

doi 10.46943/X.CONEDU.2024.GT16.020

A IMPORTÂNCIA DA MODELAGEM NA FORMAÇÃO DO PROFESSOR DE FÍSICA APLICADA AO ESTUDO DE GASES REAIS

Valdemir Manoel da Silva Júnior¹

RESUMO

O presente artigo apresenta uma discussão acerca do papel da modelagem de problemas e fenômenos na formação dos graduandos em Física através de uma análise quantitativa do trabalho de um gás em uma transformação isotérmica utilizando dois modelos analíticos para descrição do comportamento dos gases. Único apresentado a estudantes de nível médio, o primeiro modelo que descreve o comportamento térmico dos gases utilizado neste artigo é o de Gases Ideais, enquanto que o segundo modelo é o de Gás Real de Van der Waals, sendo este pouco explorado até mesmo nos cursos de ensino superior em Física, mesmo não sendo necessário nenhum recurso matemático adicional para compreendê-lo. Adicionalmente, situações-problema solucionadas a partir dos dois modelos para gases são avaliadas, averiguando o custo-benefício de utilizar um modelo mais elaborado e trabalhar modelagem em aulas das disciplinas do ciclo básico que possuem conteúdo de Termodinâmica. Aprofundando a análise, possibilidades de ensino e pesquisa que enriqueçam a formação do graduando em Física a partir do uso desses modelos são apresentadas. Desse modo, neste artigo é feita uma reflexão acerca da utilização da modelagem nas disciplinas de Física do ciclo básico como uma estratégia para melhorar a formação do graduando em Física, possibilitando impactos positivos na formação e atuação do bacharelado e do licenciado em Física, seja ela na academia, na indústria ou na educação básica, combatendo pré-conceitos comuns associados à Física e à Ciência de forma geral.

Palavras-chave: Modelagem, Ensino de Física, Gases Reais, Transformação isotérmica.

1 Doutor e mestre pelo Curso de Engenharia Elétrica, pela Universidade Federal de Pernambuco – UFPE e Mestrando pelo Curso de Mestrado Nacional Profissional em Ensino de Física da Universidade Estadual da Paraíba – UEPB, valdemirjr01@email.com;

INTRODUÇÃO

Um dos principais objetivos de um professor ao ensinar Física no ensino médio é fazer com que o estudante consiga compreender a Física como uma ciência que descreve a natureza e o mundo que o cerca a partir de leis físicas que não são imutáveis e perfeitas, que possuem limite de validade, combatendo uma visão comum e errônea de que a Física é uma espécie de Matemática aplicada que determina a realidade.

Nesse sentido, um bom curso de licenciatura em Física não deve se limitar em formar o futuro professor apenas em fundamentos de Física tradicionalmente trabalhados em sala de aula no ensino médio e nas metodologias de ensino desses conteúdos, sendo necessário também proporcionar reflexões profundas sobre o funcionamento e construção do conhecimento científico de um modo global para que se tenha uma boa formação. Parte dessas relevantes reflexões perpassa pelo entendimento do processo de modelagem matemática e científica de problemas e de fenômenos físicos, possibilitando o entendimento de aspectos pertinentes do processo científico, bem como da construção e evolução temporal das leis físicas.

A descrição do comportamento dos gases, por exemplo, é um tema fundamental para a compreensão da Termodinâmica, uma das principais áreas da Física, de modo que justificável encontrar metodologias de inserção de reflexões e estudos relacionados à modelagem do comportamento dos gases na formação do licenciado em Física. Entretanto, por uma série de fatores, nem sempre esse tema é bem explorado, se restringindo à apresentação e aplicação da Lei Geral dos Gases Ideais.

A lei geral dos Gases Ideais descreve o comportamento dos gases apresentado no ensino médio. Nesse modelo, as interações moleculares são simplificadas e o volume das moléculas de gás é ignorado (LIMA, 2015; TIPLER e MOSCA, 2006). Esse tipo de simplificação, apesar de tornar as fórmulas e cálculos mais fáceis, pode gerar conflitos conceituais pois quando o estudante ignora características que diferenciam os gases, pode chegar à conclusão de que os gases se comportam da mesma forma.

Duas justificativas comuns de utilizar apenas a lei geral dos Gases Ideais são as de que essa lei não exige uma matemática rebuscada e de que os resultados obtidos são boas aproximações dos valores obtidos experimentalmente. Entretanto, a utilização dessa lei limita o estudante a aprender algo que foi dedu-

zido pela primeira vez há quase duzentos anos atrás, em 1834, pelo físico e engenheiro francês Benoît Émile Clapeyron, que combinou as leis de Boyle e de Charles para derivar a devida equação (LAGE, 2019).

Para o estudante de ensino médio pode ser aceitável entender o comportamento dos gases a partir da lei geral dos Gases Ideais, mas, para um licenciado em Física, é importante que sua formação possua aprofundamentos para que se possa discutir a Física conceitualmente adequadamente nos ambientes escolares, promovendo o letramento científico (SOUZA e SANTO, 2019).

Desde 1834, vários modelos para descrever o modelo dos gases foram desenvolvidos. Um deles foi proposto pelo Johannes Diderik van der Waals em 1873, em que esse modelo já incorporava algumas das características de interação entre moléculas, a partir de duas correções: a primeira baseada na repulsão entre átomos, sendo possível estimar o diâmetro atômico, e a segunda leva em conta a parte atrativa da interação (LAGE, 2019).

Os ajustes fazem com que o modelo de Van der Waals seja conhecido como modelo de Gás Real (WIKIPEDIA, 2024). O modelo de Gás Real de Van der Waals é uma alternativa mais elaborada do comportamento dos gases, porém não exige nenhum conhecimento matemático mais avançado em relação ao que o modelo de Gás Ideal exige. Apesar disso, análises indicam que esse modelo raramente é abordado nas disciplinas do ciclo básico dos cursos de Física, seja bacharelado ou licenciatura, como apresentado por Souza e Silva Júnior (2023).

