

MODELAGEM DE LIGAÇÕES QUÍMICAS ATRAVÉS DO OSCILADOR HARMÔNICO SIMPLES PARA ALUNOS DO 2º ANO DO ENSINO MÉDIO

Modeling chemical bonds using a simple harmonic oscillator for 2nd year high school students

Diego de Brito Silva [diego.brito@discente.ufma.br]
Eduardo Moraes Diniz [eduardo.diniz@ufma.br]

*Universidade Federal do Maranhão
Ave. dos Portugueses, 1966, Cidade Universitária Dom Delgado, São Luís - MA*

Recebido: 28/12/2025

Aceito: 27/03/2026

Resumo

As oscilações são fenômenos universais, mas, na Educação Básica, costumam restringir-se a sistemas massa-mola e pêndulos. Este trabalho propõe expandir esse ensino através do estudo de oscilações moleculares, utilizando os programas Avogadro e Desmos. Com o Avogadro, alunos do segundo ano do Ensino Médio visualizam modelos moleculares e energias vibracionais; com o Desmos, realizam o ajuste de curvas para determinar a constante de força k das moléculas. O objetivo central foi desenvolver um manual prático que facilite a integração dessas ferramentas digitais às aulas de ondulatória. Fundamentado na Teoria da Aprendizagem Significativa de David Ausubel, o Produto Educacional busca uma prática pedagógica dinâmica e contextualizada. Ao abordar fenômenos em escala microscópica, demonstra-se que a física transcende o mundo macroscópico, promovendo uma compreensão científica mais profunda e desenvolvendo habilidades tecnológicas valiosas em diversas áreas científicas.

Palavras-chave: oscilador harmônico simples; oscilações moleculares; aprendizagem significativa; Avogadro; Desmos.

Abstract

Oscillations are universal phenomena, yet in basic education, they are often restricted to mass-spring systems and pendulums. This work proposes expanding this teaching through the study of molecular oscillations using Avogadro and Desmos software. With Avogadro, high school students visualize molecular models and vibrational energies; with Desmos, they perform curve fitting to determine the force constant k of the molecules. The primary objective was to develop a practical manual to facilitate the integration of these digital tools into wave physics classes. Grounded in the Meaningful Learning Theory of David Ausubel, this educational product seeks a dynamic and contextualized pedagogical practice. By addressing phenomena at the microscopic scale, it demonstrates that physics transcends the macroscopic world, promoting a deeper scientific understanding and developing valuable technological skills across various scientific fields.

Keywords: simple harmonic oscillator; molecular oscillations; meaningful learning; Avogadro; Desmos.

1 Introdução

O estudo das oscilações moleculares representa um campo interdisciplinar com aplicações fundamentais em Física, Química e Biologia. Sistemas que exibem movimentos oscilatórios ao serem deslocados do equilíbrio estável conferem ao oscilador harmônico simples (ohs) uma relevância singular. Contudo, na Educação Básica, o ensino do ohs limita-se frequentemente aos sistemas massa-mola e pêndulo simples, o que restringe a percepção sobre a aplicabilidade do modelo. Conforme Taylor (2013) e Young & Freedman (2015), a utilidade das oscilações harmônicas abrange desde a regulação de cronômetros de quartzo até a precisão de relógios atômicos.

No nível microscópico, o modelo de ohs permite descrever as vibrações das ligações químicas, fornecendo subsídios para a compreensão da físico-química e da dinâmica da matéria (Atkins & de Paula, 2012). A transposição didática das vibrações moleculares apresenta-se como estratégia para superar as limitações curriculares e atender às competências científicas preconizadas pela Base Nacional Comum Curricular (Brasil, 2018). Esta abordagem permite integrar saberes de Física e Química de forma interdisciplinar, introduzindo temas de pesquisa contemporâneos.

