em Tecnologias Livres para laboratórios de ensino, e videoanálise. Em 2019, iniciou trabalhos na área de Educação Infantil. É coordenador do grupo de pesquisa "FotoNanoBio" e do grupo de pesquisa "Educação Infantil e Ensino de Ciências: Tensionamentos, Contextos, Relações e Culturas".

Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR), campus Curitiba.

email: lenz@utfpr.edu.br

Giovani Gozzi

Possui graduação em física pela Universidade Estadual Paulista nas modalidades de bacharelado e licenciatura, concluiu mestrado e doutorado em física aplicada na Universidade de São Paulo pelo Instituto de Física de São Carlos (IFSC). Desde 2014 trabalha como docente no Departamento de Física da Universidade Estadual Paulista, campus Rio Claro, realizando atividades de ensino, pesquisa e extensão universitária. Na dimensão ensino, atua tanto no núcleo disciplinar da física como no núcleo de ensino de física, com ênfase no uso e desenvolvimento de instrumentos de ensino. Durante nove anos, coordenou atividades de extensão universitária voltadas à difusão científica e tecnológica para estudantes da rede básica de ensino. Realiza pesquisa do campo da eletrônica impressa, com destaque ao desenvolvimento tecnológico em parceria com a indústria e à transferência de tecnologia para o setor produtivo. Atualmente, tem realizado ações de apoio à inovação tecnológica e ao desenvolvimento de políticas públicas para o setor em parceria com o poder público municipal.

Departamento de Física, Instituto de Geociências e Ciências Exatas, Universidade Estadual Paulista "Júlio de Mesquita Filho", Rio Claro, SP, Brasil.

email: giovani.gozzi@unesp.br