As ausências desse tema no currículo dos cursos de Física e de discussões que envolvam avaliar modelos distintos para um mesmo fenômeno é uma lacuna preocupante, considerando a necessidade de que o professor ou pesquisador compreenda o processo de modelagem, seja em processos industriais ou tecnológicos, bem como do progresso da ciência e tecnologia.

Este artigo tem como objetivo explorar o papel da modelagem em transformações gasosas isotérmicas no ensino de Física a partir da comparação numérica dos modelos de Gás Ideal e o de Gás Real de Van der Waals a partir do cálculo do trabalho realizado por gases nessas transformações. A escolha do modelo de Gás Real de Van der Waals se justifica porque ele oferece uma descrição mais realista do comportamento de gases, sem a necessidade de nenhuma nova ferramenta matemática para compreendê-lo quando comparado às ferramentas necessárias para compreender o modelo de Gás Ideal.

A proposta deste artigo é destacar e defender uma inserção de modelos mais realistas na formação em Física, ressaltando a importância de situações que confrontem modelos para um mesmo fenômeno no currículo de Física. Momentos como esse não só contribuem para o desenvolvimento de uma visão ampla sobre os gases, como também permitem uma perspectiva de evolução da própria Física.

Na próxima seção, são apresentadas breves discussões sobre a ausência do conteúdo de Gases Reais nos cursos de Física no ensino superior e sobre a modelagem e letramento científico no ensino de Física. Na sequência, há a descrição da metodologia utilizada na Seção Análise de questões e Comparação dos modelos. Por fim, há a Seção que levanta possibilidades de aplicação para essa abordagem na formação do graduando dos cursos de Física e a Seção de considerações finais, em que há uma recapitulação dos principais pontos discutidos no artigo, bem como indicação das possíveis contribuições para a prática do ensino de Física no ensino Superior.

ASPECTOS TEÓRICOS E METODOLÓGICOS

O letramento científico é um termo utilizado para se referir de forma geral à capacidade do indivíduo de resolver problemas no seu dia a dia, levando em conta os saberes próprios das ciências e as metodologias de construção de conhecimento próprias do campo científico (SASSERON e MACHADO, 2017 *apud* SOUZA e SANTO, 2019), correspondendo adequadamente a uma descrição resumida do que um bom ensino de Física deve proporcionar. Para isso, é necessário desenvolver diversas competências para um bom letramento científico.

Em Souza e Santo (2019), um inventário composto por vinte competências que podem ser utilizados para avaliar competências relacionadas ao letramento científico é proposto. Dentre as competências apresentadas, é possível perceber que o bom entendimento da modelagem e da construção dos modelos que descrevem fenômenos físicos é essencial. Para exemplificar a presença da modelagem no letramento científico proposto por Souza e Santo (2019), pode-se citar as competências de código C4 (Avaliar argumentos científicos e evidências de diferentes fontes), C5 (Avaliar formas de explorar cientificamente dada questão) e C6 (Avaliar os vários caminhos que os cientistas usam para assegurar a confiabilidade dos resultados).

No caso publicado por Souza e Santo (2019), o ciclo de modelagem de Hestenes foi utilizado por ter como objetivo principal de evidenciar princípios, leis e teorias associadas à situação modelada. A modelagem da situação-problema é relevante pois faz os estudantes perceberem relações extrínsecas e intrínsecas ao modelo, permitindo uma melhor investigação do problema.

Em Verbeno, *et al.* (2016), um módulo educacional com base em atividades de modelagem computacional sobre o oscilador harmônico simples foi proposto, aplicado a professores de Física do Ensino Médio cursando pós-graduação na Universidade Federal do Espírito Santo. Na situação compartilhada no artigo, a tecnologia digital é utilizada na perspectiva de aproximar reais possibilidades ao cotidiano escolar em nível semiquantitativo, em que é relatado que alguns professores diante de uma nova situação física com diferentes condições iniciais demonstraram dificuldades nos conceitos de relativos ao movimento harmônico simples, bem como foi observado o progresso no entendimento dos professores ao longo das atividades de modelagem em direção ao conceito científico.

Em Nascimento (2016), uma reflexão sobre uma atividade que utilizou a modelagem Matemática na perspectiva sociocrítica como abordagem pedagógica o ensino de Física foi relatada, onde foi observado que a atividade de modelagem torna os alunos mais críticos pela oportunidade de contextualizar o conhecimento elaborado. Em Vasconcelos, Santana e Borges Neto (2013), a possibilidade de simular sistemas e processos aplicados ao ensino de Física é discutido a partir do uso do software *Modellus*, em que é defendido que a exploração de diferentes modelos pra uma mesma situação é difícil, independente do nível escolar/acadêmico.

A importância da modelagem no ensino de Física também foi discutida por Brandão, Araújo e Veit (2008), em que o distanciamento entre o ensino de ciências e a realidade experienciada é criticada. Na ocasião, é atribuída ao modo excessivamente formal das disciplinas científicas o que os autores denominaram de “existência de dois mundos disjuntos” habitando a mente do estudante. No caso de licenciados em Física, concepções que destoam e podem chegar na educação contribuem para um ensino de Física equivocado com lacunas conceituais.

Os trabalhos citados trazem uma perspectiva do quão valiosa pode ser uma formação que insira atividades que envolvam modelagem, com ou sem apoio computacional. Nos cursos de Física, as disciplinas do ciclo básico que trabalham os conteúdos de Termodinâmica se concentram entre o primeiro

e segundo ano da formação, como relatado por Souza (2023), de modo que explorar modelagem a partir do assunto de Gases Reais pode proporcionar ao licenciando uma visão mais aprofundada da Física e do processo de modelagem.