Este estudo propõe a utilização dos programas Avogadro (Hanwell *et al.*, 2012), para modelagem molecular, e Desmos, para o ajuste de curvas e interpretação de dados. A literatura indica que o uso de ferramentas computacionais auxilia o processo de ensino-aprendizagem. Ferreira & González-Borrero (2005) discutem o potencial pedagógico da simulação no ensino de oscilações para a promoção de uma aprendizagem significativa. Complementarmente, o programa Avogadro demonstra eficácia na visualização de estruturas e ligações químicas (Batista *et al.*, 2018; Silva; Dias & Vasconcelos, 2020).

Para que o uso dessas tecnologias resulte em reestruturação cognitiva, a intervenção fundamenta-se na Teoria da Aprendizagem Significativa (TAS) de David Ausubel (Moreira & Masini, 1982). Para a TAS, o conhecimento prévio do estudante é o fator isolado mais importante para a aquisição de novos significados (Moreira & Masini, 1982).

Diante deste cenário, o presente trabalho descreve o desenvolvimento de uma abordagem didática voltada ao segundo ano do Ensino Médio, culminando na criação de um Produto Educacional (PE) em formato de manual didático. O recurso foca na determinação das constantes de força das moléculas de H_2 , O_2 e N_2 . O artigo detalha os pressupostos teóricos da TAS, a metodologia de modelagem e os resultados da aplicação do PE na promoção de um ensino de Física mais robusto e eficaz.

2 Fundamentação teórica: aprendizagem significativa e tecnologias

A TAS postula que o processo central da aprendizagem reside na organização e integração de novas informações à estrutura cognitiva preexistente do indivíduo. Essa ancoragem ocorre quando o conteúdo se relaciona de maneira não arbitrária e substantiva a conceitos relevantes já estabelecidos, denominados subsunçores (Moreira & Masini, 1982). Estes funcionam como pontos de apoio que permitem ao aprendiz atribuir significados próprios à nova unidade de conhecimento, em oposição à aprendizagem mecânica, na qual a informação é armazenada de forma isolada e efêmera.

Para que o aprendizado supere a memorização passiva, Moreira & Masini (1982) enfatizam que o material de ensino deve ser potencialmente significativo. Isso implica que o conteúdo possua significado lógico e que o estudante manifeste predisposição para aprender. No ensino de Física, a transição entre noções cotidianas e os conceitos científicos das vibrações moleculares exige estratégias que facilitem essa conexão fenomenológica.

Nesse cenário, a utilização de simuladores computacionais atua como mediador pedagógico estratégico. Ao integrar instruções diretas com a exploração interativa no Avogadro e no

Desmos, permite-se que o aluno visualize conceitos abstratos e teste hipóteses em tempo real. Conforme a Base Nacional Comum Curricular (Brasil, 2018), o uso dessas tecnologias é fundamental para potencializar a investigação científica e o pensamento crítico. A simulação do comportamento elástico das ligações químicas promove uma aprendizagem ativa e contextualizada, facilitando a construção de significados duradouros e preparando o estudante para compreender o mundo natural por meio do rigor metodológico.

3 Ferramentas computacionais e educação digital

As Tecnologias Educacionais (TE) atuam como mediadoras na produção e disseminação de conhecimento, permitindo a superação de barreiras temporais e espaciais. Para que essa integração ocorra de forma efetiva, é necessário que o docente desenvolva competências que permitam o empoderamento dos discentes e sua participação ativa no processo investigativo. No contexto da Física, o uso dos programas Avogadro e Desmos possibilita a conversão de conceitos abstratos em modelos dinâmicos e quantificáveis.

3.1 Programa Avogadro

O Avogadro é um editor molecular de código aberto utilizado para a modelagem e otimização da geometria molecular (Hanwell *et al.*, 2012). No âmbito deste estudo, a ferramenta permite a análise de frequências vibracionais e a extração de dados precisos sobre a distância interatômica em função da energia de vibração. Sua interface possibilita a visualização tridimensional, o que favorece a demonstração de conceitos como ligações químicas e hibridização no Ensino Médio.

