

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS
CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS E DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA QUÍMICA

Luis Henrique de Barros e Sousa

**O ensino de Termodinâmica e seu impacto na
formação do profissional de Engenharia Química na Era
da Indústria 4.0**

São Carlos – SP
2025

Luis Henrique de Barros e Sousa

**O ensino de Termodinâmica e seu impacto na formação do profissional de
Engenharia Química na era da Indústria 4.0**

Comentado [FC1]: Vide sugestões da capa para iniciais
maiúsculas

Trabalho de Graduação apresentado ao
Departamento de Engenharia Química da Universidade Federal de São Carlos para
obtenção do título de bacharel em
Engenharia Química.

Orientador: Prof. Dr. Gustavo Dias Maia

São Carlos - SP
2025

RESUMO

A crescente digitalização e automação trazidas pela Indústria 4.0 têm transformado profundamente o cenário industrial e demandado uma significativa atualização nas competências profissionais dos engenheiros químicos. Nesse contexto, o ensino tradicional de disciplinas fundamentais como a Termodinâmica enfrenta desafios significativos para acompanhar essas mudanças. Este trabalho analisa como o ensino de Termodinâmica pode ser adaptado para atender às demandas da Indústria 4.0, caracterizada pela digitalização, automação e integração de dados em tempo real nos processos produtivos. Por meio de revisão bibliográfica e síntese crítica, discorrem-se os desafios históricos de aprendizagem como complexidade matemática, abstração conceitual e articulação teoria-prática, e relacionam-se tais desafios às competências técnicas e comportamentais exigidas do engenheiro químico na quarta revolução industrial. O estudo enfatiza estratégias pedagógicas inovadoras, como aprendizagem baseada em projetos, uso de simulação computacional, gamificação e visualização interativa, capazes de favorecer pensamento crítico, resolução de problemas complexos e domínio de ferramentas digitais. Conclui-se que a integração de tecnologias digitais ao currículo de Termodinâmica, aliada a metodologias ativas, potencializa a formação de profissionais flexíveis, interdisciplinares e preparados para ambientes industriais hiperconectados.

Palavras-chave: Termodinâmica; Indústria 4.0; ensino de engenharia; competências; engenharia química.

Comentado [FC2]: Faltou introduzir o problema no início do resumo

ABSTRACT

The ongoing digitalization and automation processes introduced by Industry 4.0 have significantly reshaped the industrial landscape, demanding substantial updates in the competencies required from chemical engineers. In this evolving scenario, traditional teaching methodologies for fundamental disciplines such as Thermodynamics encounter substantial challenges to adequately respond to new industry standards. This study examines how Thermodynamics education can be adapted to meet the requirements of Industry 4.0, an era defined by digitization, automation and real-time data integration in manufacturing processes. Through a critical literature review, it discusses the historical learning challenges like mathematical complexity, conceptual abstraction and theory-practice articulation, and links them to the technical and *soft skills* demanded from chemical engineers in the fourth industrial revolution. The work highlights innovative pedagogical strategies such as project-based learning, computer simulation, gamification and interactive visualization, which foster critical thinking, complex problem solving and proficiency with digital tools. It is concluded that embedding digital technologies into the Thermodynamics curriculum, along with active learning methodologies, enhances the training of flexible and interdisciplinary professionals ready for hyper-connected industrial environments

Keyword: thermodynamics; Industry 4.0; engineering education; competencies; chemical engineering.

AGRADECIMENTOS

Ao concluir este trabalho, gostaria de expressar minha mais profunda gratidão a todos que, de alguma forma, contribuíram para que esta trajetória fosse possível.

Em primeiro lugar, agradeço profundamente aos meus pais, cujo amor, esforço e apoio tornaram possível a realização deste sonho. Estudar longe de casa não foi uma tarefa fácil, e sem o amparo constante deles, nada disso teria sido possível. Esta conquista é, antes de tudo, também deles.

Aos colegas que fizeram parte desta caminhada, compartilhando dúvidas, conquistas e momentos de superação, meu sincero reconhecimento. A troca de experiências e o apoio mútuo foram fundamentais ao longo dessa jornada.

Aos amigos que encontrei em Mogi, minha segunda família, deixo um agradecimento especial. A presença de vocês, sempre ao meu lado nos momentos bons e difíceis, foi essencial para que eu me sentisse acolhido, mesmo distante do meu lar.

Ao professor Dr. Gustavo Dias Maia, meu orientador, sou imensamente grato pelo apoio constante, pela paciência e pela compreensão não apenas durante a elaboração deste trabalho, mas ao longo de todos os anos que passei em São Carlos. Sua orientação foi decisiva na minha formação acadêmica e pessoal, e sua confiança em meu potencial, mesmo nos momentos em que eu mesmo duvidei, foi fundamental para que eu chegasse até aqui.

Por fim, agradeço à Universidade Federal de São Carlos e ao ensino superior público brasileiro, que me proporcionaram uma formação gratuita e de qualidade. Reconheço o privilégio que tive ao acessar uma instituição como esta, e manifesto o desejo de que esse direito seja garantido a todos os cidadãos, com acesso cada vez mais ampliado à educação pública, gratuita e de excelência.

A todos que fizeram parte desta trajetória, o meu mais sincero obrigado.

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	1
2. REVISÃO DA LITERATURA	1
2.1. DESAFIOS NO ENSINO DE TERMODINÂMICA.....	1
2.1.1. <i>A Termodinâmica como Disciplina Fundamental na Engenharia Química</i>	1
2.1.2. <i>Estratégias Pedagógicas para o Ensino de Termodinâmica</i>	2
2.1.3. <i>A Relação entre Matemática e Aprendizado em Termodinâmica</i>	3
2.1.4. <i>Estruturação das Disciplinas de Termodinâmica em Cursos de Engenharia</i>	6
2.3. CONTEXTUALIZAÇÃO DA ERA DA INDÚSTRIA 4.0.....	10
2.3.1. <i>O Conceito da Indústria 4.0</i>	10
2.3.2. <i>Histórico da Indústria 4.0</i>	11
2.3.3. <i>As Quatro Revoluções Industriais</i>	12
2.3.4. <i>A Indústria 4.0</i>	15
2.4. COMPETÊNCIAS EXIGIDAS PELA INDÚSTRIA 4.0	17
2.4.1. <i>O Impacto das revoluções industriais em postos de trabalho</i>	17
2.4.2. <i>As 6 competências chave da Indústria 4.0</i>	18
2.4.3. <i>Características das Habilidades Profissionais nas Últimas Revoluções Industriais</i>	22
3. MATERIAIS E MÉTODOS	28
4. ANÁLISE DOS CENÁRIOS DISPONÍVEIS	29
4.1 ESTRATÉGIAS PEDAGÓGICAS E TECNOLÓGICAS NO ENSINO DE TERMODINÂMICA	29
4.1.1. <i>Abordagens Ativas e Projetos Investigativos no Ensino de Termodinâmica</i>	29
4.1.2. <i>Sistemas de Resposta do Estudante (SRS) e Gamificação no Ensino de Termodinâmica para Turmas Numerosas</i>	38
4.1.3. <i>Termodinâmica Acessível: Uso do Excel e VBA para Ensino de Propriedades de Soluções</i>	43
4.2. ESTUDOS DE CASO.....	47
4.2.1. <i>Tendências e Demandas em Termodinâmica: Resultados do Inquérito da EFCE (2019 vs. 2010)</i>	47
4.2.2. <i>Tendências e Desafios na Modelagem Termodinâmica Industrial: Entre Simulações Moleculares e Aprendizado de Máquina</i>	52
CONCLUSÃO	58
REFERÊNCIAS	59

LISTA DE FIGURA

FIGURA 1: PERSPECTIVA HISTÓRICA DAS REVOLUÇÕES INDUSTRIAIS. FONTE: (OTZEMEL E GURZEV (2020))	13
FIGURA 2: TECNOLOGIAS-CHAVE FUNDAMENTAIS PARA A INDÚSTRIA 4.0. FONTE: (LAWRENCE ET AL. (2019))	15
FIGURA 3: TECNOLOGIAS-CHAVE FUNDAMENTAIS PARA A INDÚSTRIA 4.0.....	19
FIGURA 4: PUBLICAÇÕES ANUAIS DE BASES DE DADOS ACADÊMICAS . FONTE: BORRAGEIRO E MENNEGA (2023)	23
FIGURA 5: REPRESENTAÇÃO VISUAL DOS TEMAS IDENTIFICADOS. FONTE: BORRAGEIRO E MENNEGA (2023)	24
FIGURA 6: HORAS EXTRACURRICULARES DEDICADAS PELOS ESTUDANTES À PREPARAÇÃO DE PERGUNTAS E RESPOSTAS (Q&A), E SUA AVALIAÇÃO QUANTO AO ESFORÇO INVESTIDO. FONTE: (DONG ET AL. (2021))	31
FIGURA 7: EQUAÇÃO DE ESTADO DE UM CRISTAL MOLECULAR ENERGÉTICO. FONTE: (DONG ET AL. (2021))	35
FIGURA 8: NÚMERO DE OPERAÇÕES DE PONTO FLUTUANTE REALIZADAS POR SEGUNDO PELO SUPERCOMPUTADOR MAIS RÁPIDO EM UM DETERMINADO ANO. FONTE: (DONGARRA ET AL. (2024))	55

1 INTRODUÇÃO

A Termodinâmica, enquanto disciplina científica que estuda as relações entre energia, trabalho e matéria, estabelece-se como pilar essencial na formação do engenheiro químico. Sua aplicação transcende a teoria, permeando o projeto, a operação e a otimização de processos industriais, desde a síntese de materiais até a gestão sustentável de recursos energéticos (Barragán-Arroche e Bazúa, 2004). No entanto, o ensino dessa área enfrenta desafios históricos, como a complexidade matemática inerente, a dificuldade em articular conceitos abstratos com aplicações práticas e a necessidade de interpretação multiescalar de estados físicos (Bain et al., 2014).

No cenário atual, marcado pela Quarta Revolução Industrial (Indústria 4.0), tais desafios são amplificados. A integração de tecnologias digitais — como Internet das Coisas (IoT), inteligência artificial (IA), robótica avançada e *big data* — redefine as competências exigidas dos profissionais, demandando não apenas domínio técnico, mas também habilidades interdisciplinares, adaptabilidade e pensamento crítico (Pereira et al., 2017; Maisiri et al., 2019). Nesse contexto, a formação em Engenharia Química precisa equilibrar a consolidação de fundamentos termodinâmicos com preparação para ambientes industriais hiperconectados, nos quais a análise de dados, a simulação computacional e a eficiência energética são prioritárias.

Este trabalho busca analisar como o ensino de Termodinâmica pode ser adaptado para atender às demandas da Indústria 4.0, explorando estratégias pedagógicas inovadoras e competências emergentes. Para isso, realiza-se uma revisão crítica da literatura, abordando três eixos principais: (i) os desafios históricos e contemporâneos no ensino da disciplina; (ii) o impacto das tecnologias digitais na redefinição de perfis profissionais; e (iii) metodologias ativas, como projetos investigativos, gamificação e integração de ferramentas computacionais, que promovem a articulação entre teoria e prática (Dong et al., 2021; Caserta et al., 2021).

2. Revisão da Literatura

2.1. Desafios no Ensino de Termodinâmica

2.1.1. A Termodinâmica como Disciplina Fundamental na Engenharia Química

Comentado [FC3]: Revisar todos os termos estrangeiros e colocar em itálico

Segundo a literatura, a Termodinâmica enquanto parte integrante das ciências físicas (também conhecidas como “ciências exatas”) estuda a natureza da energia, bem como suas diferentes formas de existência e de transmissão entre sistemas termodinâmicos. Em particular, se configura como uma fonte de conhecimento que permite aos engenheiros químicos projetarem, operar e controlar uma ampla variedade de processos físicos e químicos. Juntamente com a físico-química, os fenômenos de transporte e a cinética de reação, a Termodinâmica estabelece as bases da Engenharia Química (Barragán-Arroche e Bazúa, 2004). Uma vez que a Termodinâmica pertence ao campo das ciências físicas, se torna necessária uma análise específica da pedagogia desse campo para abordar os problemas subjacentes às práticas de ensino e ao processo de aprendizagem, especialmente reconhecendo suas características no âmbito do ensino superior (Porlán e Rivero, 1998).

De acordo com Gatti et al. (2023) no contexto das práticas de ensino voltadas à formação de engenheiros químicos, identificam-se algumas dificuldades específicas relacionadas a: (i) os objetivos centrais do ensino de Termodinâmica enquanto tecnologia básica; (ii) a apresentação, exposição e explicação dos conteúdos teóricos da disciplina; (iii) a articulação entre teoria e prática, ou seja, a aplicação efetiva dos fundamentos teóricos; e (iv) a complexidade na abordagem de problemas típicos, seja pela necessidade de descrever situações reais cujo comportamento não admite representações baseadas em modelos ideais, seja pelos procedimentos de cálculo numérico requeridos para obtenção de resultados e sua interpretação subsequente.