Recentemente, uma análise das bibliografias da disciplina de Termodinâmica do ciclo básico de 165 cursos de graduação em Física (licenciatura e bacharelado) de treze estados brasileiros foi realizada por Souza (2023), sendo selecionados a partir da quantidade de produção científica na área de Física e relevância da universidade no cenário nacional, em busca de menções ao conteúdo de Gases Reais no conteúdo programático dessas disciplinas. Nesse estudo, foi verificado que 64% dos programas curriculares avaliados não fazem menção direta ao conteúdo de Gases reais (SOUZA, 2023).

Uma outra análise buscando avaliar os livros didáticos utilizados nas disciplinas de Termodinâmica no ensino superior dos cursos de Física foi realizada por Souza e Silva Júnior (2023), em que foram verificados que quatro obras estão presentes em mais de 80% desses cursos como bibliografia básica, sendo um indício de que essas obras são as mais utilizadas na formação dos licenciados em Física no país. Esses livros (e suas edições atualizadas) são:

- TIPLER e MOSCA, 2006: TIPLER, P. A.; MOSCA, G. **Física para Cientistas e Engenheiros – Mecânica, Oscilações e Ondas, Termodinâmica**. Rio de Janeiro: LTC, 2006, v.1, 6a edição;
- HALLIDAY, RESNICK e WALKER, 2009: HALLIDAY, D.; RESNICK, R.; WALKER, J. **Fundamentos de Física – Gravitação, Ondas e Termodinâmica**. Rio de Janeiro: LTC, 2009, v.2, 8a edição;
- YOUNG e FREEDMAN, 2008: YOUNG, Hugh D.; Freedman, Roger A. **Física 2 – Termodinâmica e Ondas**. São Paulo: Addison Wesley, 2008, 14ª ed., São Paulo: Pearson Education;
- NUSSENZVEIG, 2002: NUSSENZVEIG, H. M. **Curso de Física Básica – Fluidos, Oscilações e Ondas, Calor**. São Paulo: Edgard Blücher, 2002, v.2, 4ª edição.

Desses livros, apenas o Tipler e o Moysés possuem pequena seção destinada a tratar do Gás Real de Van der Waals, com um enfoque em isotermas de Líquido-Vapor. Essas seções estão após todo o estudo das leis da Termodinâmica e Teoria Cinética dos gases, de modo que o estudo de Gases Reais é realizado para discutir questões como ponto crítico e compressibilidade. Não há, por-

tanto, uma abordagem de propriedades dos gases e das leis da Termodinâmica que considerem equações de gases reais, indiretamente indicando ao estudante que o comportamento dos gases independe do tipo de gás.

Esse tipo de argumento leva a situações em que o estudante se depara com argumentos conflitantes, como o de utilizar um modelo (de gases ideais) que desconsidera o volume e as interações intermoleculares, porém que possui valores distintos para a relação de Mayer, dependendo se o gás é monoatômico, diatômico ou poliatômico (TIPLER e MOSCA, 2006; NUSSENZVEIG, 2002). Para compreender adequadamente situações como essa, o licenciando precisa compreender os fundamentos da modelagem.

Ter uma atividade que introduza discussões relacionadas às correções das hipóteses básicas para a validade da equação de estado de um gás ideal (LAGE, 2019; LIMA, 2015), que envolva a avaliação de situações-problema com gases reais pode trazer ao licenciando uma série de questionamentos que fazem parte do processo de construção de modelos, atribuindo-se um valor positivo a momentos de reflexão sobre os modelos e idealizações.

Neste artigo, é defendida a inserção de atividades que permitam essa reflexão e a utilização de modelos mais elaborados na formação do estudante de graduação de Física como uma alternativa para aprofundar e melhorar sua formação, gerando um efeito cascata de melhoria de desempenho, seja na educação básica, seja em ambientes de pesquisa acadêmica.

Especificamente aplicada a gases, uma análise quantitativa entre os valores obtidos no cálculo do trabalho realizado por um gás real em comparação aos obtidos quando se considera um gás ideal servem de ponto de partida para reflexões é proposta. A ideia é mostrar ao estudante que nem sempre os valores obtidos são a verdade absoluta ou que é suficiente apenas calcular e usar as fórmulas estabelecidas sem uma devida reflexão dos resultados obtidos. Essa redução da Física a uma “matemática aplicada” traz consigo muitos efeitos negativos, que afastam os estudantes e reproduz preconceitos, como a ideia de que a Física se resume a cálculos.

A utilização do modelo de Gás Real de Van der Waals é importante em diversas aplicações industriais, processos químicos e estudos avançados da Termodinâmica (NOVA, 2012), pois é um dos modelos para gases reais menos complexo que possui ampla aplicabilidade prática. Apesar de muito utilizado por sua simplicidade, o modelo de Gás Ideal é limitado em suas aplicações.

Assim, o estudo presente nesse artigo se enquadra numa abordagem quantitativa focando na comparação numérica obtida de dois modelos distintos diferentes para o trabalho de gases em transformações isotérmicas. A natureza desse trabalho é aplicada, visando contribuir para a prática e formação dos licenciados em Física a partir da análise do papel da modelagem, bem como seu caráter é explicativo e exploratório, diferenciando os dois modelos e discutindo os impactos possíveis na aprendizagem a partir da comparação dos resultados. Todas essas definições se enquadram com as apresentadas por (GERHARDT, SILVEIRA, *et al.*, 2009).

A comparação realizada entre os modelos se dá em situações-problema. O processo de comparação se deu no cálculo do trabalho realizado por um gás em diferentes tipos de transformação para ambos os modelos, utilizando parâmetros tabelados para os gases e suas propriedades.

Após a obtenção do trabalho pelos dois modelos, o desvio percentual entre os resultados é calculado, complementando a discussão e apresentando a relevância de escolher adequadamente modelos apropriados para as aplicações. Diferenças percentuais em torno de 5% foram obtidos, indicando que as diferenças obtidas podem ser relevantes para os diferentes tipos de gases.