3.2 Calculadora gráfica Desmos

A plataforma Desmos atua como uma ferramenta de visualização e manipulação de funções matemáticas em tempo real (Desmos, 2025). Por possuir arquitetura baseada em navegador e versão para dispositivos móveis, a ferramenta facilita o acesso em ambientes educacionais. No presente trabalho, o Desmos é empregado para o tratamento estatístico dos dados oriundos do Avogadro, permitindo o ajuste de curvas da energia potencial elástica em função da distância interatômica. Essa integração funcional é o que possibilita ao estudante determinar a constante de força k das ligações químicas, consolidando a transição entre a teoria dos ohs e a prática computacional.

4 Natureza e classificação das ligações químicas

A natureza das forças interatômicas determina as propriedades físico-químicas dos materiais, sendo classificada primariamente em iônicas, metálicas e covalentes. Enquanto as ligações iônicas fundamentam-se na transferência de elétrons e atrações eletrostáticas (Atkins & de Paula, 2012) e as metálicas na deslocalização eletrônica em uma rede de cátions (Amorim & Coelho, 2019; Atkins & de Paula, 2012), são as ligações covalentes que permitem a investigação das vibrações moleculares sob a ótica da mecânica clássica.

Nas ligações covalentes, a estabilidade é alcançada pelo compartilhamento de pares eletrônicos. A depender da quantidade de pares compartilhados, as ligações são classificadas em simples, duplas ou triplas, influenciando diretamente a rigidez e a energia potencial do sistema (Amorim & Coelho, 2019). Moléculas diatômicas homonucleares apresentam variações em seus comprimentos de ligação de equilíbrio: as moléculas de H_2 (ligação simples), O_2 (ligação dupla) e N_2 (ligação tripla) possuem aproximadamente 0,74 Å, 1,21 Å e 1,10 Å, respectivamente (NIST, 2022).

A relevância desta classificação para o presente estudo reside no fato de que o número de pares eletrônicos compartilhados define a constante de força k da ligação. Sob o aspecto mecânico, essas interações descrevem um comportamento análogo a sistemas de forças restauradoras lineares,

cujas constantes variam conforme a ordem da ligação e a distância interatômica. Assim, a ligação tripla do nitrogênio manifesta uma rigidez superior à ligação simples do hidrogênio, parâmetro determinante para o cálculo das oscilações no modelo de ohs e para a interpretação dos resultados obtidos via Avogadro e Desmos.

5 Oscilador harmônico simples: equação diferencial, soluções e vibrações moleculares

O modelo do ohs provê a base para a descrição de sistemas físicos com forças restauradoras lineares. Na física molecular, este modelo é a aproximação fundamental para descrever a dinâmica vibracional das ligações químicas.

5.1 Lei de Hooke e equação de movimento

A dinâmica do ohs é regida pela lei de Hooke, na qual a força restauradora F é proporcional ao deslocamento x em relação à posição de equilíbrio (Thornton & Marion, 2012):

$$F = -kx \quad (1)$$

onde k representa a constante de força. Pela Segunda Lei de Newton, estabelece-se a equação diferencial do movimento:

$$m \frac{d^2x}{dt^2} + kx = 0 \quad (2)$$

A solução para esta equação diferencial linear de segunda ordem é bem conhecida:

$$x(t) = A \cos(\omega_0 t + \phi) \quad (3)$$

Na Eq. (3), A define a amplitude máxima e $\omega_0 = \sqrt{k/m}$ a frequência angular natural, indicando que a oscilação depende da rigidez do sistema (k) e da inércia (m) (Alonso & Finn, 1980).

5.2 Considerações energéticas

A energia potencial U do oscilador, resultante do trabalho contra a força restauradora, é definida por:

$$U(x) = \frac{1}{2} kx^2 \quad (4)$$

onde x representa o deslocamento a partir da posição de equilíbrio. Graficamente, esta função assume o perfil de uma parábola centrada no equilíbrio, representando a região de estabilidade da ligação química. Para pequenos deslocamentos interatômicos, o potencial real da molécula é aproximado com precisão por este modelo harmônico.

5.3 Vibrações moleculares e massa reduzida

A aplicação do formalismo do ohs a uma molécula diatômica (massas m_1 e m_2) requer a redução do sistema ao movimento de uma partícula fictícia através da massa reduzida, $\mu = \frac{m_1 m_2}{m_1 + m_2}$. A vibração é modelada como dois núcleos conectados por uma mola, conforme a Fig. 1.