2.1.2. Estratégias Pedagógicas para o Ensino de Termodinâmica

Ao comentar sobre os desafios do ensino de Termodinâmica, mais especificamente o ensino para estudantes universitários no curso de química, Peter Atkins (2011) afirma que a disciplina é, com razão, amplamente reconhecida como uma verdadeira “floresta de equações”. Uma forma de contribuir para o entendimento desta disciplina consiste na elaboração de um “*road map*” (mapa rodoviário ou roteiro) que auxilie na migração entre diferentes equações. Embora se possa confundir tal abordagem com um “mapa conceitual”, a distinção fundamental reside no fato de que o “*road map*” se estrutura como uma rede de equações e orientações específicas para a realização de aproximações, a imposição de restrições ou a adoção de outras relações. O autor destaca que é possível construir esses roteiros para diversas áreas da físico-química, o que potencialmente oferece grande apoio a estudantes que se sentem perdidos nessa

densa floresta de equações (Atkins e de Paula, 2010).

Ainda que a visualização seja destacada como ferramenta valiosa para fomentar a compreensão, Atkins (2011) reconhece que certos tópicos, a exemplo do desenvolvimento da equação de Clausius–Clapeyron, podem não se prestar facilmente a representações intuitivas. Nesse contexto, uma das estratégias sugeridas pelo autor envolve o uso de analogias que facilitem a internalização e interpretação dos princípios fundamentais. Como exemplo em Atkins (2008), o mesmo emprega a figura de um espirro para ilustrar a maneira pela qual uma transferência de energia na forma de calor pode gerar diferentes níveis de desordem, dependendo do ambiente em que ocorre: em uma rua movimentada (temperatura alta), o espirro causa pouca perturbação, já em uma biblioteca silenciosa (temperatura baixa), o mesmo espirro implica um grau muito maior de desordem.

Além disso, o mesmo destaca que a área de Termodinâmica estatística se apresenta como um desafio adicional no ensino de Termodinâmica, em razão principalmente da alta densidade de conteúdo matemático e do detalhamento complexo das etapas de cálculo. Ainda assim, reforça-se a importância dessa disciplina para a formação de químicos e outros profissionais de áreas correlatas, pois fornece o elo conceitual entre as propriedades de moléculas individuais e o comportamento macroscópico de sistemas químicos, incluindo a compreensão de grandezas como constantes de equilíbrio e funções de partição.

A visualização, conforme aponta o autor, constitui um recurso fundamental na aprendizagem da Termodinâmica. Para Atkins (2011), a tentativa de representar derivações e expressões em termos visuais permite ao estudante verificar se de fato entendeu o conteúdo apresentado, favorecendo, assim, uma assimilação mais profunda.

2.1.3. A Relação entre Matemática e Aprendizado em Termodinâmica

Ao revisar pesquisas relacionadas ao ensino e aprendizagem de Termodinâmica em nível universitário, Bain et al. (2014) apresenta uma correlação entre matemática e conhecimentos termodinâmicos, ao avaliar pesquisas exclusivamente de um corpo docente que leciona Termodinâmica em nível superior, especificamente aqueles que conduzem pesquisas educacionais baseadas em disciplina (DBER/discipline-based education research).

De acordo com Derrick e Derrick (2002), foram identificados quatro preditores centrais de sucesso em disciplinas de físico-química. Primeiramente, observou-se uma forte correlação entre o desempenho em físico-química e a nota final na segunda disciplina de cálculo. Além

disso, verificaram-se associações igualmente significativas entre o êxito em físico-química e a segunda disciplina de química orgânica, bem como a segunda disciplina de física geral. Dentro da análise desenvolvida pelos autores, a nota final na segunda disciplina de física geral destacou-se como a variável mais relevante. Em contraste, as notas finais em outras disciplinas de química correlatas não apresentaram associação estatisticamente significativa com o desempenho em físico-química. Por fim, os autores observaram uma correlação negativa entre o ato de repetir disciplinas de química, matemática e física e o sucesso em físico-química.

Em outra investigação, Hahn e Polik (2004) apontaram que o desempenho em matemática, medido pela média das notas em todas as disciplinas matemáticas cursadas por um determinado estudante, exibia forte correlação com o sucesso em físico-química. Os autores também relataram correlações entre as notas obtidas em química geral (média das notas referentes ao primeiro e ao segundo semestres dessa disciplina) e as pontuações obtidas em tarefas de físico-química.

Bain et al. (2014) destaca que ainda são poucos os estudos DBER que devidamente avaliam o entendimento dos alunos em matemática no contexto de Termodinâmica. Conforme observado por Becker e Towns (2012), a compreensão dos conceitos termodinâmicos requer que os estudantes sejam capazes de transitar entre as representações matemáticas e o significado físico que essas expressões representam. Nesse sentido, a habilidade de interpretar equações e modelos de forma a compreender o fenômeno subjacente emerge como elemento essencial para o aprendizado efetivo em Termodinâmica.

A literatura pertinente reúne investigações acerca da proficiência e do entendimento de conceitos matemáticos por parte dos estudantes em currículos de Termodinâmica, tanto em cursos de graduação em química quanto em física. Thompson et al. (2006) examinaram a compreensão de derivadas parciais e das relações de Maxwell em uma disciplina de Termodinâmica avançada, ministrada em um departamento de física. Paralelamente, Bucy et al. (2007) analisaram a aplicação de derivadas parciais a propriedades de materiais, observando as respostas de estudantes em tarefas de casa e avaliações escritas em um curso de física térmica. Tais estudos sugerem que os alunos podem apresentar dificuldades para extrair significado físico das expressões matemáticas e, igualmente, para elaborar representações matemáticas fundamentadas em descrições de processos físicos. Além disso, os achados evidenciam problemas na compreensão do conceito de manter variáveis fixas em uma derivada parcial, ressaltando a confusão recorrente entre as noções de “constante” e “fixa” nesse contexto (Bain et al. (2014)).

Pollock et al. (2007) analisaram o entendimento de estudantes sobre trabalho no

contexto da física e de funções dependentes de trajetória no contexto da matemática. Em um curso avançado de física térmica, os participantes receberam tanto questões de física quanto seus análogos matemáticos correspondentes (definidos como “questões de física sem física”). Os resultados indicam que os estudantes demonstram um entendimento compartimentado das duas áreas, ao invés de um arcabouço conceitual unificado. Por exemplo, uma parte considerável dos alunos classificou o trabalho como uma quantidade independente de trajetória (ou seja, uma função de estado). Verificou-se, ainda, que os estudantes enfrentaram dificuldades ao comparar o trabalho realizado pela expansão de um gás em um sistema fechado com base em diagramas de pressão-volume (P-V) e na aplicação correta de integrais definidas. Os autores interpretam tais achados em termos de lacunas na proficiência matemática, em vez de falhas relacionadas à compreensão conceitual de física.

Christensen e Thompson (2012) deram continuidade à estratégia de aplicar “questões de física sem física” como forma de investigar a compreensão de derivadas, um conceito fundamental para diversos modelos matemáticos em Termodinâmica. Os autores observaram que estudantes de cursos avançados de física apresentaram dificuldades ao hierarquizar a magnitude e a direção de inclinações instantâneas, com base nas respostas relativas à interpretação gráfica de funções de uma variável.

Além disso, Christensen e Thompson (2010) analisaram o modo como os estudantes resolviam problemas relacionados ao trabalho de expansão de gases, valendo-se de diagramas de pressão-volume (P-V). A partir de dois diferentes instrumentos aplicados em uma disciplina de física térmica e em um curso de cálculo em seu terceiro semestre, realizaram ainda entrevistas para investigar o processo de resposta dos participantes às questões propostas. Os resultados indicam que cerca de metade dos estudantes avaliados foi capaz de responder corretamente às perguntas sobre trabalho, tanto no contexto físico quanto na versão “sem física”, envolvendo a comparação das áreas sob duas curvas distintas. A parcela restante, no entanto, apoiou-se em justificativas relacionadas, porém imprecisas, ao explicar as diferenças de magnitude entre essas áreas.

Diversos estudos realizados pela comunidade de Pesquisa em Ensino de Física (PER – *Physics Education Research*) apresentam evidências preliminares indicando que estudantes enfrentam dificuldades na execução de operações matemáticas essenciais para o estudo e para a compreensão da Termodinâmica. Em uma análise integrada desses estudos, Bain et al. (2014) sugerem que os achados descrevem uma relação entre o conhecimento matemático e o domínio conceitual da Termodinâmica.

Além disso, são destacadas implicações importantes para a prática pedagógica. Segundo

os autores, caso o objetivo do docente seja desenvolver a capacidade dos estudantes de compreender conceitos termodinâmicos por meio de relações e representações matemáticas, então é necessário oferecer apoio explícito ao aprendizado dos significados dos conceitos matemáticos envolvidos, como derivadas, derivadas parciais, integrais e funções de estado, especificamente no contexto da Termodinâmica.

2.1.4. Estruturação das Disciplinas de Termodinâmica em Cursos de Engenharia

2.1.4.1. Disciplina de Termodinâmica para Engenharia Mecânica

Segundo Karimi (2008), a Termodinâmica constitui uma disciplina obrigatória em praticamente todos os cursos de graduação em Engenharia Mecânica nos Estados Unidos, sendo usualmente ministrada em duas etapas. Em muitas instituições, exige-se uma sequência de duas disciplinas semestrais de Termodinâmica ao longo do programa, enquanto outras optam por uma disciplina de 3 a 4 créditos enfocando os conceitos fundamentais e oferecem, como eletiva, uma segunda disciplina voltada para aplicações práticas. De modo geral, o primeiro curso introduz os conceitos básicos, como a definição de sistemas termodinâmicos, propriedades extensivas e intensivas, conservação de massa e energia e a segunda lei da Termodinâmica, além de ensinar os estudantes a utilizar tabelas ou equações adequadas para avaliar propriedades Termodinâmicas. Já o segundo curso concentra-se, em grande parte, na aplicação desses conceitos e leis fundamentais, aprofundando-se em temas como análise de ciclos termodinâmicos, misturas gasosas, aplicações psicrométricas e processos de combustão. Adicionalmente, tópicos como exergia, relações Termodinâmicas, introdução ao escoamento compressível, equilíbrio químico e de fases também podem ser abordados nesta fase.

Nesse contexto, a análise de Karimi (2008) sobre o domínio de conceitos fundamentais em cursos introdutórios de Termodinâmica mostra-se relevante ao relacionar diretamente a compreensão sólida dos princípios básicos com o êxito em disciplinas de Termodinâmica aplicada. Em consonância com suas observações, o autor verificou que a proficiência alcançada pelos estudantes no primeiro curso influencia de maneira determinante em seu desempenho na segunda disciplina.

É relatado que ao longo de anos de experiência no ensino em dois semestres, diversos autores têm constatado que, enquanto alguns alunos demonstram facilidade ao avançar para os tópicos mais complexos, outros enfrentam maiores dificuldades e quase não conseguem acompanhar o conteúdo ministrado. Essa disparidade de conhecimento de base pode se

converter em um desafio significativo para o professor responsável pela abordagem aplicada da Termodinâmica, reforçando, portanto, a necessidade de estratégias pedagógicas que fortaleçam o entendimento dos conceitos fundamentais desde a etapa inicial do curso.

O artigo escrito por Karimi (2008) descreve como o conhecimento prévio dos estudantes é avaliado no início do semestre, apresentando métodos para atenuar as disparidades nos níveis de domínio dos conteúdos e detalhando a abordagem pedagógica adotada para promover o êxito acadêmico.

Observou-se que muitos discentes matriculados no segundo curso de Termodinâmica não possuíam pleno entendimento de diversos conceitos fundamentais. O autor sugere que os estudantes adquiriram apenas um conhecimento superficial para serem aprovados na primeira disciplina e, pouco tempo após sua conclusão, já não recordavam parte do conteúdo essencial para a segunda etapa. As principais dificuldades encontradas envolviam uma compreensão aprofundada de noções básicas, como a distinção entre sistemas abertos e fechados, bem como entre propriedades intensivas e extensivas.

Além disso, diversos alunos apresentaram problemas ao aplicar as equações gerais de conservação de massa, assim como as primeiras e segundas leis da Termodinâmica em análises de turbinas, bombas, bicos, compressores e trocadores de calor. Alguns também enfrentam obstáculos ao utilizar tabelas Termodinâmicas para a avaliação de propriedades, sobretudo na região de líquido comprimido, e não reconhecem adequadamente as diferenças entre o uso das tabelas para determinar variações de energia interna, entalpia e entropia específicas de gases ideais e a aplicação de equações desenvolvidas sob a hipótese de calores específicos constantes. Tais constatações, conforme apontado no estudo de Karimi (2008), reforçam a importância de consolidar os fundamentos termodinâmicos na etapa inicial do curso, a fim de garantir o sucesso dos estudantes em disciplinas mais avançadas.