MODELOS DE GASES E TRABALHO REALIZADO POR GASES

Nesta Seção, uma rápida descrição dos modelos para gases e das equações é apresentada. O objetivo dessa revisão é apresentar as principais equações que serão utilizadas durante a análise qualitativa e foi elaborada baseada nos livros de ensino superior citados na seção anterior.

O modelo de Gases Ideais parte da idealização de que as moléculas de gás não interagem entre si e que seu volume é desprezível em comparação ao volume total do recipiente. A equação de estado para os gases ideais é dada por (NUSSENZVEIG, 2002)

$$PV = nRT.$$

em que P é a pressão, V é o volume, n é o número de mols, R é a constante universal dos gases e T é a temperatura do gás na escala absoluta (Kelvin). Esse modelo possui validade em condições de baixa pressão e altas temperaturas, em que as interações intermoleculares são mínimas.

O modelo de Gás Real de Van der Waals, proposto em 1873, faz ajustes, incluindo as forças de atração e repulsão entre as moléculas de gás e o volume ocupado pelas mesmas. Sua equação de estado é

$$\left(P + \frac{an^2}{V^2} \right) \cdot (V - nb) = nRT.$$

em que a é uma constante que corrige a pressão, levando em conta as forças de atração e repulsão intermoleculares, e b ajusta o volume disponível ao gás, considerando o volume finito das moléculas de gás. Os valores de a e b são obtidos experimentalmente e são tabelados, de acordo com o tipo de gás, porém também podem ser estimados a partir da temperatura crítica e pressão crítica do gás (TIPLER e MOSCA, 2006; WIKIPEDIA, 2024). A Tabela 1 apresenta os valores desses parâmetros para alguns gases. Esse modelo é mais preciso para descrever o comportamento de gases em altas pressões e baixas temperaturas, onde as interações moleculares não podem ser desprezadas.

Outros modelos para descrever o comportamento dos gases além do de Van der Waals foram propostos ao longo do tempo. A seguir, uma breve descrição de alguns desses modelos é apresentada (WIKIPEDIA, 2024):

- Berthelot (1879): alternativa ao modelo de Van der Waals, levando em conta uma forma diferente de compressibilidade;
- Clausius (1880): ajusta o volume disponível para o gás e atração entre moléculas;
- Dierterici (1899): Propõe uma modificação da equação de Van der Waals com base na energia potencial das interações moleculares;
- Beattie-Bridgeman (1928): Utilizada principalmente para gases como o ar e o nitrogênio em grandes intervalos de temperatura e pressão;
- Equação de Virial (1940): Expande a equação de estado em séries de potências de densidade e corrige o comportamento do gás em termos de forças intermoleculares;
- Benedict-Webb-Rubin (1940): Um modelo mais complexo que inclui múltiplos parâmetros para ajustar a densidade dos gases reais;
- Redlich-Kwong (1949): aperfeiçoa a equação de Van der Waals, tornando-a mais precisa em condições de temperatura alta e pressão moderada;

- Carnahan-Starling (1969): Modelo utilizado para o comportamento de esferas duras, aplicável a certas interações moleculares;
- Soave-Redlich-Kwong (1972): Modifica a equação de Redlich-Kwong, melhorando o ajuste para líquidos e vapores em equilíbrio;
- Peng-Robinson (1976): introduz uma equação de estado que se destaca pela sua maior precisão em prever o comportamento de misturas de hidrocarbonetos e gases em uma ampla gama de temperaturas e pressões.

Tabela 1 – Constantes de Van der Waals para alguns gases.

Gás	$a \left(\frac{L^2 \cdot atm}{mol^2} \right)$	$b \left(\frac{L}{mol} \right)$
H_2	0,2444	0,02661
He	0,03412	0,2370
N_2	1,39	0,03913
O_2	1,36	0,03183
CO	1,45	0,03985
NO	1,340	0,02789
CO_2	3,592	0,04267
H_2O	5,464	0,03049
C_3H_8	9,24	0,051

Fonte: (WIKIPEDIA, 2024; TIPLER e MOSCA, 2006).

O trabalho realizado por um gás em uma W transformação é obtido a partir da expressão geral da integral da pressão em função do volume (HALLIDAY, RESNICK e WALKER, 2009; NUSSENZVEIG, 2002; TIPLER e MOSCA, 2006)

$$W = \int_{V_i}^{V_f} PdV.$$

em que V_i e V_f são os volumes inicial e final do gás, respectivamente.

Para exemplificar, serão consideradas transformações com temperatura constante (isotérmicas), em que as expressões para o trabalho de um gás para os dois modelos são dadas pelas expressões

$$W_{ideal} = nRT \ln \left(\frac{V_f}{V_i} \right)$$

e

$$W_{vdw} = nRT \ln \left(\frac{V_f - nb}{V_i - nb} \right) + an^2 \left(\frac{1}{V_f} - \frac{1}{V_i} \right).$$

Como pode-se perceber, utilizar o modelo de Gás Real de Van der Waals não exige nenhuma ferramenta matemática adicional, de modo que a inserção de atividades que incentivem o uso desse modelo não é limitada aos pré-requisitos para compreensão dos modelos, ficando a cargo do professor utilizar ou não.

Para outras transformações gasosas, como a isobárica (pressão constante) e a adiabática, uma análise mais aprofundada deve ser feita. Entretanto, não é foco deste artigo, bem como a proposta de uma disciplina de Termodinâmica estruturada usando o modelo de Gás Real de Van der Waals (ou modelos de gases reais), ficando como possíveis etapas posteriores à publicação deste artigo.

SITUAÇÕES-PROBLEMA E COMPARAÇÃO DOS MODELOS

Nesta Seção, uma análise quantitativa e comparativa entre os modelos é apresentada, aplicando em situações-problema para verificar o quanto Gás Ideal difere do Gás Real de Van der Waals. Independente dos resultados obtidos, é reforçado que a proposta de utilização de um modelo mais elaborado não está centrada na discrepância entre valores numéricos, mas sim na reflexão acerca do processo de modelagem e de sua utilização na formação de licenciados em Física. Ainda assim, destacam-se as situações em que a diferença notável entre os modelos. Por fim, esta Seção apresenta aplicações nas quais o considerar um gás ideal não é suficiente, sendo usados outros modelos.