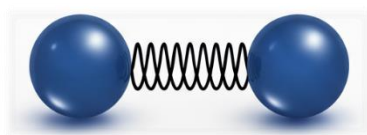


Figura 1: modelo de molécula diatômica formada por duas massas e uma mola.

Assim, a frequência de vibração molecular é dada por $\nu = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{k}{\mu}}$.

6 O método dos mínimos quadrados no ajuste do modelo harmônico

No estudo das oscilações moleculares, o ajuste de curvas é o método estatístico utilizado para correlacionar dados computacionais a modelos matemáticos. Segundo Chapra & Canale (2011), o objetivo é determinar uma função que descreva o padrão dos dados, permitindo a identificação de constantes físicas como a constante de força de ligação. O critério de otimização adotado é o dos mínimos quadrados, que minimiza a diferença quadrática entre os pontos observados (x_i, y_i) e a função de ajuste $f(x)$:

$$S = \sum_{i=1}^n [y_i - f(x_i)]^2 \quad (5)$$

6.1 Ajuste polinomial parabólico

Dada a natureza quadrática da energia potencial no modelo do ohs, o ajuste parabólico é o procedimento ideal para este estudo. De acordo com Chapra & Canale (2011), este procedimento busca determinar os coeficientes de uma função polinomial de segundo grau:

$$y = a_2 x^2 + a_1 x + a_0 \quad (6)$$

Para que o resíduo quadrático seja minimizado, as derivadas parciais em relação aos parâmetros a_0 , a_1 e a_2 devem ser nulas, resultando em um sistema de equações lineares. No contexto da modelagem via Desmos, a curva de ajuste da Equação 6 é reescrita para permitir a interpretação física direta dos parâmetros:

$$y = a(x - x_0)^2 + b \quad (7)$$

Nesta representação, o parâmetro a correlaciona-se à constante de força da ligação ($k = 2a$), enquanto x_0 representa o comprimento de equilíbrio interatômico. O parâmetro b pode ser descartado, ou seja, $b \equiv 0$. A confiabilidade do modelo é verificada pelo coeficiente de determinação r^2 , que quantifica a precisão do ajuste; valores próximos à unidade validam a aproximação harmônica para as moléculas analisadas.

7 Metodologia da investigação e desenvolvimento pedagógico

A metodologia delineada nesta pesquisa fundamenta-se em uma abordagem de natureza qualitativa, com caráter exploratório, voltada ao desenvolvimento e aplicação de um PE para o ensino de Física. O trabalho propõe a transição do modelo de ensino tradicional para uma proposta mediada por Tecnologias Digitais de Informação e Comunicação (TDIC), utilizando Avogadro e Desmos como ferramentas de modelagem.

7.1 Instrumentos de coleta e análise de dados

A coleta de dados ocorreu em uma escola pública de São Luís - MA, dividida em três fases:

- Diagnóstico inicial: aplicação de questionário para identificação de subsunçores necessários à ancoragem de novos conceitos, conforme a TAS.
- Intervenção pedagógica: aulas expositivas seguidas por atividades práticas. A turma foi dividida em um grupo controle, com exercícios tradicionais, e um grupo teste, que utilizou simuladores computacionais para o estudo do ohs em escala molecular.

- Avaliação final: aplicação de questionário de saída para comparar o desempenho e a percepção de aprendizado entre os grupos.

7.2 Procedimentos com os programas e modelagem matemática

O grupo teste utilizou o Avogadro para modelar moléculas diatômicas H_2 , O_2 e N_2 e observar suas vibrações. Por meio da dinâmica molecular, os estudantes coletaram dados de energia total E e distância interatômica d , conforme ilustrado na Fig. 2 para a molécula de O_2 .