Observou-se ainda que alguns estudantes que ingressam na segunda disciplina de Termodinâmica enfrentam dificuldades ao simplificar as equações de conservação de massa, de energia (ou primeira lei da Termodinâmica) e da segunda lei da Termodinâmica para aplicações específicas. Por exemplo, embora retenham a informação de que, em dispositivos de estrangulamento, a entalpia permanece constante, não conseguem explicar o fundamento que justifica tal comportamento.

Como observado pelo autor, muitos alunos continuam a apresentar incertezas quanto às convenções de sinal adotadas na formulação das equações da primeira e segunda leis, o que dificulta a análise correta de ciclos termodinâmicos. Além disso, parte dos alunos parecem não compreender plenamente as limitações e os cenários de aplicabilidade de equações específicas

voltadas ao cálculo de propriedades Termodinâmicas, tampouco recordam as condições necessárias para a utilização desses métodos.

Com o objetivo de avaliar o conhecimento prévio dos estudantes, Karimi aplicou um teste de pré-requisitos para aferir o nível de conhecimento prévio dos alunos em relação à disciplina, descrito em literaturas seguintes (2005). Esse teste inclui, além das questões fundamentais, perguntas adicionais referentes à avaliação de propriedades e aos conhecimentos matemáticos necessários para cursar Termodinâmica aplicada.

Os resultados apresentados apontam que nem todos os estudantes apresentam uma compreensão clara e aprofundada dos conteúdos trabalhados na disciplina introdutória. Conseqüentemente, o professor do segundo curso de Termodinâmica deveria buscar estratégias para suprir essas lacunas de formação logo no início do semestre, conforme as recomendações do autor.

Ao término do mesmo semestre, foi realizado um questionário para coletar o feedback dos alunos quanto à ênfase dada aos conceitos fundamentais na resolução de problemas em Termodinâmica. Os dados obtidos indicaram que, ao iniciar o processo de resolução a partir das equações mais gerais, os alunos obtiveram maior facilidade na resolução de problemas termodinâmicos.

2.1.4.2. Disciplina de Termodinâmica para Engenharia Química

Conforme relatado por Gatti et al. (2023), um importante tópico abordado no ensino da Termodinâmica no contexto da Engenharia Química é a exergia, compreendida como a parcela da energia de um sistema termodinâmico em desequilíbrio com o ambiente que pode ser convertida em trabalho útil. A exergia atua como um parâmetro utilizado para mensurar o grau de irreversibilidade de um processo, bem como as perdas associadas ao aproveitamento da energia disponível (Rodríguez, 2003). Assim, uma redução na qualidade da energia implica diretamente na destruição de exergia.

De acordo com Dincer e Rosen (2007), uma vez que a exergia representa a porção da energia que possui valor econômico e utilidade prática para a sociedade, seu tratamento deve ser realizado com especial atenção. O conceito de exergia, fundamentado na aplicação da Primeira e Segunda Lei da Termodinâmica, permite sua aplicação direta em processos industriais específicos, por meio do projeto e da otimização, visando aumentar a eficiência e promover o uso racional da energia. Dessa forma, torna-se possível estudar e comparar

diferentes tecnologias, aperfeiçoar o desempenho operacional de equipamentos existentes, avaliar os efeitos das medidas de conservação energética, além de possibilitar o desenvolvimento otimizado de novos equipamentos (Dincer e Rosen, 2007; Rodríguez, 2003).

A exergia é geralmente incluída como uma unidade temática na disciplina de Termodinâmica. Em algumas situações, esse tópico é abordado em físico-química, associado às funções Termodinâmicas auxiliares da Segunda Lei, como as funções de Gibbs e Helmholtz; em outros contextos, é tratado no âmbito da engenharia de processos, relacionado a métodos de otimização energética, tais como o método Pinch (Klemeš et al., 2018).

Independentemente da disciplina, o tema exergia é normalmente apresentado após a abordagem das unidades temáticas referentes ao Primeiro e Segundo Princípios, considerando sistemas termodinâmicos fechados e abertos. Isso possibilita a aplicação de balanços de exergia em sistemas mais complexos da engenharia, tais como ciclos termodinâmicos de potência a gás, a vapor e ciclos combinados gás-vapor, bem como ciclos de refrigeração.

Gatti et al. (2023) realizaram um levantamento estatístico com o objetivo de analisar o desempenho dos estudantes na avaliação da compreensão do conceito de exergia. Para isso, foram considerados os resultados obtidos nas provas da disciplina de Termodinâmica em Engenharia Química I, ministrada na Facultad de Ingeniería (Universidad Nacional de La Plata), durante o período entre 2015 e 2019. Foram analisadas três instâncias de avaliação, que envolveram um total de 182 estudantes na primeira instância, 228 na segunda instância e 95 na terceira.

De acordo com os autores, algumas das dificuldades enfrentadas pelos estudantes na compreensão do tema exergia poderiam ser atribuídas às divergências presentes nos livros-texto ao referirem-se ao mesmo conceito utilizando diferentes definições. Nesse sentido, existem falhas relacionadas ao aprendizado da linguagem específica da Termodinâmica como componente essencial da aprendizagem significativa. Em sua proposta, Gatti et al. (2023) buscam esclarecer os conceitos relacionados ao trabalho reversível, trabalho útil e trabalho útil ideal.

Com o intuito de identificar os aspectos menos compreendidos pelos estudantes, foi realizada uma análise dos erros mais frequentemente cometidos nas avaliações. Constatou-se que os estudantes apresentaram maiores dificuldades relacionadas aos seguintes pontos:

- Identificação da exergia produzida e da exergia consumida ou fornecida em determinado processo.
- Reconhecimento dos termos do balanço exergético associados às diferentes formas de energia.

- Identificação e cálculo do trabalho perdido, irreversibilidade e exergia destruída.
- Classificação correta do tipo de sistema termodinâmico ao qual aplicar o balanço de exergia.
- Definição e cálculo da eficiência exergética.

A proposta apresentada pelos autores busca promover a aprendizagem significativa da exergia, abordando especificamente os seguintes tópicos:

- Definir o conceito de exergia, explicitando os diferentes nomes que este conceito recebe e esclarecendo seu significado.
- Definir o ambiente de referência, diferenciando-o das demais definições de vizinhanças, universo e ambiente natural.
- Explicar como calcular as variáveis de estado de um sistema na condição Termodinâmica do estado morto.
- Diferenciar entre os conceitos de trabalho reversível, trabalho útil e exergia.
- Modificar a forma de apresentação do balanço exergético para sua aplicação em sistemas fechados e abertos.
- Diferenciar entre os conceitos de trabalho perdido, irreversibilidade e exergia destruída.
- Diferenciar eficiências baseadas no Primeiro e no Segundo Princípios e explicar a necessidade de definir eficiência exergética.
- Conceituar eficiência exergética como medida do uso eficiente da energia disponível em um processo.
- Explicar como calcular eficiência exergética em diferentes dispositivos e equipamentos de processo.

2.3. Contextualização da Era da Indústria 4.0

2.3.1. O Conceito da Indústria 4.0

O termo “Indústria 4.0” é frequentemente chamado de quarta revolução industrial e abrange um conjunto de avanços tecnológicos que estão tendo um alto impacto no cenário industrial atual. Nesta seção, o contexto do fenômeno Indústria 4.0 é analisado, bem como a visão de manufatura futura, possibilitada por este novo paradigma de manufatura. Além disso, as principais características sobre este conceito não consensual são apresentadas para entender melhor os principais significados da Indústria 4.0 (Pereira et al., 2017).

2.3.2. Histórico da Indústria 4.0

Segundo Pereira et al., (2017), a Indústria 4.0 é um conceito que surgiu nos últimos anos devido a avanços tecnológicos e desenvolvimentos disruptivos no setor industrial global. O termo “Indústria 4.0” apareceu primeiramente em um artigo publicado em novembro de 2011 pelo governo alemão que resultou de uma iniciativa sobre estratégia de alta tecnologia para 2020 (Zhou et al., 2016). O conceito se baseia em ideias e perspectivas anteriores que evoluíram ao longo dos anos (Pereira et al., 2017; Kagermann, 2015).

O cenário industrial mudou drasticamente nos últimos anos como resultado de sucessivas inovações e desenvolvimentos disruptivos, particularmente no campo da tecnologia digital e manufatura. A Indústria 4.0 está sendo comparada com as três primeiras revoluções industriais que ocorreram nos últimos séculos (Schmidt et al., 2015). A primeira revolução industrial melhorou a produtividade e a eficiência por meio do uso de energia a vapor, a segunda permitiu a produção em massa por meio do uso de eletricidade, enquanto a terceira revolução industrial foi caracterizada pela automação da produção usando eletrônica e TI (Tunzelmann, 2003).

A emergente quarta revolução industrial, frequentemente referida como Indústria 4.0, envolve mudanças rápidas e disruptivas que abrangem a manufatura digital, comunicação em rede, tecnologias de computação e automação, bem como muitas outras áreas relevantes (Zhou et al., 2016). Este novo paradigma industrial abrange um conjunto de desenvolvimentos tecnológicos, como *CPS*, *IoT*, *Robótica*, *Big Data*, *Manufatura em Nuvem* e *Realidade Aumentada*, que influenciarão tanto produtos quanto processos, permitindo melhorias de eficiência e produtividade entre empresas que adotarão tais tecnologias (Schmidt et al., 2015). Além disso, a Indústria 4.0 levará a mudanças profundas nos setores da indústria e da manufatura, tendo fortes impactos ao longo de todas as cadeias de valor e fornecendo um conjunto de novas oportunidades em relação a modelos de negócios, tecnologia de produção, criação de novos empregos e organização do trabalho.

Segundo Otzemel e Gursev (2020), a Indústria 4.0 define uma metodologia para gerar uma transformação da manufatura dominante por máquinas para a manufatura digital. Para alcançar uma transformação bem-sucedida, o padrão da Indústria 4.0 deve ser bem compreendido e um roteiro claro deve ser gerado e implementado. Houve várias abordagens e discussões em andamento para gerar roteiros, alguns dos quais são revisados neste artigo.

Avaliar os componentes da Indústria 4.0 e seus respectivos recursos é importante para definir os pilares básicos de um ambiente de manufatura futuro concreto. No entanto, a literatura indica claramente a falta de metodologias de avaliação e avaliação respectivas. Como a implementação e as aplicações de teoremas e definições relacionados delineados para a 4ª revolução industrial não são maduros o suficiente para a maioria das implementações de vida útil do carretel, uma abordagem sistemática para fazer respectivas avaliações parece ser urgentemente necessária para aqueles que pretendem acelerar essa transformação. Agora é responsabilidade principal da comunidade de pesquisa desenvolver infraestrutura tecnológica com sistemas físicos, modelos de gestão, modelos de negócios, bem como alguns cenários bem definidos da Indústria 4.0 para tornar a vida dos profissionais mais fácil.

Segundo os autores, os especialistas estimam que a Indústria 4.0 e o progresso relacionado a ela terão um efeito enorme na vida social. Isso naturalmente acionará a sociedade de manufatura para melhorar seus trajés de manufatura para lidar com os requisitos do cliente e sustentar a vantagem competitiva. O Fórum Econômico Mundial preparou um relatório com a opinião de 800 especialistas e forneceu um excelente conjunto de recomendações e descobertas sobre a transformação digital. O relatório afirma que o número de robôs usados na manufatura aumentará para 2,4 milhões até 2018. Essa transformação está abrindo as portas para tecnologias implantadas no corpo humano, internet vestível, máquinas cooperantes e coordenadoras, sistemas de autodecisão, solucionadores de problemas de autonomia, máquinas de aprendizagem etc.

As máquinas estão até começando a desempenhar o papel de um membro do conselho de decisão, tendo todos os direitos para tomar as decisões. A impressão 3D está progredindo muito mais do que as expectativas, levando a artigos impressos usados na vida diária. Eles são usados até mesmo para construir órgãos artificiais. Espera-se que 1 trilhão de sensores sejam usados na vida humana até 2025. Cidades inteligentes estão progredindo em alta velocidade e se espalhando por todo o mundo. Os desenvolvimentos ao longo desta linha aumentam o desejo de gerar fábricas inteligentes mais e mais a cada dia. Há uma alta probabilidade de que mais de 6 bilhões de dispositivos conectados solicitem suporte proativamente em 2018. Os gastos globais em big data são estimados em mais de 200 bilhões de dólares em 2020 (Otzemel e Gursev, 2020).

2.3.3. As Quatro Revoluções Industriais

A primeira revolução industrial foi a introdução de instalações de produção mecânicas a partir da segunda metade do século XVIII e sendo intensificadas ao longo de todo o século XIX. A partir da década de 1870, a eletrificação e a divisão do trabalho (ou seja, o taylorismo) levaram à segunda revolução industrial. A terceira revolução industrial, também chamada de "revolução digital", ocorreu por volta da década de 1970, quando a eletrônica avançada e a tecnologia da informação desenvolveram ainda mais a automação dos processos de produção. Uma iniciativa chamada "Indústria 4.0", na qual representantes de negócios, política e acadêmicos se reuniram (Kagermann et al., 2011), promoveu a ideia de digitalização junto com alguma autonomia e auto comportamento das máquinas como uma abordagem para fortalecer o poder competitivo da indústria de manufatura alemã foi então introduzida. A Figura 1 descreve o progresso industrial em perspectiva histórica.