A seguir, quatro situações-problema são apresentadas e resolvidas para comparar os valores obtidos, em que cada problema utiliza um tipo de gás diferente.

- **Situação-problema 1:** Expansão Isotérmica do Ar em um Balão Meteorológico

Um balão meteorológico, utilizado para medições atmosféricas, contém ar a uma temperatura de 25°C. No ponto de partida, o balão está pressurizado

a 2 atm com um volume de 10 L . Durante a subida, a pressão ao redor do balão diminui, permitindo que ele se expanda isotermicamente até um volume de 20 L.

1. Calcule o trabalho realizado pelo ar durante essa expansão, considerando-o como um gás ideal.
2. Utilize o modelo de Van der Waals para calcular o trabalho considerando o ar como uma mistura de 78% nitrogênio e 22% oxigênio, e compare os resultados com o cálculo ideal.
3. Determine a diferença percentual entre os trabalhos obtidos pelos dois modelos e discuta as razões para essa diferença.

Solução da situação-problema 1

Dados iniciais					
Volume inicial	V_i	10 L	Volume final	V_f	20 L
Pressão inicial	P_i	2 atm	Pressão final	P_f	?
Temperatura inicial	T_i	298 K	Temperatura final	T_f	298 K
Parâmetro a para o oxigênio	a_{O_2}	$1,36 \frac{L^2 \cdot atm}{mol^2}$	Parâmetro b para o oxigênio	b_{O_2}	$0,0391 \frac{L}{mol}$
Parâmetro a para o nitrogênio	a_{N_2}	$1,39 \frac{L^2 \cdot atm}{mol^2}$	Parâmetro b para o nitrogênio	b_{N_2}	$0,0318 \frac{L}{mol}$
Constante ideal dos gases	R	$0,082 \frac{atm \cdot L}{mol \cdot K}$			
Dados calculados durante a solução					
Calculado	a_{ar}	$1,38 \frac{L^2 \cdot atm}{mol^2}$	Calculado	b_{ar}	$0,0373 \frac{L}{mol}$
Calculado	n	0,815 mol			

Passo 1: Cálculo dos parâmetros a e b para o ar – Para o ar, considerado como uma mistura de 78% de nitrogênio e 22% de oxigênio, calcula-se os parâmetros a e b com uma média ponderada das constantes dos gases componentes.

$$a_{ar} = 0,78 \cdot a_{N_2} + 0,22 \cdot a_{O_2} \rightarrow a_{ar} \approx 1,38 \frac{L^2 \cdot atm}{mol^2}$$

$$b_{ar} = 0,78 \cdot b_{N_2} + 0,22 \cdot b_{O_2} \rightarrow b_{ar} \approx 0,0373 \frac{L}{mol}$$

Passo 2: Usar a equação de estado dos gases ideais para estimar o valor de n .

$$n = \frac{P_i V_i}{n T_i} \rightarrow n \approx 0,815 \text{ mol}$$

Obs.: A estimativa de n é realizada a partir do modelo de Gás Ideal, porém é possível obter esse valor a partir do modelo de Gás Real de Van der Waals numericamente.

Passo 3: Calcular o trabalho do gás para o modelo ideal.

$$W_{ideal} = nRT \ln \left(\frac{V_f}{V_i} \right) \rightarrow W_{ideal} \approx 16,77 \text{ L} \cdot \text{atm}$$

$$W_{vdw} = nRT \ln \left(\frac{V_f - nb}{V_i - nb} \right) + an^2 \left(\frac{1}{V_f} - \frac{1}{V_i} \right) \rightarrow W_{vdw} = 16,25 \text{ L} \cdot \text{atm}$$

Passo 4: Calcular a diferença percentual.

$$\text{Diferença \%} = \left| \frac{W_{vdw} - W_{ideal}}{W_{ideal}} \right| \cdot 100\% \rightarrow \text{Diferença \%} = 3,2\%$$

- **Situação-problema 2:** Compressão isotérmica do propano

Um cilindro de gás de cozinha contendo propano, inicialmente a uma pressão de 1 atm e com um volume de 20 L , é comprimido para ocupar apenas 10 L de volume, enquanto mantém a temperatura constante em 25° C . Esse processo é feito para armazenar o gás em condições adequadas para uso doméstico.

1. Calcule o trabalho realizado pelo gás durante a compressão, considerando o propano como um gás ideal.
2. Usando o modelo de Van der Waals, calcule o trabalho realizado pelo gás considerando as forças intermoleculares e o volume das moléculas de propano. Compare os resultados com o cálculo ideal.
3. Determine a diferença percentual entre os trabalhos obtidos pelos dois modelos e discuta a aplicabilidade do modelo de Van der Waals para o propano nesse contexto.