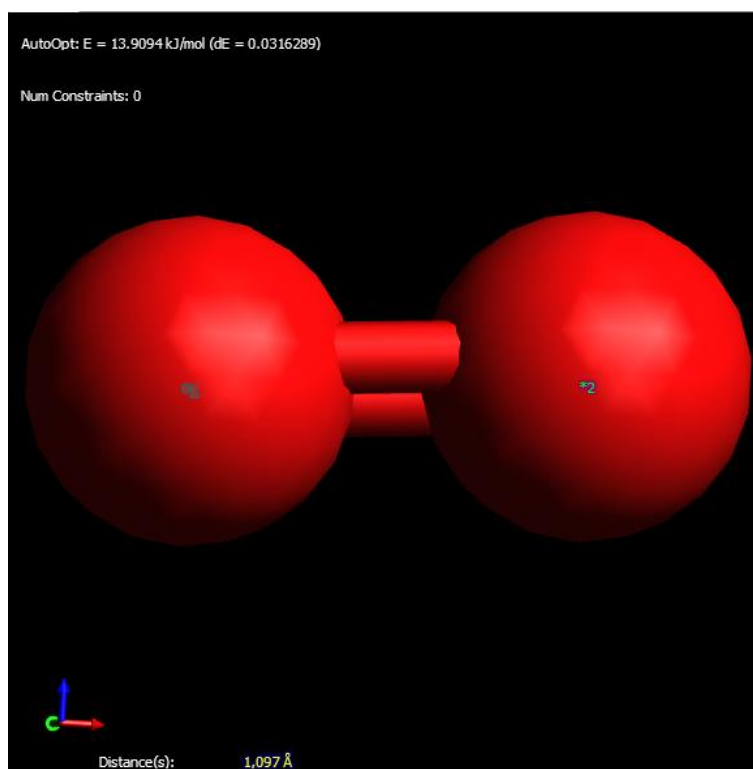
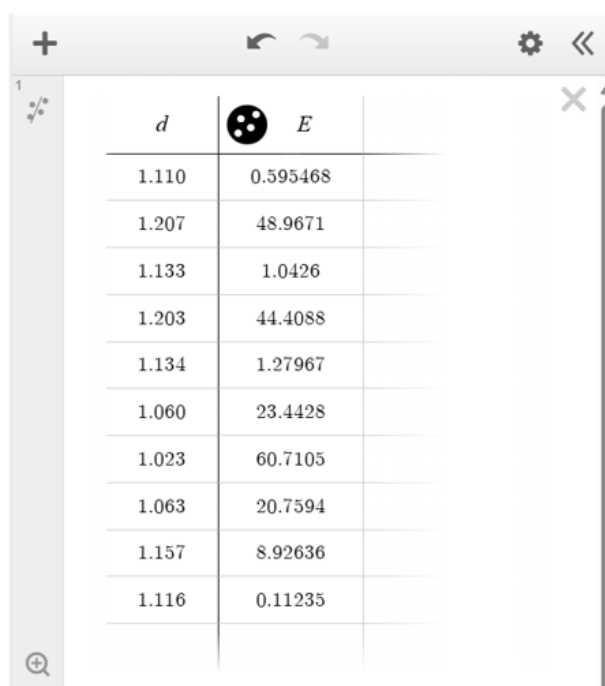


Figura 2: captura de parte da tela do Avogadro mostrando uma molécula de O_2 durante o movimento harmônico simples. As grandezas relevantes são a energia (13,9094 kJ/mol) e a distância (1,097 Å).

As grandezas extraídas foram a energia e a distância (13,9094 kJ/mol e 1,097 Å no exemplo mostrado na Fig. 2). Após dez coletas similares, os dados foram transpostos para o Desmos para a realização do ajuste parabólico da energia potencial em função da distância de ligação, como exemplificado na Fig. 3.



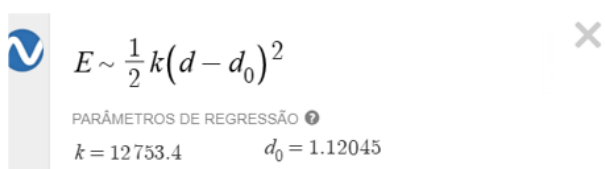
d	E
1.110	0.595468
1.207	48.9671
1.133	1.0426
1.203	44.4088
1.134	1.27967
1.060	23.4428
1.023	60.7105
1.063	20.7594
1.157	8.92636
1.116	0.11235

Figura 3: exemplo de captura de tela no Desmos da distância interatômica versus energia de ligação do N_2 .