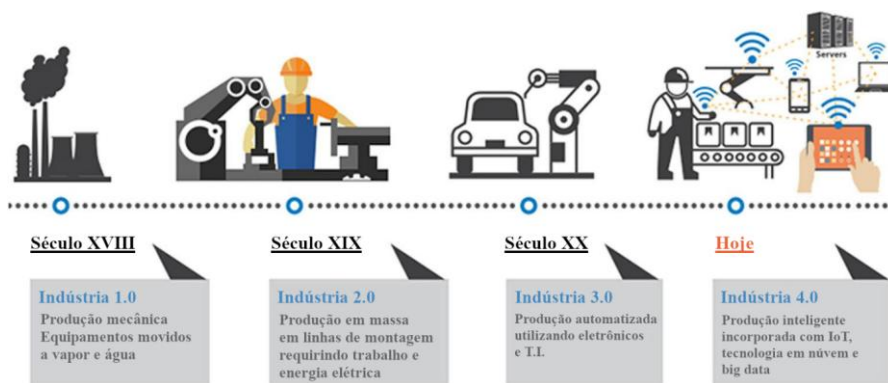


Figura 1: Perspectiva histórica das revoluções industriais. Fonte: (Otzemel e Gurzev, 2020)

Quando os desenvolvimentos da história humana são examinados, pode-se ver quão efetivas são a evolução e a mudança das técnicas de produção na maioria das revoluções desenvolvimentistas. Na primeira fase da revolução industrial, a combinação de vapor, carvão e ferro abriu a “ferrovia” com suas consequências políticas, econômicas e sociais significativas (Adeyeri et al., 2015). Enquanto o carvão forneceu a energia necessária para veículos que se movem em ferrovias, as ferrovias, por sua vez, foram usadas para transportar o carvão para os lugares distantes. Durante a segunda fase da revolução industrial, mudanças em matérias-primas básicas e fontes de energia surgiram (Bauer et al., 2014). À medida que o aço, a eletricidade, os produtos petroquímicos, bem como o carvão e o ferro entraram em produção, a

industrialização assumiu a forma que ainda vemos hoje. O ferro desempenhou um papel importante, mas não dominante, na segunda fase da revolução industrial. Supõe-se que a descoberta de computadores e desenvolvimentos tecnológicos avançados constituíram o terceiro estágio da revolução industrial (Bauernhansl, 2014). Isso também foi apontado por Chang et al. (2012) nas discussões sobre questões contemporâneas relacionadas à TI, tendências políticas e novos serviços industriais que levarão à transferência bem-sucedida em direção à sociedade inteligente ubíqua.

Em termos de manufatura, Lucke (2008) destacou a importância dos sistemas e tecnologias de manufatura estarem em uma nova fronteira, enfrentando os desafios impostos pelos requisitos em constante evolução da sustentabilidade global. Kowalska et al. (2018), Layuan e Chunlin (2002), Lee et al. (2013) apresentam um futuro tecnologicamente otimista, onde os objetos estarão conectados à internet e farão colaborações inteligentes com outros objetos em qualquer lugar, a qualquer hora.

Os autores descrevem que as instalações de fabricação estão sendo e serão equipadas com mais e mais capacidades de auto comportamento no progresso histórico. Esta não é a previsão sobre o futuro, mas, na verdade, está se tornando realidade até certo ponto, à medida que os sistemas de fabricação surgem. A ideia principal por trás da Indústria 4.0 é baseada naqueles estudos onde aplicações anteriores encorajaram o cientista a falar não apenas sobre digitalização, mas também sobre o desenvolvimento de fábricas inteligentes, integradas e totalmente autônomas.

Entretanto, segundo Lawrence et al. (2019), a quarta revolução industrial ainda não ocorreu; no entanto, existem várias tecnologias que impulsionarão seu desenvolvimento. Os autores apresentam um resumo, aqui disponível na Figura 2, sobre quais tecnologias são consideradas instrumentais na literatura revisada. A frequência indica o número de artigos que se concentram em uma tecnologia-chave específica.

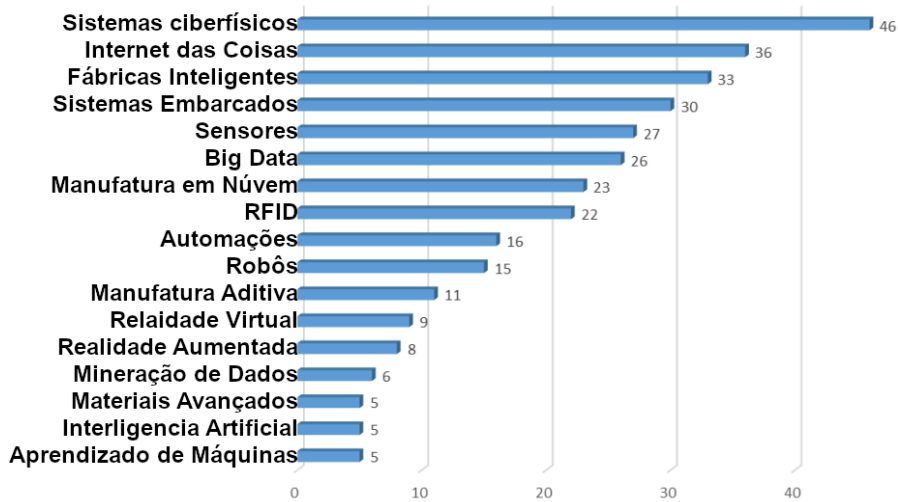


Figura 2: Tecnologias-chave fundamentais para a indústria 4.0. Fonte: (Lawrence et al. (2019))

Das 17 tecnologias listadas, 15 têm uma similaridade específica. Apesar de serem categorizadas como tecnologias industriais, elas não pretendem afetar células de produção individuais no processo de usinagem, junção, conformação etc. Sua funcionalidade serve para reunir, conectar em rede e gerenciar os dados da fábrica para agilizar e otimizar a sequência de produção. Além da robótica e da manufatura aditiva, as tecnologias restantes usam a informação como um meio de utilidade na cadeia de criação de valor.

2.3.4. A Indústria 4.0

O conceito da Indústria 4.0 tem se tornado um tópico cada vez mais importante, sendo discutido e pesquisado por acadêmicos e empresas nos últimos anos. No entanto, apesar do crescente interesse sobre o tópico da Indústria 4.0, ele ainda é um conceito não consensual. Não há uma visão clara sobre esse novo paradigma de manufatura, em relação às suas implicações e consequências. Além disso, a maioria das empresas não está ciente dos desafios que enfrentarão ao adotar a estrutura da Indústria 4.0. No entanto, acredita-se que a Indústria 4.0 ainda esteja em um estado conceitual e o mal-entendido sobre esse tópico começa com o que envolve a Indústria 4.0 e seu significado e visão. Ao contrário das revoluções passadas, esta

quarta revolução industrial está sendo prevista, o que permite que as empresas tomem medidas para preparar essa transformação, definindo o modelo de manufatura mais adequado e planejando os roteiros de destino para abordar os desafios desse novo paradigma industrial (Pereira et al., 2017).

Segundo Otzemel e Gurzev (2020), o termo Indústria 4.0 foi introduzido pela primeira vez em 2011 como “Industrie 4.0” por um grupo de representantes de diferentes áreas (como negócios, política e academia) sob uma iniciativa para aumentar a competitividade alemã na indústria de manufatura. O governo federal alemão apoiou a ideia ao anunciar que a Indústria 4.0 será parte integrante da iniciativa “Estratégia de Alta Tecnologia para a Alemanha 2020”, que visa particularmente liderar a inovação tecnológica. Posteriormente, o “Grupo de Trabalho da Indústria 4.0” desenvolveu a primeira proposta de aplicação, que foi publicada posteriormente em abril de 2013 (Kagermann et al., 2013). Esse entendimento apoiava claramente a ideia de criar fábricas inteligentes, que já começaram a surgir, adotando uma abordagem completamente nova para processos de produção e manufatura. Naturalmente, os produtos também estão se tornando inteligentes para lidar com requisitos funcionais e de utilização. As linhas de manufatura parecem estar envolvendo cada vez mais esses produtos, pois podem ser identificados exclusivamente e podem ser encontrados a qualquer momento e estado de sua própria história. De forma análoga, os sistemas de manufatura embarcados, que envolvem diferentes tecnologias e metodologias, estão se tornando cada vez mais conectados verticalmente aos processos de negócios. Em paralelo, eles se vinculam horizontalmente a redes de valor heterogêneas, passíveis de gerenciamento em tempo real com base em pedidos e na logística. Além disso, ambos demandam uma engenharia de ponta a ponta ao longo de toda a cadeia de valor (Fallera e Feldmüllera, 2015).

Os autores também destacam que o termo começou a ser utilizado pela primeira vez na Alemanha e foi gradualmente transmitido para outros países com significados e denominações semelhantes (Lasi et al., 2014). Dessa forma, é relevante analisar ideias comparáveis sob uma perspectiva global. Por exemplo, a General Electric apresenta uma ideia similar sob o nome de “Internet Industrial” (Bungart, 2014; Evans e Annunziata, 2012). Esse conceito é definido como “a integração de máquinas físicas complexas e dispositivos com sensores em rede e softwares, utilizados para prever, controlar e planejar melhores resultados para os negócios e a sociedade” (Corcio, 2016). Relata-se que o governo dos Estados Unidos apoia atividades de pesquisa e desenvolvimento na área da Internet Industrial com um fundo de 2 bilhões de dólares para Manufatura Avançada (Sun, 2012). Outras ideias similares podem ser encontradas sob os termos “Conceitos Industriais Integrados” (Bürger e Tragl, 2014), “Indústria Inteligente” ou

“Manufatura Inteligente” (Hermann et al., 2016).

A Quarta Revolução Industrial incentiva a ideia de fábricas desocupadas e promove uma compreensão global nesse sentido ao recomendar uma conexão mais sólida entre empresas e países em todo o mundo, por meio de cadeias de suprimentos e redes de sensores. Embora a comercialização de produtos possa enfrentar barreiras em algumas fronteiras nacionais, a Indústria 4.0 pode servir como meio de superar esses obstáculos, permitindo que as empresas transfiram tanto as ideias quanto os respectivos sistemas, incluindo software e redes de manufatura protegidas. Por exemplo, a tecnologia de impressão 3D oferece possibilidades de projeto ilimitadas para sistemas com peças de reposição e equipamentos industriais. O êxito alcançado com a Indústria 4.0 está atrelado à abertura de possibilidades de uso de dados e à aplicação de análises por meio de métodos criativos e eficazes (Bauernhansl et al., 2014).

2.4. Competências Exigidas pela Indústria 4.0

2.4.1. O Impacto das revoluções industriais em postos de trabalho

Segundo Benešová et al. (2017) os impactos de uma revolução industrial não são limitados apenas ao modelo de negócio, o nível de instrução e capacitação da mão de obra que irá operacionalizar a Indústria 4.0 também precisa acompanhar essa mudança de paradigma. Neste sentido, toda revolução industrial resulta no desaparecimento de vagas de trabalho bem estabelecidas e na criação de novos postos de trabalho para suprir demandas antes inexistentes. Com o surgimento da Indústria 4.0, o mundo tende a se transformar em um ambiente global, automatizado, virtual e altamente flexível, exigindo um novo conjunto de habilidades especializadas e adaptadas às demandas da economia digital e colaborativa (Motyl et al., 2017).

A disponibilidade de uma força de trabalho capaz, com um conjunto de habilidades pertinentes, influencia diretamente na possibilidade de um país se inserir e adotar a Indústria 4.0 tanto a nível micro quanto macro, dado que a inovação e competitividade da organização está diretamente relacionada com o nível de qualificação da força de trabalho atuante (Benešová et al., 2017 e Mavrikios et al., 2018). Schallock, Rybski, Jochem e Kohl (2018) argumentam que, embora o avanço tecnológico sustente essa revolução, é igualmente importante dar ênfase ao desenvolvimento de recursos humanos.

Maisiri et al. (2019) argumentam que essa mudança requer um foco estratégico no cultivo de habilidades alinhadas às novas demandas, visando mitigar o risco de desemprego

generalizado, especialmente entre trabalhadores envolvidos em tarefas manuais e repetitivas que podem ser facilmente automatizadas. O autor ainda afirma que o papel das instituições educacionais nesse cenário de transformação é fundamental, exigindo currículos aprimorados e implementando programas de treinamento alinhados aos requisitos da Indústria 4.0.