Solução da situação-problema 2

Dados iniciais					
Volume inicial	V_i	20 L	Volume final	V_f	10 L
Pressão inicial	P_i	1 atm	Pressão final	P_f	?
Temperatura inicial	T_i	298 K	Temperatura final	T_f	298 K
Parâmetro a para o propano	$a_{C_3H_8}$	$9,24 \frac{L^2 \cdot atm}{mol^2}$	Parâmetro b para o propano	$b_{C_3H_8}$	$0,051 \frac{L}{mol}$
Constante ideal dos gases	R	$0,082 \frac{atm \cdot L}{mol \cdot K}$			
Dados calculados durante a solução					
Calculado	n	0,85 mol			

Passo 1: Usar a equação de estado dos gases ideais para estimar o valor de n .

$$n = \frac{P_i V_i}{n T_i} \rightarrow n \approx 0,815 \text{ mol}$$

Passo 2: Calcular o trabalho do gás para o modelo ideal.

$$W_{ideal} = nRT \ln \left(\frac{V_f}{V_i} \right) \rightarrow W_{ideal} \approx -16,79 \text{ L} \cdot \text{atm}$$

$$W_{vdw} = nRT \ln \left(\frac{V_f - nb}{V_i - nb} \right) + an^2 \left(\frac{1}{V_f} - \frac{1}{V_i} \right) \rightarrow W_{vdw} = -17,45 \text{ L} \cdot \text{atm}$$

Passo 3: Calcular a diferença percentual.

$$\text{Diferença \%} = \left| \frac{W_{vdw} - W_{ideal}}{W_{ideal}} \right| \cdot 100\% \rightarrow \text{Diferença \%} = 4\%$$

- **Situação-problema 3:** Expansão isotérmica de R-134^a em um sistema de refrigeração

Em um sistema de refrigeração, o fluido refrigerante R-134a é utilizado para transferir calor. Em um dos estágios do processo, o refrigerante, inicialmente sob pressão de 6 atm e ocupando um volume de 5 L a uma temperatura de 0°C, é

expandido isotermicamente para um volume de 8L para facilitar a troca de calor com o ambiente.

1. Calcule o trabalho realizado pelo R-134a durante essa expansão, considerando-o como um gás ideal.
2. Utilizando o modelo de Van der Waals, determine o trabalho realizado pelo gás R-134a, levando em conta as interações moleculares e o volume ocupado pelas moléculas. Compare os resultados com o cálculo ideal.
3. Determine a diferença percentual entre os trabalhos obtidos pelos dois modelos e explique as diferenças observadas, considerando o comportamento real do R-134a.

Solução da situação-problema 3

Dados iniciais					
Volume inicial	V_i	5 L	Volume final	V_f	8 L
Pressão inicial	P_i	6 atm	Pressão final	P_f	?
Temperatura inicial	T_i	273 K	Temperatura final	T_f	273 K
Parâmetro a para o propano	a_{R134a}	$5,52 \frac{L^2 \cdot atm}{mol^2}$	Parâmetro b para o propano	b_{R134a}	$0,0562 \frac{L}{mol}$
Constante ideal dos gases	R	$0,082 \frac{atm \cdot L}{mol \cdot K}$			
Dados calculados durante a solução					
Calculado	n	1,34 mol			

Passo 1: Usar a equação de estado dos gases ideais para estimar o valor de n .

$$n = \frac{P_i V_i}{n T_i} \rightarrow n \approx 0,815 \text{ mol}$$

Passo 2: Calcular o trabalho do gás para o modelo ideal.

$$W_{ideal} = nRT \ln \left(\frac{V_f}{V_i} \right) \rightarrow W_{ideal} \approx -16,79 \text{ L} \cdot \text{atm}$$

$$W_{vdw} = nRT \ln \left(\frac{V_f - nb}{V_i - nb} \right) + an^2 \left(\frac{1}{V_f} - \frac{1}{V_i} \right) \rightarrow W_{vdw} = -17,45 \text{ L} \cdot \text{atm}$$

Passo 3: Calcular a diferença percentual.

$$\text{Diferença \%} = \left| \frac{W_{vdw} - W_{ideal}}{W_{ideal}} \right| \cdot 100\% \rightarrow \text{Diferença \%} = 4,5\%$$

- **Situação-problema 4:** Compressão isotérmica de dióxido de carbono em um sistema de armazenamento

Uma indústria química utiliza dióxido de carbono (CO_2) em processos de fabricação e precisa armazená-lo em tanques pressurizados. O CO_2 inicialmente ocupa um volume de 50 L a uma pressão de 1 atm e uma temperatura de 25°C. Para armazenar o gás de forma segura e eficiente, ele é comprimido isotermicamente até um volume de 20L.

1. Calcule o trabalho realizado pelo gás durante a compressão, considerando o CO_2 como um gás ideal.
2. Usando o modelo de Van der Waals, calcule o trabalho realizado pelo gás considerando as interações moleculares e o volume das moléculas de CO_2 . Compare os resultados com o cálculo ideal.
3. Determine a diferença percentual entre os trabalhos obtidos pelos dois modelos e discuta o impacto dessa diferença na segurança do armazenamento do CO_2 .

Solução da situação-problema 4

Dados iniciais					
Volume inicial	V_i	50 L	Volume final	V_f	20 L
Pressão inicial	P_i	1 atm	Pressão final	P_f	?
Temperatura inicial	T_i	298 K	Temperatura final	T_f	298 K
Parâmetro a para o propano	a_{R134a}	$3,59 \frac{\text{L}^2 \cdot \text{atm}}{\text{mol}^2}$	Parâmetro b para o propano	b_{R134a}	$0,0427 \frac{\text{L}}{\text{mol}}$
Constante ideal dos gases	R	$0,082 \frac{\text{atm} \cdot \text{L}}{\text{mol} \cdot \text{K}}$			
Dados calculados durante a solução					
Calculado	n	1 mol			

Passo 1: Usar a equação de estado dos gases ideais para estimar o valor de n .

$$n = \frac{P_i V_i}{n T_i} \rightarrow n \approx 1 \text{ mol}$$

Passo 2: Calcular o trabalho do gás para o modelo ideal.

$$W_{ideal} = nRT \ln \left(\frac{V_f}{V_i} \right) \rightarrow W_{ideal} \approx -13,62 \text{ L} \cdot \text{atm}$$

$$W_{vdw} = nRT \ln \left(\frac{V_f - nb}{V_i - nb} \right) + an^2 \left(\frac{1}{V_f} - \frac{1}{V_i} \right) \rightarrow W_{vdw} = -14,35 \text{ L} \cdot \text{atm}$$

Passo 3: Calcular a diferença percentual.

$$\text{Diferença \%} = \left| \frac{W_{vdw} - W_{ideal}}{W_{ideal}} \right| \cdot 100\% \rightarrow \text{Diferença \%} = 5,3\%$$

A Tabela 2 apresenta uma comparação entre os quatro exemplos, para o ar, o propano, o R-134a e o dióxido de carbono, com valores de trabalho (convertidos para Joules) para os dois modelos. Os valores obtidos apontam uma variação entre 3,2% e 5,4% para o valor do trabalho realizado pelo gás, indicando que o modelo idealizado não é indicado para aplicações tecnológicas, químicas e industriais, uma vez que é necessário ter o máximo de precisão.