A equação de ajuste, derivada do modelo do oscilador harmônico clássico, é dada por:

$$E = \frac{1}{2}k(d - d_0)^2 \quad (8)$$

onde k representa a constante de força da ligação e d_0 a distância de equilíbrio. No Desmos, o ajuste é executado utilizando o operador “~” (til), conforme a Fig. 4.



$$E \sim \frac{1}{2}k(d - d_0)^2$$

PARÂMETROS DE REGRESSÃO

$k = 12753.4$ $d_0 = 1.12045$

Figura 4: fórmula do ajuste quadrático de curvas para a energia de ligação da molécula diatômica no Desmos.

A eficácia do ajuste foi validada pelo coeficiente de determinação (r^2), confirmando a aproximação harmônica para os sistemas estudados. O resultado final do ajuste parabólico sobre os dados coletados no Avogadro é apresentado na Fig. 5.

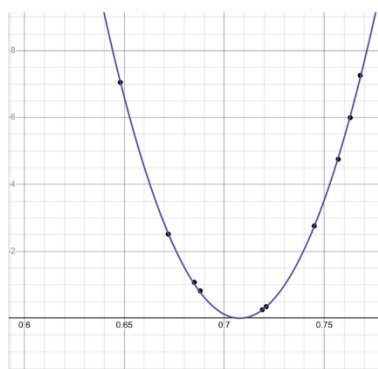


Figura 5: exemplo de ajuste parabólico. Os pontos são gerados pelos dados coletados nas capturas de tela no Avogadro. A linha é o resultado do ajuste de curvas.

7.3 Fundamentação pedagógica

A estratégia metodológica alinha-se às diretrizes da BNCC, que preconiza o uso de tecnologias digitais para a visualização de conceitos abstratos. Segundo Moreira & Masini (1982), a eficácia dos simuladores reside na capacidade de atuar como material potencialmente significativo, facilitando a construção de significados psicológicos a partir de representações dinâmicas do movimento.

8 Resultados

A análise da intervenção pedagógica iniciou-se com a aplicação de um pré-teste estruturado para identificar os subsunçores dos estudantes acerca do movimento harmônico simples e sua correlação com a estrutura atômica. Os dados obtidos revelaram uma fragmentação conceitual acentuada, com a maioria da turma apresentando dificuldades em transpor leis mecânicas para o nível microscópico. A média ponderada inicial de acertos foi de 2,58, evidenciando que os conceitos prévios eram insuficientes para uma compreensão autônoma do fenômeno sem o suporte de organizadores prévios.

Com a implementação da sequência didática, observou-se uma evolução progressiva na reestruturação cognitiva dos discentes. No pós-teste, a média ponderada subiu para 3,00, e o percentual de alunos que atingiram o nível de desempenho satisfatório (três ou mais acertos) elevou-se de 37,78% para 44,44%. Este crescimento quantitativo indica uma migração de estudantes das faixas de desempenho elementar para níveis intermediários de compreensão, validando a eficácia da abordagem metodológica baseada na TAS.

A distinção de desempenho entre os subgrupos foi um dos indicadores mais robustos da pesquisa, conforme ilustrado no Gráf. 1. O grupo teste, que utilizou ativamente os programas Avogadro e Desmos, alcançou uma média final de 6,75, enquanto o grupo controle, restrito a metodologias tradicionais, obteve 5,04. A discrepância de 1,71 ponto favorece o uso de TE como mediadoras do aprendizado, sugerindo que a manipulação de variáveis físicas em ambiente virtual proporcionou uma ancoragem mais sólida dos conceitos associados ao ohs.