Considerando o avanço tecnológico no cenário industrial, projeta-se que as fábricas do futuro farão uso intensivo de robôs colaborativos, capazes de interagir diretamente com os trabalhadores no ambiente de produção (Chui et al., 2016). Ainda que este nível de automação varie entre setores e os tipos de atividades, a influência será notada de forma. Nesse sentido, torna-se inevitável a adoção de estratégias de cooperação entre humanos e robôs para potencializar o ganho de produtividade (Wilson et al., 2018). Em paralelo, diversos autores ressaltam que a formação técnica precisa ser acompanhada de sólidas habilidades sociais e de trabalho colaborativo. Dentro das competências consideradas essenciais para engenheiros atuantes na Indústria 4.0, a análise de *big data* tem se mostrado primordial (*World Economic Forum*, 2016).

A presença de tecnologias e a natureza virtual dessas soluções realçam a importância de habilidades pessoais, em combinação com o conhecimento especializado de cada área, motivo pelo qual a formação em engenharia não deve se limitar à transmissão de conteúdo técnico específico. Em vez disso, é fundamental contemplar aspectos comportamentais e investir em uma sólida compreensão interdisciplinar (Prifiti et al., 2017).

Cotet, Balgiu e Zaleschi (2017) estabelecem uma relação direta entre as chamadas “*soft skills*” e habilidades comportamentais, bem como entre “*hard skills*” e conhecimentos técnicos. Segundo os autores, essas três habilidades contribuem de forma decisiva para que o indivíduo se adapte aos sucessivos avanços tecnológicos característicos desse novo cenário industrial. Paralelamente, Adolph et al. (2014) acrescentam outras competências que reforçam a capacidade de atuação em ambientes de produção alinhados à Indústria 4.0. Entre elas, figuram a agilidade na resolução de problemas, a habilidade de redesenhar processos, a flexibilidade e o autodesenvolvimento. Tais competências despontam como essenciais para manter a competitividade e garantir a evolução das operações em um contexto marcado por transformações constantes e pela crescente digitalização dos sistemas produtivos.

2.4.2. As 6 competências chave da Indústria 4.0

A revisão sistemática da literatura (*Systematic Literature Review*, SLR) conduzida por

Maisiri et al. (2019) sintetizou as competências essenciais para a Indústria 4.0 em duas categorias principais: habilidades técnicas e habilidades comportamentais. As habilidades técnicas, frequentemente denominadas "*hard skills*", englobam conhecimentos específicos relacionados a áreas técnicas e operacionais. Já as habilidades comportamentais, ou "*soft skills*", incluem competências não-técnicas fundamentais, como comunicação, criatividade e adaptabilidade, que complementam as capacidades técnicas no contexto da Quarta Revolução Industrial.

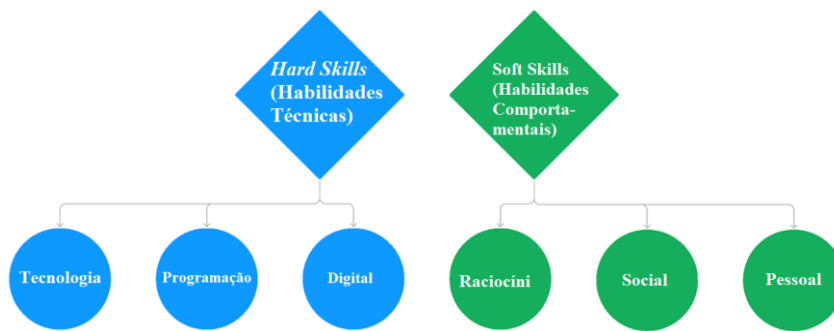


Figura 3: Tecnologias-chave fundamentais para a indústria 4.0. Fonte: Elaboração Própria

Comentado [FC4]: Melhorar o tamanho das letras, aqui também está muito pequeno, não foi só na apresentação

Obrigatório colocar a fonte junto da figura, isso vale para todas.

De acordo com os resultados obtidos pela Revisão Sistemática da Literatura (SLR), as competências não técnicas, também denominadas de *soft skills*, são cada vez mais exigidas dos engenheiros na era da Indústria 4.0. Assim, para que estes profissionais sejam competentes e se mantenham relevantes, torna-se necessário equilibrar habilidades técnicas e não técnicas dos colaboradores do futuro. Um número significativo dessas *soft skills* não pode ser facilmente automatizado e, portanto, manterá sua importância no contexto da Indústria 4.0.

Para remodelar as demandas de competências da Indústria 4.0, faz-se essencial estabelecer uma forte parceria entre a indústria e as instituições educacionais. As chamadas fábricas de aprendizagem, ou *teaching factories*, poderiam eventualmente fornecer essa conexão entre as instituições de ensino e a indústria.

A incorporação de abordagens interdisciplinares e multidisciplinares no desenvolvimento de competências poderia gerar as habilidades requeridas pela Indústria 4.0. Diversos autores destacam que conhecimentos multidisciplinares serão necessários na força de

trabalho do futuro. Maisiri et al. (2019) ainda destaca que um elemento frequentemente esquecido é o próprio estudante. Entender o nível de habilidade atual do aluno e incorporar contribuições do mesmo pode se mostrar significativo ao desenhar uma estratégia compreensiva para auxiliar instituições a se adaptar e florescer na indústria 4.0.

No contexto de Habilidades Técnicas, o conhecimento tecnológico é descrito como a primeira subcategoria de competência necessária para atuação na Indústria 4.0, sendo fundamental para o profissional ter habilidades de design que envolvam virtualização, simulação, interoperabilidade, modularização e descentralização, pois essas práticas permitem configurar processos ágeis e prever possíveis falhas. Além disso, a capacidade de detectar e corrigir erros rapidamente torna-se indispensável em um cenário de alta disponibilidade e redução de custos.

Outro ponto é a digitalização dos processos, que demanda o domínio de tecnologias como Internet das Coisas, robôs autônomos, impressão 3D e outras soluções avançadas. Essa expertise deve ser complementada pelo uso eficiente de ferramentas de análise de dados e pela compreensão de protocolos e cibersegurança, garantindo integração e confiabilidade. Por fim, a interação com interfaces modernas, como painéis de controle digitais e sistemas de realidade aumentada, viabilizam um fluxo de trabalho mais dinâmico e preciso, qualificando o engenheiro para promover inovações e manter a competitividade em ambientes industriais conectados.

Conhecimentos de programação também se mostram indispensáveis em um contexto de contínua automação. O domínio de habilidades computacionais, aliado à capacidade de simular cenários complexos, permite projetar sistemas mais eficientes, prever possíveis falhas e reduzir custos operacionais. A proficiência em codificação e programação de computadores e softwares, por sua vez, viabiliza o desenvolvimento de soluções customizadas e integradas, garantindo maior agilidade na implementação de inovações.

Por fim, as exigências da Indústria 4.0 elevam a importância das competências digitais, sobretudo na análise e processamento de dados. O domínio de técnicas de data *analytics* possibilita extrair insights estratégicos, enquanto a habilidade em cibersegurança e proteção de dados é fundamental para manter a integridade e a confiabilidade das informações. Além disso, a proficiência em computação em nuvem potencializa a escalabilidade dos projetos e otimiza recursos, ao passo que o conhecimento em Inteligência Artificial viabiliza soluções preditivas e maior automação.

Já no cenário de Habilidades Comportamentais, competências de raciocínio aliadas à inovação e à engenhosidade prática, constituem uma combinação essencial para a geração de soluções originais e eficientes, especialmente em ambientes marcados por sistemas ciberfísicos.

O pensamento crítico e lógico, por sua vez, amplia a capacidade de questionar resultados e identificar premissas ocultas, favorecendo diagnósticos mais assertivos em situações de complexidade. Tais habilidades convergem para uma flexibilidade fundamental na resolução de problemas complexos, contemplando a capacidade de contornar imprevistos e encontrar soluções criativas de forma ágil. Além disso, o pensamento analítico e a aptidão para comunicação técnica configuram-se como competências cruciais, permitindo o intercâmbio de informações estruturadas entre equipes humanas e máquinas. Nesse contexto, a colaboração, incluindo a interação homem-máquina, desponta como prática indispensável para a sinergia de habilidades distintas, enquanto a interdisciplinaridade habilita o profissional a transitar por diferentes áreas do conhecimento, refletindo a dinâmica multifacetada da Quarta Revolução Industrial.

No que tange às competências sociais, a Indústria 4.0 requer profissionais capazes de exercer o trabalho em equipe em projetos colaborativos e interdisciplinares, ampliando a troca de experiências entre diferentes expertises. A perspectiva de considerar múltiplos pontos de vista auxilia a equilibrar interesses e conceber soluções mais inclusivas, ancoradas em princípios de ética profissional. A compreensão da diversidade cultural e a valorização de posturas inclusivas tornam-se imprescindíveis para organizações multiculturais, onde a visão global se faz necessária para a competitividade e a inovação. Ademais, a autorreflexão e a capacidade de auto-organização aprimoram a produtividade, ao mesmo tempo em que elevam a qualidade das relações interpessoais. Nesse sentido, as habilidades de comunicação e relacionamento interpessoal, somadas às competências interculturais, refletem uma postura aberta ao diálogo, essencial para a construção de ambientes de trabalho saudáveis e de cooperação mútua.

Por fim, as competências pessoais abrangem dimensões que transcendem o ambiente organizacional, nutrindo uma postura ética e consciente para com a sociedade. A responsabilidade social e a prestação de contas evidenciam o comprometimento do profissional em atuar de forma sustentável e transparente. As habilidades de aprendizagem contínua asseguram a atualização constante de competências, fator crítico em um contexto tecnológico em rápida evolução. A liderança e a gestão de pessoas despontam como diferenciais, ao unificar esforços e motivar equipes em meio a ambientes de alto dinamismo. A inteligência emocional permite administrar conflitos e alinhar interesses diversos, ao passo que habilidades de negociação e empreendedorismo estimulam a criatividade e a busca por soluções de valor agregado. Por fim, a adaptabilidade, entendida como a capacidade de lidar com mudanças repentinas, desempenha papel fundamental na resiliência do indivíduo frente a transformações

constantes no mercado e na sociedade.

O estudo de Maisiri et al. (2019) destaca que, na profissão de engenharia durante a era da Indústria 4.0, as competências não técnicas são tão importantes quanto as competências técnicas. As tecnologias avançadas não têm como objetivo substituir o trabalho humano visando aumento de produtividade, pelo contrário, deve existir uma colaboração estreita entre humanos e máquinas. As instituições técnicas e acadêmicas precisam abrir espaço para a aprendizagem ao longo da vida, com o intuito de atender ao desafio da rápida mudança nas demandas de habilidades decorrentes da Indústria 4.0. O desenvolvimento interdisciplinar de competências pode ser necessário na Indústria 4.0 para assegurar a efetividade dos colaboradores na profissão de engenharia. Ademais, a revisão sistemática da literatura revelou uma lacuna quanto às habilidades específicas exigidas para diferentes níveis da profissão de engenharia.

2.4.3. Características das Habilidades Profissionais nas Últimas Revoluções Industriais

Borragero e Mennega (2023) abordam em sua pesquisa as diferenças significativas entre as habilidades necessárias na Terceira Revolução Industrial (3RI), também denominada Revolução Digital, e aquelas exigidas pela Quarta Revolução Industrial (4RI). Enquanto a 3RI exigiu principalmente competências básicas em alfabetização digital, a 4RI demanda um conhecimento aprofundado sobre tecnologias emergentes, além de competências interpessoais como pensamento crítico e capacidade de colaboração. Os autores destacam que as habilidades requeridas pela 4RI são mais avançadas e abrangem um espectro mais amplo de competências em comparação à revolução industrial anterior. Em razão da crescente necessidade de competências interpessoais, torna-se essencial desenvolver abordagens educacionais que promovam efetivamente a comunicação interpessoal e o pensamento crítico.

De acordo com os autores, atualmente, estudantes têm sido preparados com as habilidades essenciais para ingressar no mercado de trabalho da 4RI. No entanto, questionam sobre a situação dos indivíduos que já estão inseridos no mercado profissional, que apresentam uma mentalidade menos adaptável e que possuem habilidades desenvolvidas previamente à 4RI. Estes profissionais precisam reconhecer a importância dos avanços tecnológicos e compreender o impacto que tais mudanças terão em suas carreiras. Consequentemente, torna-se necessário que adquiram novas competências, fundamentais para que permaneçam relevantes profissionalmente no contexto da 4RI, dado que muitas funções realizadas por

humanos poderão ser substituídas por processos automatizados.

A questão central que orientou a pesquisa realizada por Borrageiro e Mennega (2023) foi: “Quais são as habilidades necessárias para sobreviver e prosperar na Quarta Revolução Industrial?”. Os autores esclarecem que a maioria das publicações analisadas em sua revisão corresponde a artigos acadêmicos publicados em periódicos científicos, enquanto apenas cinco trabalhos são provenientes de conferências. A Figura 4 apresentada no estudo ilustra a quantidade de publicações analisadas por ano e por base de dados acadêmica. No total, 32 publicações compreendendo o período de 2017 a 2022 foram selecionadas para compor a revisão bibliográfica conduzida pelos pesquisadores.