Tabela 2 – Compilação dos valores dos trabalhos realizados pelos gases nas situações-problema apresentadas.

Gás	Trabalho (Gás Ideal) (J)	Trabalho (Van der Waals) (J)	Diferença percentual
Ar	1701	1647	3,2 %
Propano	-1703	-1771	4,0 %
R-134a	2605	2488	4,5 %
Dióxido de carbono	-1379,7	-1453,8	5,3 %

Fonte: O autor

Em termos de ensino, considerar a idealização de um gás pode dar ao estudante uma noção de que os gases se comportam da mesma maneira sob as mesmas condições.

Isso pode ser verificado em atividades experimentais, em que discrepâncias entre valores teóricos e experimentais geralmente são atribuídas a incertezas nos equipamentos e em erros na obtenção de dados antes de ter o modelo que descreve o fenômeno questionado, quando isso ocorre. Assim, refletir sobre modelagem dá destaque a questões relacionadas à precisão dos dispositivos dos laboratórios que reproduzem os experimentos para validação dos modelos, dando um enfoque histórico à formação do licenciando.

APLICAÇÕES E POSSIBILIDADES

A partir do uso de modelos mais elaborados, diversas possibilidades são geradas. Trabalhar aspectos computacionais, históricos, experimentais, conceituais e do próprio processo de modelagem são alguns exemplos. É interessante trabalhar aspectos de aplicação em tecnologia dos conteúdos trabalhados, pesquisando em iniciação científica ou elaborando aplicações para o ensino na educação básica. Em termos de aplicação, seis aplicações podem ser investigadas em projetos de pesquisa, extensão ou integrações à disciplina. Essas aplicações são descritas a seguir:

- Motores de combustão interna: Os gases no cilindro de um motor são comprimidos e aquecidos, e a precisão do modelo de Van der Waals é importante para prever a eficiência do motor.
- Ciclos de refrigeração (Carnot e Rankine): O ciclo de Carnot usa compressão e expansão isotérmica de gases, enquanto o ciclo de Rankine utiliza fluidos refrigerantes. Em ambos os casos, o comportamento do gás ou fluido refrigerante deve ser modelado de forma precisa.
- Exploração submarina (Câmaras de compressão): A compressão de gases como propano e butano em cilindros pressurizados requer modelagem realista para prever o volume e a pressão dentro do cilindro.
- Turbinas a gás e motores a jato: A compressão de ar e combustível em altas pressões e temperaturas requer o uso de modelos menos idealizados como o de Van der Waals para prever o comportamento dos gases no ciclo de operação.
- Fator de compressibilidade de gases: é um parâmetro que indica o comportamento de um gás em relação ao ideal, ou seja, a sua compres-

sibilidade. Esse fator permite avaliar se há domínio de forças repulsivas ou atrativas entre as moléculas de gás para cada estado do gás.

Essas ideias podem ser trabalhadas para todos os níveis: médio ou superior (em extensão, na disciplina ou na iniciação científica), de diversas perspectivas, dando um novo caráter a um tema que não é tão explorado nas graduações, apesar de presente na formação do graduando em Física, quase sempre se restringindo a aplicar as fórmulas, como no ensino básico.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

Neste artigo, é defendida a relevância da modelagem na formação dos estudantes de Física, especialmente na formação dos licenciandos, a partir de uma análise comparativa do trabalho realizado por gases em transformações isotérmicas pelo modelo de Gases Ideais e pelo modelo de Gás Real de Van der Waals. É observado que a modelagem desempenha um papel importante para o bom entendimento de conceitos e leis em Física, oferecendo ao estudante uma abordagem mais realista dos fenômenos e incentivando uma visão crítica sobre o uso de diferentes modelos para explicar o comportamento de sistemas físicos.

A escolha do modelo de Van der Waals para esse estudo é justificada por não exigir domínio de novas ferramentas matemáticas em relação ao de Gases Ideais, possuindo, porém, uma descrição mais precisa para situações em que as interações entre moléculas e o volume ocupado por elas tornam-se significativos. A introdução deste modelo no ensino superior destaca-se pela relevância prática, já que futuros professores poderão demonstrar a importância de uma visão crítica da Física em sua prática docente, esclarecendo que ela se fundamenta em leis que possuem limitações e condições de aplicabilidade.

Este trabalho evidencia que a diferença nos valores calculados para o trabalho em uma transformação isotérmica pode ser significativa em determinadas condições. Esse tipo de análise reforça a necessidade de pensar cuidadosamente sobre qual modelo é mais adequado em cada situação, promovendo uma reflexão que vai além da simples aplicação de fórmulas ou de uma comparação numérica. A inclusão de atividades que fomentem a modelagem científica permite que o estudante discuta sobre o custo-benefício de um modelo mais elaborado, promovendo uma análise que considera a precisão dos resultados e a complexidade da solução.

Além disso, a introdução da modelagem de gases reais nas disciplinas do ciclo básico de Física pode fornecer ao graduando uma preparação mais completa para desafios futuros, seja em contextos acadêmicos, industriais ou educacionais. No campo da pesquisa, por exemplo, a familiaridade com modelos mais sofisticados pode abrir portas para o entendimento de fenômenos avançados. Na indústria, a compreensão das limitações do modelo ideal é necessária para a otimização de processos em áreas da engenharia, do setor energético e da fabricação de equipamentos que envolvem gases em altas pressões.