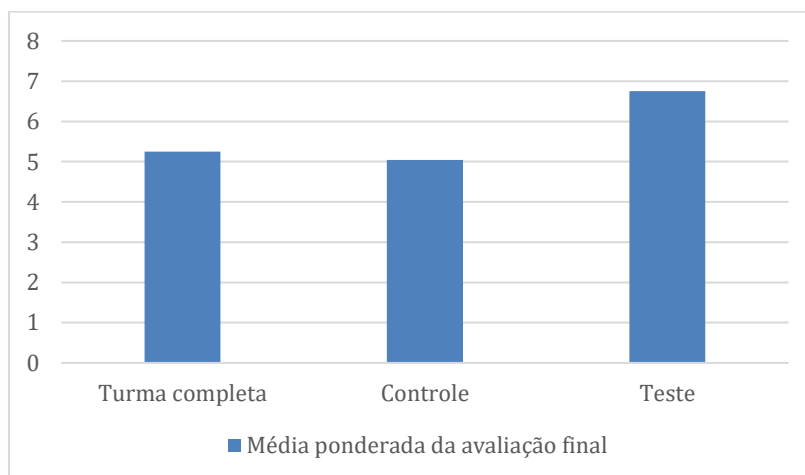


Gráfico 1: dados das médias ponderadas na avaliação final, comparando-se a turma completa (5,25) e os grupos controle (5,04) e teste (6,75).

O engajamento prático com o programa Avogadro permitiu que os alunos visualizassem a dinâmica vibracional de moléculas diatômicas como H_2 , O_2 e N_2 . Durante as sessões de modelagem, os estudantes coletaram dados de energia total e distância interatômica, percebendo como a massa dos átomos e a ordem das ligações influenciam a frequência de oscilação. Essa etapa foi crucial para transformar conceitos abstratos de física molecular em observações concretas, atuando como o material potencialmente significativo defendido por Ausubel.

A transposição dos dados coletados para o Desmos consolidou a fase de tratamento estatístico e modelagem matemática. Os alunos realizaram ajustes de curvas parabólicas sobre os pontos experimentais, aplicando a equação da energia potencial do ohs. Esse procedimento permitiu a extração das constantes de força com rigor técnico, aproximando a prática escolar do fazer científico profissional. A visualização simultânea do gráfico e da equação no Desmos facilitou a interpretação do coeficiente de determinação r^2 , validando a aproximação harmônica.

Relativamente à avaliação somativa geral, os resultados indicaram que 44% da turma atingiu ou ultrapassou a nota 6,0. Um dado relevante foi a eliminação de notas nulas após a intervenção, o que demonstra que o PE, em seu formato de manual didático, proveu um suporte mediacional capaz de garantir a aquisição de significados mínimos por todos os participantes. A distribuição das notas e o comparativo entre os grupos, detalhados no Gráf. 1, confirmam que a proposta pedagógica possui um caráter inclusivo e eficaz para diferentes perfis de aprendizagem.

A percepção dos discentes sobre as ferramentas tecnológicas foi amplamente positiva, com uma taxa de aceitação de 100% quanto à metodologia utilizada. O Avogadro foi destacado por 75% dos alunos devido à sua capacidade de representação tridimensional, conforme as capturas de tela apresentadas nas seções anteriores, enquanto o Desmos foi valorizado por 25% pela clareza na análise de funções. Essa predisposição para o uso de ferramentas digitais é um fator determinante na TAS, pois a vontade de aprender do estudante potencializa a aquisição de novos conhecimentos.

Em última análise, a integração entre a física clássica do ohs e a modelagem computacional demonstrou ser uma via eficiente para a interdisciplinaridade. A capacidade dos alunos de correlacionar a constante de força de uma mola macroscópica com a rigidez de uma ligação química sinaliza uma compreensão profunda da universalidade das leis físicas. Os resultados reiteram que o uso de programas, quando orientado por um referencial teórico sólido, funciona como um catalisador para a aprendizagem significativa, preparando o estudante para interpretar fenômenos complexos com rigor científico.

9 Considerações finais

A investigação demonstrou que a integração da modelagem computacional ao ensino de Física favorece a transposição didática de conceitos complexos, como as oscilações em escala microscópica. A utilização articulada dos programas Avogadro e Desmos permitiu que os estudantes do Ensino Médio superassem a visão limitada do ohs, restrita a sistemas macroscópicos, para compreender a universalidade das forças restauradoras nas ligações químicas. Os dados obtidos indicam que a visualização tridimensional e o ajuste estatístico de curvas serviram como suporte mediacional eficaz para a reestruturação cognitiva.