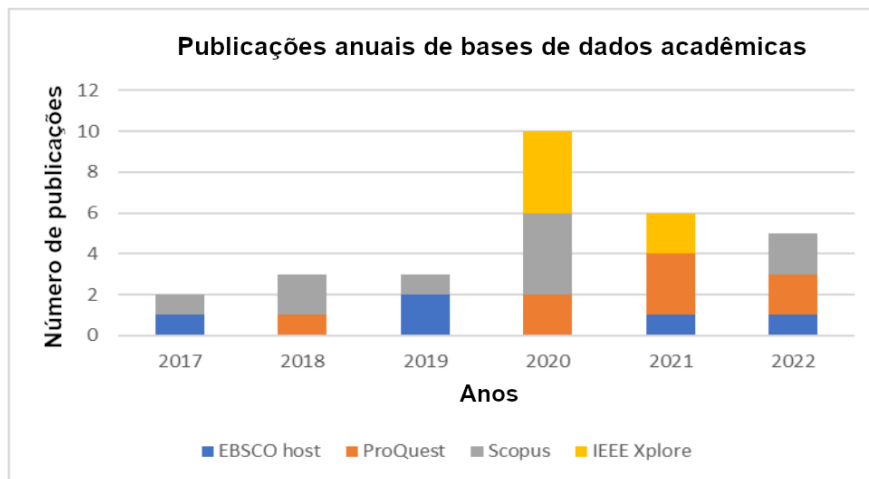


Figura 4: Publicações anuais de bases de dados acadêmicas. Fonte: Borrageiro e Mennega (2023)

2.4.3.1. Análise das Habilidades Necessárias na 4RI: *Soft Skills*, *Hard Skills* e Metodológicas

Os dois principais temas identificados por Borrageiro e Mennega (2023) em sua pesquisa foram: as competências exigidas pela Quarta Revolução Industrial (4RI) e as ações relacionadas à educação e ao desenvolvimento das competências necessárias à força de trabalho para essa nova realidade. Os autores organizaram as 24 habilidades distintas encontradas em quatro categorias principais: competências interpessoais (*soft skills*), competências técnicas (*hard skills*), competências metodológicas e competências sociais (Figura 5). Cada categoria principal abriga ainda subcategorias específicas de habilidades. Além disso, emergiram duas

categorias adicionais relacionadas especificamente às ações educacionais e estratégias de preparação da força de trabalho para enfrentar as transformações decorrentes da 4RI.

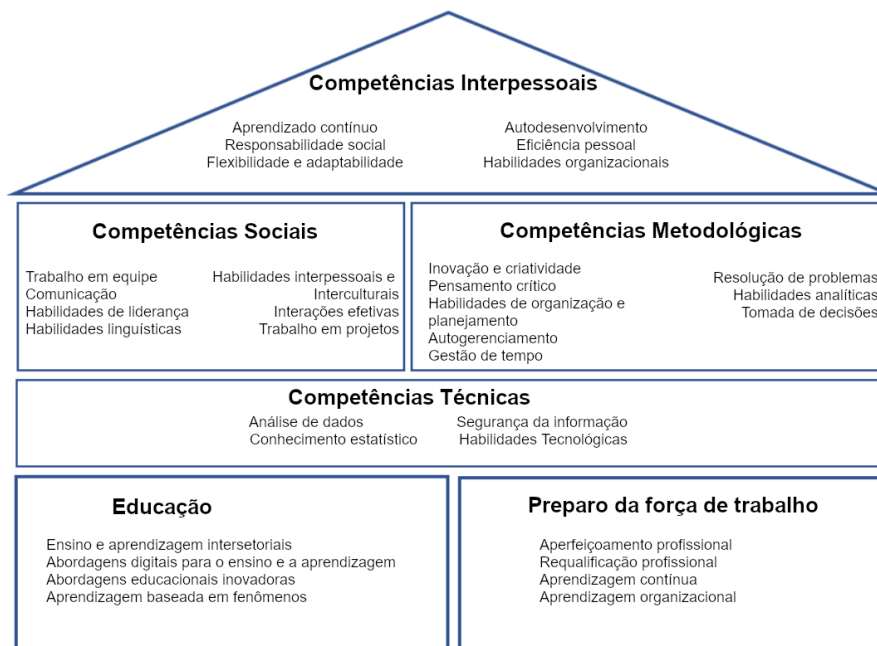


Figura 5: Representação visual dos temas identificados. Fonte: Borrageiro e Mennega (2023)

A maioria das publicações revisadas mencionou que as competências interpessoais (*soft skills*) constituem habilidades essenciais para a Quarta Revolução Industrial (Skilton e Hovsepian, 2018; Schwab, 2017; Teng et al., 2019; Ivaldi et al., 2021; Cotet et al., 2017; Caratozzolo et al., 2020; Piątkowski, 2020; Vrchota et al., 2019; Maresova et al., 2018; Leitao et al., 2020; Mian et al., 2020; Caratozzolo et al., 2021; Nguyen, 2022; Hattingh, 2018). Teng et al. (2019) (referido por Borrageiro e Mennega, 2023) definem as *soft skills* como habilidades e características pessoais associadas à participação, atitude e compatibilidade interpessoal durante interações sociais. Essas competências são consideradas transversais, situando-se entre habilidades sociais e profissionais, sendo que sua presença pode variar significativamente entre indivíduos.

A literatura revisada enfatiza fortemente a crescente importância das *soft skills* no contexto da 4RI, sugerindo inclusive que tais competências deveriam ser obrigatórias ao

selecionar indivíduos para cargos profissionais. Entre as *soft skills* mencionadas estão: flexibilidade no trabalho e capacidade de manter equilíbrio entre vida profissional e pessoal; adaptabilidade, isto é, a motivação e a capacidade de ajustar-se a novas situações laborais; habilidades organizacionais; responsabilidade social e mentalidade sustentável; autodesenvolvimento; eficiência pessoal; habilidade para trabalhar sob pressão; motivação para o aprendizado contínuo ao longo da vida. De acordo com os autores, aprendizado contínuo e autodesenvolvimento são competências consideradas treináveis e exigem um esforço pessoal e proativo para serem adquiridas.

As competências sociais foram mencionadas em seis artigos (Saniuk et al., 2022; Ivaldi et al., 2021; Cotet et al., 2017; Kannan et al., 2020; Santos et al., 2021; Podgórska, 2022), incluindo o domínio de ferramentas virtuais de comunicação em diferentes cadeias produtivas e plataformas digitais, retenção e compartilhamento eficaz de informações importantes, habilidades de liderança e tomada de decisão. Essas competências sociais podem ser sintetizadas como habilidades de comunicação, trabalho em equipe, liderança, habilidades linguísticas, capacidade para trabalhar em projetos, habilidades interpessoais e interculturais, disposição para colaborar e negociar compromissos, e capacidades de *networking*.

As competências metodológicas compreendem habilidades necessárias para lidar adequadamente com situações problemáticas, mencionadas em quatro artigos revisados (Saniuk et al., 2022; Ivaldi et al., 2021; Kannan et al., 2020; Cimini et al., 2020). Essas habilidades envolvem resolução de problemas complexos por meio da inspeção e interpretação de grandes volumes de dados e domínio de ferramentas avançadas, como técnicas analíticas e algoritmos. Exemplos dessas habilidades incluem inovação e criatividade, pensamento empreendedor, habilidades de resolução de problemas, planejamento e organização, autogerenciamento e gestão do tempo, capacidade de tomar decisões, habilidades analíticas e resolução de conflitos.

Por fim, os autores descrevem as competências técnicas (*hard skills*), consideradas igualmente essenciais na preparação para a revolução tecnológica. Esse conjunto de habilidades inclui um crescente domínio técnico devido à automação de processos e maior conscientização sobre segurança de dados. As competências técnicas identificadas abrangem habilidades em tecnologia da informação (TI), habilidades de análise de dados, conhecimento de estatística, habilidades de programação, habilidades em gestão de projetos e competências em segurança da informação, incluindo cibersegurança (Saniuk et al., 2022; Cotet et al., 2017; Santos et al., 2021; Kayembe et al., 2019; Caratozzolo et al., 2020; Oke et al., 2020; Cotet et al., 2020; Mian et al., 2020; Piątkowski, 2020; Kannan et al., 2020; Vrchota et al., 2019).

2.4.3.2. Abordagens Pedagógicas para o Desenvolvimento de Competências na 4RI

Borrageiro e Mennega (2023) destacam que métodos adequados de ensino são necessários para implementar com sucesso as habilidades e tecnologias relacionadas à Quarta Revolução Industrial (4RI). Com base em Kayembe et al., (2019), os autores indicam que ajustes educacionais importantes incluem integrar tecnologias da informação e comunicação (TIC) como suporte educacional, redirecionar o foco para o desenvolvimento de capacidades em vez de somente o desempenho acadêmico, utilizar critérios variados na mensuração do progresso estudantil e garantir que as TIC estejam plenamente incorporadas ao sistema educacional em todos os níveis, permitindo que os educadores integrem tecnologias em suas práticas de ensino e aprendizagem.

Teng et al., (2019), atribuem a alta taxa de desemprego entre recém-formados à discrepância existente entre a formação recebida nas universidades e as habilidades realmente requeridas pelas empresas. Os autores afirmam que grande parte dos currículos universitários atuais não atende às necessidades reais do mercado de trabalho. Embora a literatura indique que haverá um deslocamento do enfoque tradicional em habilidades técnicas para habilidades sociais, as competências técnicas ainda continuarão relevantes. Assim, os graduados precisarão possuir múltiplas habilidades, tanto técnicas quanto interpessoais.

Borrageiro e Mennega (2023) descrevem diferentes abordagens pedagógicas destinadas a desenvolver tais competências necessárias. Isso inclui a implementação de currículos interdisciplinares mais flexíveis. Teng et al., (2019) afirmam que algumas instituições já adotaram currículos inovadores nos quais os estudantes são incentivados a participar de pelo menos duas atividades práticas como estágios e treinamentos corporativos, promovendo o engajamento profissional desde a formação acadêmica. Com isso, ressalta-se a importância crescente das tecnologias de informação, gerenciamento de dados, pensamento criativo e experiência do usuário como fatores centrais para o mercado profissional emergente.

Caratozzolo et al., (2020), mencionados pelos autores, identificam quatro características fundamentais da educação no contexto da 4RI: aprendizagem personalizada e auto-orientada, aprendizagem acessível e inclusiva, aprendizagem colaborativa e aprendizagem orientada pelo estudante. Essas abordagens são detalhadas em métodos inovadores, como o ensino intersetorial (interdisciplinar), métodos digitais de ensino, aprendizagem baseada em fenômenos reais (*phenomenon-based learning*) e aprendizagem ativa Oke et al., (2020).

O ensino intersetorial envolve a colaboração de educadores e estudantes de diferentes disciplinas, permitindo uma visão multidisciplinar necessária na 4RI (Kayembe et al., (2019)).

Os estudantes devem compreender fatores adicionais, como contextos políticos, associados aos conteúdos estudados.

As abordagens digitais de aprendizagem são destacadas como necessárias para o desenvolvimento de competências adaptativas que permitam ao aluno participar ativamente da economia digital e aproveitar oportunidades de inovação, criatividade e emprego. O ensino digital, incluindo o ensino remoto (*e-learning*), permite maior flexibilidade espacial e temporal.

A abordagem híbrida (*blended learning*), que combina o ensino remoto com aulas presenciais, facilita a aprendizagem autônoma, acelerando o acesso à informação e promovendo maior engajamento e interações construtivas entre alunos e educadores. Segundo Oke et al., (2020), essa metodologia pode aumentar em até 15% o desempenho acadêmico e a satisfação dos alunos comparativamente ao ensino exclusivamente presencial.

A aprendizagem baseada em fenômenos reais, uma abordagem baseada na resolução de problemas práticos, capacita estudantes a conectarem conteúdos acadêmicos com situações cotidianas, desenvolvendo competências como pensamento crítico, criativo e analítico, fundamentais para a 4RI (Thaenkaew et al., 2021). Os estudantes são encorajados a relacionar as experiências diárias com os conteúdos acadêmicos, enquanto os educadores administram as atividades e empregam métodos avaliativos diversos, como apresentações e trabalhos escritos.

Por fim, a aprendizagem ativa busca engajar diretamente os estudantes no processo educacional através de discussões e estudos de caso, promovendo habilidades como resolução de problemas, inteligência emocional e liderança.

Borrageiro e Mennega (2023) concluem que o desenvolvimento das competências exigidas pela 4RI demanda um ajuste educacional, privilegiando cada vez mais as *soft skills* (competências interpessoais). Essas competências, que englobam atitudes e comportamentos pessoais, são menos objetivas e mais complexas de se adquirir e mensurar em comparação às competências técnicas, as quais podem ser desenvolvidas de forma relativamente rápida por meio de treinamentos específicos (Saniuk et al., 2022). Assim, as *soft skills* requerem um esforço individual contínuo e disposição pessoal para o desenvolvimento (Teng et al., 2019).