Ao longo do artigo, é abordada a possibilidade de reformulação de questões acadêmicas que exploram a modelagem de problemas em Termodinâmica, incentivando a formulação de questões que possibilitem a aplicação do modelo de Gás Real de Van der Waals sem a necessidade de despendar energia criando novas questões. A integração da modelagem na formação docente poderia ajudar a diminuir a lacuna existente entre o conhecimento teórico e a aplicação prática.

Por fim, a inclusão da modelagem no currículo do ensino superior em Física é considerada uma estratégia valiosa para ajudar a combater opiniões equivocadas sobre a invariabilidade da ciência. Para o estudo de gases, a utilização desses modelos permite que o graduando compreenda que a ciência é composta por aproximações, que são aprimoradas à medida que o entendimento sobre os fenômenos naturais avança e à medida que os dispositivos e ferramentas matemáticas também avançam. Esse tipo de reflexão contribui não apenas para a formação de futuros professores de Física mais bem preparados, mas também para a formação de cientistas e profissionais que compreendam a importância de adaptar os modelos às necessidades do problema em questão.

REFERÊNCIAS

BRANDÃO, R. V.; ARAÚJO, I. S.; VEIT, E. A. A MODELAGEM CIENTÍFICA DE FENÔMENOS FÍSICOS E O ENSINO DE FÍSICA. **FÍSICA NA ESCOLA**, 9, n. 1, 2008. 10-14.

GERHARDT, T. E. et al. **MÉTODOS DE PESQUISA**. PORTO ALEGRE: UFRG, 2009. Disponível em: <<https://lume.ufrgs.br/handle/10183/52806>>.

HALLIDAY, D.; RESNICK, R.; WALKER, J. **FUNDAMENTOS DE FÍSICA - GRAVITAÇÃO, ONDAS E TERMODINÂMICA**. 8. ed. RIO DE JANEIRO: LTC, v. 2, 2009.

LAGE, E. EQUAÇÃO DE ESTADO DE VAN DER WAALS. **REVISTA DE CIÊNCIA ELEMENTAR**, 7, n. 1, 2019. 5. Disponível em: <<http://doi.org/10.24927/rce2019.005>>. Acesso em: 24 OUTUBRO 2024.

LIMA, L. S. Lei dos gases ideais. **Revista de Ciência Elementar**, 3, n. 1, 2015. 95. Acesso em: 24 OUTUBRO 2024.

NASCIMENTO, R. D. MODELAGEM MATEMÁTICA E FÍSICA: UM ESTUDO SOBRE A ELEVADA TEMPERATURA NA SALA DE AULA. **ENCONTRO NACIONAL DE EDUCAÇÃO MATEMÁTICA**, SÃO PAULO, 16 JULHO 2016.

NOVA, V. **Aplicações da equação de Van Der Waals no estudo de colisões entre átomos e moléculas**. Universidade Estadual Paulista (Unesp). [S.l.], p. 108. 2012.

NUSSENZVEIG, H. M. **CURSO DE FÍSICA BÁSICA - FLUIDOS, OSCILAÇÕES E ONDAS, CALOR**. 4. ed. SÃO PAULO: E. Blücher, v. 2, 2002.

SOUZA, E. S. R. D.; SANTO, A. O. D. E. MODELAGEM MATEMÁTICA E LETRAMENTO CIENTÍFICO NO ENSINO DE FÍSICA. **REVISTA EXITUS**, SANTARÉM, 9, n. 4, 2019. 635-664. Disponível em: <<https://doi.org/10.24065/2237-9460.2019v9n4id1028>>. Acesso em: 24 OUTUBRO 2024.

SOUZA, P. M. V. D. **MODELOS DE GASES REAIS NO ENSINO DE FÍSICA BÁSICA: uma análise curricular de graduações de Física no Brasil**. UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO. CARUARU, p. 41. 2023.

SOUZA, P. M. V. D.; SILVA JÚNIOR, V. M. D. **Análise da bibliografia adotada em disciplinas de Termodinâmica básica de graduações em Física do Brasil**. XXV Simpósio Nacional de Ensino de Física – SNEF 2023. São Paulo: [s.n.]. 2023. p. 1-3.

TIPLER, P. A.; MOSCA, G. **FÍSICA PARA CIENTISTAS E ENGENHEIROS - MECÂNICA, OSCILAÇÕES E ONDAS E TERMODINÂMICA**. 6. ed. RIO DE JANEIRO: LTC, v. 1, 2006.

VASCONCELOS, F. H. L.; SANTANA, J. R.; BORGES NETO, H. O ensino de física com a utilização da modelagem matemática computacional aplicada a educa-

ção com o software Modellus. In: SOUSA, F. E. E. D., et al. **Sequência Fedathi:** uma proposta para o ensino de matemática e ciências. FORTALEZA: EDIÇÕES UFC, 2013. p. 151-174. Disponível em: <<http://www.repositorio.ufc.br/handle/riufc/47526>>.

VERBENO, C. H. S. et al. A MODELGAEM COMPUTACIONAL NO ENSINO DE FÍSICA: UM ESTUDO EXPLORATÓRIO SOBRE O OSCILADOR HARMÔNICO SIMPLES. **REVISTA BRASILEIRA DE ENSINO DE CIÊNCIAS E TECNOLOGIA**, PONTA GROSSA, 9, MAIO 2016. 24-42.

WIKIPEDIA. Gás Real. **WIKIPEDIA:** A ENCICLOPEDIA LIVRE, 2024. Disponível em: <https://pt.wikipedia.org/wiki/G%C3%A1s_real>. Acesso em: 27 OUTUBRO 2024.

YOUNG, H. D.; FREEDMAN, R. A. **FÍSICA 2 - TERMODINÂMICA E ONDAS**. 14. ed. SÃO PAULO: PEARSON EDUCATION, v. 2, 2008.