Os resultados quantitativos, evidenciados pela diferença de 1,71 ponto na média final entre o grupo teste e o grupo controle, reafirmam que a tecnologia, quando fundamentada na TAS de Ausubel, atua como um facilitador para a aquisição de significados. A pesquisa ressalta ainda a relevância da interdisciplinaridade como estratégia para a desfragmentação curricular. A capacidade dos alunos de modelar matematicamente o comportamento das moléculas de H_2 , O_2 e N_2 e extrair propriedades físicas fundamentais demonstra que o abismo entre Física e Química pode ser reduzido mediante metodologias ativas.

A ausência de notas nulas nas avaliações finais sugere que a proposta possui caráter inclusivo, garantindo que estudantes com diferentes níveis de abstração alcançassem uma compreensão funcional dos fenômenos estudados. Conclui-se que o PE desenvolvido é um recurso didático viável e replicável, atendendo às competências da BNCC para o uso de tecnologias digitais e investigação científica. Como perspectiva futura, recomenda-se a expansão deste modelo para o estudo de moléculas poliatômicas, visando o aprofundamento da percepção do estudante sobre a complexidade do mundo natural sob a ótica do rigor científico.

Referências

- Alonso, M. & Finn, E. J. (1980). *Física: um curso universitário*. São Paulo: Edgard Blücher.
- Amorim, A. F. V. & Coelho, A. L. (2019). *Introdução à Química*. Fortaleza: EdUECE.
- Atkins, P. & De Paula, J. (2012). *Físico-Química*. 9. ed. Rio de Janeiro: LTC.
- Batista, G. C., Marinho, E. M., Marinho, M. M., & Marinho, E. S. (2018). Avogadro no ensino de química: um avançado editor molecular de visualização de um grande potencial pedagógico. *Redin - Revista Educacional Interdisciplinar*, 7(1), 1-10.
- Brasil. Ministério da Educação. (2018). *Base Nacional Comum Curricular*. Brasília, DF: MEC.
- Chapra, S. C. & Canale, R. P. (2011). *Métodos Numéricos para Engenharia*. Porto Alegre: AMGH.
- Desmos. (2025). *Calculadora Gráfica Desmos*. Acesso em 10 jun., 2025, <https://www.desmos.com>.
- Ferreira, J. R., & González-Borrero, P. P. (2005). Uma proposta para o ensino de oscilações. *Revista Ciências Exatas e Naturais*, 27(2), 155-171.
- Hanwell, M. D.; Curtis, D. E.; Lonie, D. C.; Vandermeersch, T.; Zurek, E. & Hutchison, G. R. (2012). Avogadro: an advanced semantic chemical editor, visualization, and analysis platform. *Journal of Cheminformatics*, 4(1), 1-17.
- Moreira, M. A. & Masini, E. A. F. (1982). *Aprendizagem Significativa: a teoria de David Ausubel*. São Paulo: Moraes.
- National Institute of Standards and Technology (NIST). (2022). *NIST Computational Chemistry Comparison and Benchmark Database* (Standard Reference Database Number 101, Release 22; R. D. Johnson III, Ed.). Acesso em 23/03/2026, <https://cccbdb.nist.gov/>.
- Silva, J. R.; Dias, R. P. & Vasconcelos, F. C. G. C. (2020). Simulação computacional no ensino de química: o uso do programa Avogadro como ferramenta auxiliar no ensino de ligações químicas. *Revista Experiências em Ensino de Ciências*, 15(2), 247-261.
- Taylor, J. R. (2013). *Mecânica Clássica*. Porto Alegre: Bookman.
- Thornton, S. T. & Marion, J. B. (2012). *Dinâmica clássica de partículas e sistemas*. São Paulo: Cengage Learning.
- Young, H. D. & Freedman, R. A. (2015). *Física II: termodinâmica e ondas*. São Paulo: Pearson Education.