Os autores ainda ressaltam a necessidade de que instituições educacionais modifiquem suas abordagens e materiais didáticos, adaptando-os para que efetivamente preparem os estudantes para os novos desafios do mercado de trabalho, especialmente considerando que os currículos atuais geralmente não contemplam adequadamente essas competências, contribuindo, portanto, para as dificuldades de empregabilidade entre os recém-formados (Teng et al., 2019).

3. Materiais e Métodos

Para a elaboração desta revisão crítica da literatura, foi realizado um levantamento de trabalhos acadêmicos que abordam o núcleo conceitual da disciplina de Termodinâmica em diversos contextos científicos. Inicialmente, foram selecionados artigos e livros que descrevem os fundamentos termodinâmicos aplicados à física, química e engenharias em geral, buscando autores que destacam aspectos fundamentais e desafios no ensino e na aplicação prática dos conceitos termodinâmicos, abrangendo desde abordagens pedagógicas até aplicações específicas.

Em uma segunda etapa, para detalhar a abordagem específica da Termodinâmica em cursos de Engenharia, selecionaram-se trabalhos que descrevem com exclusividade o ensino desta disciplina em contextos curriculares de Engenharia Química e Mecânica. A principal referência utilizada foi Karimi (2008), complementada com estudos recentes de Gatti et al. (2023). Estes autores oferecem perspectivas sobre a estruturação curricular, dificuldades específicas no aprendizado e estratégias pedagógicas voltadas a melhorar o desempenho dos estudantes em Termodinâmica aplicada.

Para realizar a contextualização histórica e conceitual da Indústria 4.0, foram escolhidos trabalhos acadêmicos que descrevem a evolução das revoluções industriais até o cenário atual. Nesse sentido, os principais autores referenciados foram Pereira et al., (2017), Kagermann et al., (2015), Schmidt et al., (2015) e Oztemel e Gurzev, (2020), que detalham os fundamentos históricos, as tecnologias emergentes e as implicações dessa transformação tecnológica em diferentes setores produtivos.

Além disso, foram identificados como possíveis resultados desta revisão os trabalhos que propõem metodologias inovadoras para o desenvolvimento das competências exigidas pela Indústria 4.0. Particular destaque foi dado ao estudo de Maisiri et al. (2019), que apresenta uma abordagem atualizada e abrangente sobre habilidades técnicas e comportamentais necessárias no cenário atual da Indústria 4.0, tais como a colaboração homem-máquina, pensamento crítico, interdisciplinaridade e competências digitais.

Por fim, buscou-se estabelecer um panorama da interface entre a disciplina de Termodinâmica e a Indústria 4.0, investigando como conceitos fundamentais dessa disciplina podem se integrar às tecnologias emergentes e às demandas por competências especializadas. Para isso, foram analisados estudos que indicam a relevância da Termodinâmica em contextos tecnológicos avançados, especialmente no âmbito da eficiência energética e da exergia,

descritos por autores como Dincer e Rosen (2007), Rodríguez (2003) e Klemeš et al. (2018).

4. Análise dos cenários disponíveis

4.1 Estratégias Pedagógicas e Tecnológicas no Ensino de Termodinâmica

4.1.1. Abordagens Ativas e Projetos Investigativos no Ensino de Termodinâmica

Dong et al. (2021) descrevem em sua publicação que a disciplina de Termodinâmica em Engenharia Química integra o currículo avançado de graduação em Engenharia Química no Instituto de Tecnologia de Pequim. Com o objetivo de ampliar a participação estudantil, aprimorar a aprendizagem bem-sucedida e estimular os estudantes em atividades de avaliação e criação. Os autores desenvolveram e propuseram projetos individuais e em grupo com enfoque investigativo, objetivando promover habilidades de pensamento crítico, resolução de problemas e competências em comunicação escrita e oral. Os paradigmas e técnicas pedagógicas que contemplam o desenvolvimento dessas habilidades incluem, mas não se limitam a pensamento algorítmico (Mettes et al., 1980; Mettes et al., 1981), aprendizagem baseada em investigação (Allen et al., 1986), estímulo ao questionamento (Zoller, 1987), estudo de casos (Herreid, 2013), sala de aula invertida (Schultz et al., 2014), e paradigma do pensamento sistêmico (Mahaffy et al., 2018). Embora reconheçam a impossibilidade de implementar todos esses métodos em uma única disciplina, os autores sugerem que as filosofias associadas podem ser aplicadas em práticas pedagógicas planejadas.

Os autores detalham também os materiais didáticos elaborados com o intuito de alcançar esses objetivos mencionados. Em seções subsequentes, descrevem questões discutidas em aula e mini-projetos que os estudantes realizam em casa, baseados tanto no cálculo da entalpia de formação na fase gasosa de diversas moléculas utilizando métodos da química quântica, quanto na determinação da equação de estado para cristais moleculares. Uma seção específica é dedicada à análise e à apresentação de estatísticas coletadas a partir das avaliações feitas pelos próprios estudantes.

4.1.1.1. Estratégia de Estímulo à Participação Ativa por Meio de Perguntas Dirigidas

Comentado [FC5]: Seguir essa formatação de parênteses para todas as citações não diretamente integradas ao texto

Dong et al. (2021) apontam em seu estudo que a maioria dos estudantes não faz perguntas durante as aulas. É comum que, em uma turma convencional, apenas um ou dois alunos façam algumas poucas perguntas durante todo o semestre. Diante desse contexto, os autores desenvolveram e aplicaram uma estratégia específica que estimula os estudantes a formularem perguntas em sala de aula. Em cada encontro, aproximadamente três a quatro estudantes eram selecionados aleatoriamente a partir da lista de alunos matriculados para elaborar perguntas pertinentes sobre tópicos relacionados à Termodinâmica, que seriam apresentadas na aula seguinte. Ao longo do semestre, todos os alunos tiveram a oportunidade de contribuir oralmente em aula, ainda que em ordem aleatória. Essa atividade de elaboração e formulação de perguntas constitui-se como tarefa obrigatória, correspondendo a 5% da nota final da disciplina, embora tenha havido flexibilidade quando os estudantes não se sentiam preparados, permitindo-se, nesse caso, o adiamento de suas contribuições orais para sessões posteriores.

Entre as perguntas formuladas pelos estudantes, os autores as classificaram em três categorias principais: (I) menos complexas, (II) aquelas que demandaram explicações detalhadas e (III) aquelas consideradas desafiadoras para o docente. A primeira categoria correspondeu a aproximadamente 70% das perguntas feitas, sendo respondidas, em sua maioria, por outros alunos em sala. A segunda categoria englobou cerca de 20% das questões, sendo respondidas principalmente pelo professor ou remetendo-se a parágrafos e seções específicas dos livros-texto adotados. Já a terceira categoria, embora contendo poucas perguntas, gerou questões relevantes que serviram como ponto de partida para alguns dos projetos desenvolvidos como atividades extraclasse.

Os autores descrevem que o tempo destinado à resposta das perguntas pelos docentes durante cada aula foi limitado a 10 minutos. No entanto, as respostas para questões selecionadas e consideradas interessantes foram expandidas e organizadas em um documento dinâmico, simulando o estilo de um blog, acessível a todos os estudantes. Quanto aos temas abordados nas perguntas formuladas pelos alunos, o conceito de entropia destacou-se como o tópico mais desafiador de ser conceitualmente compreendido. De fato, 10 das 59 perguntas recebidas foram sobre entropia, abordando temas como entropia zero à temperatura de zero Kelvin, a entropia de Boltzmann em comparação à entropia de Clausius, a morte térmica do universo, o demônio de Maxwell e ainda questionamentos sobre se ordem/desordem constitui uma metáfora adequada para explicar a diminuição/aumento da entropia. Outro grupo composto por 9 perguntas tratou de explicações mais aprofundadas sobre energia interna, calor específico, equação de estado, soluções/misturas e o avanço das reações a partir da perspectiva da

Termodinâmica estatística. Essas questões geraram diversas aulas adicionais sobre mecânica estatística e explicações na escala microscópica, as quais foram muito bem recebidas pelos estudantes. Além disso, cinco questões envolveram temas como equação de estado, equilíbrio de fases e diagramas de fase. Alguns alunos manifestaram insatisfação em relação ao conteúdo sobre fluidos supercríticos abordado nos livros-texto, o que resultou na apresentação de uma aula extra para abordar avanços recentes nessa área.

Estatisticamente, como apresentado na Figura 6a, os estudantes gastaram pelo menos uma hora preparando suas perguntas para as aulas. Ao todo, 35.3%, 27.5%, 9.8% e 7.8% dos alunos gastaram cerca de 1, 2, 3 e 4 horas, respectivamente, embora um número reduzido tenha relatado que levou vários dias refletindo sobre as questões formuladas. As avaliações feitas pelos estudantes sobre o impacto das sessões de perguntas e respostas encontram-se ilustradas na Figura 6b. Uma parcela considerável dos estudantes (36%) relatou que formular suas perguntas demandou um esforço significativo, avaliado como 7 em uma escala de 1 a 10. Na percepção dos estudantes, as perguntas feitas em aula estimularam o entusiasmo e o engajamento, com avaliações predominantemente entre 7 e 10 nessa escala (1 sendo o menor valor e 10 o maior). Em termos percentuais, 36% dos estudantes atribuíram a nota 7 para o impacto sobre entusiasmo e engajamento, enquanto 44% avaliaram com nota 8, e 28% demonstraram-se altamente motivados, atribuindo a nota máxima (10). Embora alguns estudantes não tenham demonstrado grande interesse em formular perguntas, a maioria avaliou positivamente essa abordagem de aprendizagem, enfatizando que o esforço dedicado à elaboração de boas questões contribuiu efetivamente para o seu processo de aprendizado

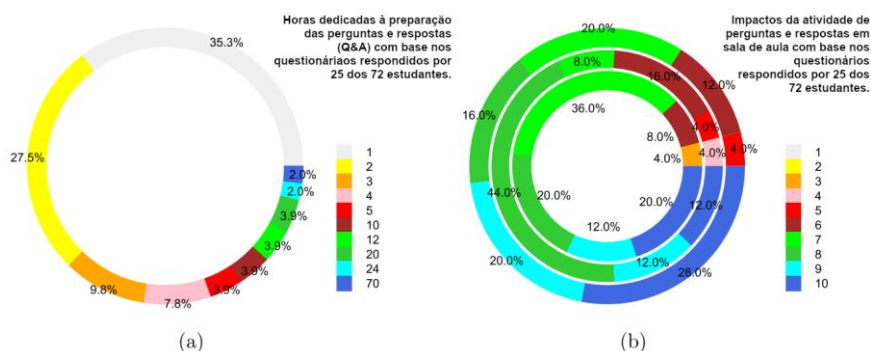


Figura 6: Horas extracurriculares dedicadas pelos estudantes à preparação de perguntas e respostas (Q&A), e sua avaliação quanto ao esforço investido. (a) Horas que os estudantes dedicaram à preparação de uma pergunta a ser feita em sala de aula. (b) Avaliação dos estudantes sobre os impactos da atividade de perguntas e respostas em sala

no seu processo de aprendizagem. As pontuações variam de 1 a 10, sendo 10 a melhor avaliação. As categorias engajamento, entusiasmo e aprendizagem são representadas nos círculos interno, intermediário e externo, respectivamente. Fonte: Dong et al. (2021)

No contexto das competências-chave requeridas pela Indústria 4.0, conforme discutido por Maisiri et al. (2019), o incentivo à participação por meio de perguntas direcionadas promove o desenvolvimento de competências comportamentais (*soft skills*), especificamente habilidades de raciocínio e habilidades sociais. Este método favorece a participação ativa dos alunos, encorajando-os a refletir criticamente sobre os conteúdos abordados.

4.1.1.2. Integração de Química Computacional no Ensino de Termodinâmica: Método CBS-QB3 e Aplicações Práticas

Dong et al. (2021) relatam que, desde 2012, têm experimentado incluir na disciplina de Termodinâmica em Engenharia Química o estudo das propriedades Termodinâmicas de moléculas por meio do método CBS-QB3 (Complete Basis Set - Nyden et al., 1981; Petersson et al., 1988). Segundo os autores, a precisão superior desse método pode motivar o interesse dos estudantes pela química computacional, pois ele reproduz e prevê satisfatoriamente propriedades moleculares determinadas experimentalmente. Como exemplo prático de aplicação de um ciclo termodinâmico real, os autores mencionam o método de atomização para o cálculo da entalpia padrão de formação. Para os estudantes, essas atividades envolvem o uso de comandos no sistema operacional *Linux*, o que representa um desafio significativo para aqueles com pouca experiência em computação. Contudo, o uso do pacote computacional *Gaussian* demanda apenas a execução de alguns comandos específicos, que os estudantes aprendem rapidamente a partir de um vídeo-tutorial curto preparado pelos próprios autores

Os autores selecionaram um conjunto de 164 pequenas moléculas obtidas em bases de dados como o *PubChem* para serem estudadas nas aulas integradas de química quântica e Termodinâmica. As massas dessas moléculas variaram entre 41 e 88 AMU. Cada estudante recebeu como tarefa o estudo de uma molécula escolhida aleatoriamente dessa coleção. As atividades atribuídas aos alunos incluíram encontrar a estrutura molecular diretamente do banco de dados, converter o arquivo contendo as coordenadas moleculares para um formato adequado, editar um arquivo-modelo de entrada inserindo sua molécula específica e, por fim, realizar um cálculo CBS-QB3 utilizando o software *Gaussian*.

Adicionalmente, os estudantes foram orientados a consultar o documento online intitulado "*Thermochemistry in Gaussian*", com o objetivo de aprender como determinar a entalpia padrão de formação no estado gasoso ideal (ΔH°_f) por meio do método de atomização, utilizando os dados obtidos com cálculos CBS-QB3. Os alunos também foram solicitados a buscar valores experimentais para comparação com os resultados teóricos obtidos por CBS-QB3. Dos 164 compostos selecionados, 69 apresentam valores experimentais de ΔH°_f disponíveis no banco de dados *NIST WebBook*, enquanto outros 45 possuem disponíveis potenciais de ionização (*IP*) experimentais. As 50 moléculas restantes referem-se a estruturas moleculares hipotéticas ou possuem outros tipos de propriedades Termodinâmicas e/ou cinéticas já reportadas. Os estudantes que concluíram satisfatoriamente seus cálculos CBS-QB3 puderam facilmente utilizar o utilitário *freqchk (Gaussian)* para obter propriedades Termodinâmicas em função da temperatura ou pressão. Os autores destacam que, ao longo dos anos, os estudantes envolvidos nesse projeto contribuíram significativamente para estabelecer uma referência sobre a precisão do método CBS-QB3 aplicado ao cálculo das propriedades dessas pequenas moléculas

Para aqueles estudantes que receberam moléculas pertencentes ao último terço da coleção, as quais não apresentavam valores experimentais no *NIST WebBook*, foram atribuídas tarefas adicionais, tais como buscas bibliográficas por valores experimentais, realização de cálculos para reações químicas específicas, comparações de energias e estruturas entre estereoisômeros, ou mesmo comparação dos resultados obtidos com os previstos pelo método de Joback. Além disso, grupos formados por estudantes que receberam moléculas com a mesma fórmula química foram instruídos a elaborar relatórios em grupo, descrevendo possíveis estruturas isoméricas e discutindo as diferenças entre as entalpias de formação desses isômeros.

A exposição a diferentes tecnologias, como a utilização de técnicas de química computacional, permite o desenvolvimento das habilidades computacionais dos alunos, representando ainda uma introdução prática às técnicas de simulação. A aplicação específica do método CBS-QB3 reforça diretamente as competências técnicas necessárias, conforme categorizadas por Maisiri et al. (2019).

4.1.1.3. Aplicação Prática de Equações de Estado em Cristais Moleculares: Integração de Métodos Computacionais e Análise Crítica

Dong et al. (2021) apresentam também uma atividade de projeto voltada ao estudo da

equação de estado (EOS) para cristais moleculares. Neste projeto, os autores solicitaram que os estudantes ajustassem parâmetros de equações de estado de sólidos moleculares aos dados provenientes de uma EOS gerada por meio da teoria do funcional da densidade (DFT). Os dados utilizados pelos alunos foram obtidos diretamente a partir da pesquisa dos próprios autores sobre um cristal molecular energético proposto. A tarefa envolveu a seleção, por parte dos alunos, de duas equações de estado previamente estudadas no trabalho de Latimer et al. (2018), para ajustar seus parâmetros aos dados gerados por DFT, utilizando para isso softwares computacionais como Gnuplot ou GNU Octave. Com esses ajustes, os estudantes puderam determinar a densidade de equilíbrio do cristal (ρ_0), a energia de equilíbrio (E_0), o módulo de compressibilidade volumétrica (B), bem como sua derivada em relação à pressão (η), permitindo ainda prever propriedades de detonação com o auxílio do método de Kamlet–Jacobs.

O assunto abordado neste projeto proporcionou aos alunos uma incursão pelo campo da química do estado sólido, tema menos comumente tratado nas disciplinas tradicionais de Termodinâmica em engenharia química, geralmente concentradas em gases e líquidos. Segundo os autores, essa abordagem revelou-se muito eficaz e instrutiva para a revisão da primeira lei da Termodinâmica, permitindo estabelecer claramente a relação entre uma equação de estado do tipo energia-volume (E–V EOS) e uma equação pressão-volume (P–V EOS), por meio da expressão $P(T, V) = -dE(V)/dV$. Além disso, essa atividade possibilitou aos estudantes o acesso a dados provenientes de pesquisa, a aplicação prática de métodos computacionais de ajuste não linear pelo método dos mínimos quadrados, além de vivenciar situações que frequentemente resultam em respostas inesperadas, diferentes das soluções típicas e previamente conhecidas.

Os resultados obtidos pelos alunos para um conjunto específico de dados gerados por DFT são exibidos pelos autores na Figura 7. As curvas obtidas foram classificadas pelos autores em três categorias distintas: (1) equações Euleriana e Lagrangiana de Birch–Murnaghan e a equação de Poirier–Tarantola; (2) equações de Mie–Grüneisen, Murnaghan, Pack–Evans–James e Tait–Tamman; e (3) a equação de Rose–Vinet. O primeiro grupo de equações apresenta um comportamento cúbico em baixas densidades, sendo que o algoritmo de ajuste subestimou a densidade de equilíbrio enquanto superestimou a energia de equilíbrio. Por outro lado, as equações do segundo grupo resultaram em uma subestimação tanto da densidade quanto da energia de equilíbrio, prevendo ainda um comportamento quase linear para volumes superiores ao volume de equilíbrio \bar{V}_0 . Por fim, a equação de Rose–Vinet acompanhou os dados gerados pela DFT com maior precisão. Para o caso de cristais moleculares orgânicos, a equação de Rose–Vinet revelou-se superior, principalmente por representar de maneira mais adequada as

interações intermoleculares de longo alcance.

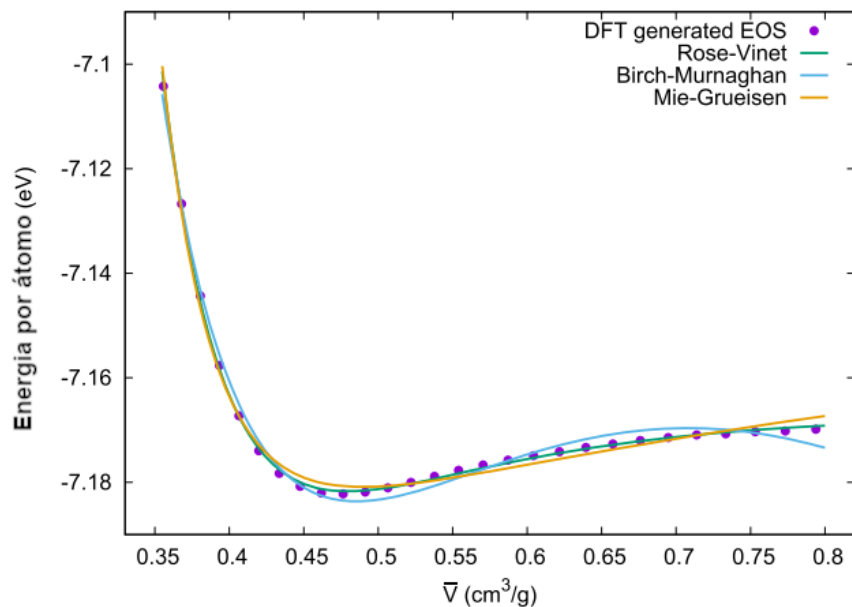


Figura 7: Equação de estado de um cristal molecular energético. O eixo horizontal representa o volume específico, e o eixo vertical representa a energia total do cristal molecular por célula unitária a zero grau Kelvin. Fonte: (Dong et al. (2021))

Os autores relatam que alguns estudantes que trabalharam com as equações dos grupos (1) e (2), infelizmente, aceitaram seus resultados iniciais sem questionar adequadamente a qualidade do ajuste, os métodos empregados ou os dados fornecidos. Outros estudantes, entretanto, questionaram legitimamente a qualidade dos dados ou a sua capacidade em aplicar adequadamente o método de ajuste. Um terceiro e reduzido grupo de alunos buscou aperfeiçoar seus ajustes reduzindo a faixa de pontos considerados, com base no entendimento de que tanto os dados quanto as equações deveriam apresentar maior precisão próximos ao mínimo energético, obtendo assim bons resultados em faixas menores de dados.

De maneira geral, os autores ressaltam o entusiasmo demonstrado pelos estudantes diante dos resultados obtidos e do aprendizado proporcionado pela execução desses projetos. Ao compararem o tempo investido pelos alunos na produção de resultados e relatórios desse projeto com o tempo total declarado dedicado às atividades extraclasse, seja por obrigação curricular ou por iniciativa própria, os autores destacam que a disciplina enfatizou fortemente

o desenvolvimento de habilidades analíticas e avaliativas, além da aquisição prática de competências computacionais. Este formato pedagógico constitui, segundo Dong et al. (2021), um importante diferencial frente aos cursos tradicionais, geralmente centrados apenas na resolução de exercícios propostos ao final dos capítulos dos livros-texto.

O projeto em questão contempla não apenas competências técnicas, relacionadas às habilidades tecnológicas, mas também competências comportamentais fundamentais. Nesse sentido, promove o desenvolvimento de habilidades cognitivas importantes, como flexibilidade, pensamento crítico e raciocínio analítico, alinhando-se à classificação proposta por Maisiri et al. (2019).

4.1.1.4. Aprendizagem Baseada em Interesses: Projetos para Engajamento em Termodinâmica

Dong et al. (2021) relatam que o objetivo do projeto em grupo denominado "*Brainstorming* sobre Aplicações da Termodinâmica" foi promover o interesse dos estudantes pela aprendizagem, aprimorar seu conhecimento e desenvolver habilidades relacionadas à aprendizagem e resolução de problemas. Inicialmente, nos primeiros anos da disciplina, os estudantes eram solicitados a escolher tópicos relacionados à operação de uma usina termoeletrica específica, a DRAX. As operações diárias dessa usina abrangem diversos tópicos importantes na engenharia e na Termodinâmica química. Com o crescimento progressivo do número de estudantes, tornou-se complexo formar um número pequeno de grupos em uma turma, e a criação de mais grupos acarretaria em uma sobreposição dos temas escolhidos. Os tópicos com maior frequência de escolha incluíam eficiência de combustíveis, eficiência de turbinas, sistemas de resfriamento e impactos ambientais, sendo todos considerados relevantes pelos autores. Entretanto, percebeu-se também que restringir a escolha dos temas a poucos assuntos limitava o interesse e o engajamento dos estudantes, além de resultar em cenários nos quais o docente assumia um papel dominante enquanto os estudantes adotavam uma postura passiva.

Em resposta a essa situação, nos anos subsequentes, os autores direcionaram o projeto para ser baseado nos interesses individuais dos próprios alunos, tendo como único requisito obrigatório que o contexto do projeto fosse uma aplicação da Termodinâmica. A consequência dessa mudança mostrou-se bastante encorajadora, observando-se um expressivo aumento no número de temas propostos pelos estudantes. Como exemplo, os autores apresentam uma lista

parcial de tópicos propostos e desenvolvidos pelos estudantes ao longo dos últimos três anos, representando aproximadamente um terço dos projetos abordados em sala de aula:

1. De 1°C Atômico a 1°C Terrestre (2019).
2. Como Fazer *Coca-Cola* com Alto Teor de Cafeína (2019).
3. Efeito Estufa Descontrolado pelo CO₂ (2019).
4. Motor a Jato com Bocal de Laval (2019).
5. Condições para Agitar um Copo de Água até a Ebulição usando uma Colher (2019).
6. Exploração e Migração para o Espaço (2019).
7. Temperatura da Água em uma Garrafa Térmica em Função do Tempo em Ambientes Variados, estudo usando COMSOL (2019).
8. Tempo Ótimo para Cozinhar Bife em *Airfryer*, um Estudo Baseado na Reação de Maillard utilizando COMSOL (2019).
9. Resistência à Tração e Consumo de Energia da Teia do Homem-Aranha (2018).
10. Mão em Nitrogênio Líquido (2018).
11. Material das Roupas e Índice de Conforto, um Estudo Termodinâmico e um Aplicativo (2018).
12. A Fábula da Máquina Perpétua - Gradiente de Temperatura Devido à Vaporização e Trabalho Obtido pelo Ambiente (2018).
13. Termodinâmica da Pipoca (2018).
14. Possibilidade de Vida em Marte - Um Estudo Termodinâmico (2018).
15. Termodinâmica do *Mjölnir* (2018).
16. Tópicos Termodinâmicos em uma Usina Solar (2017).
17. Análise Térmica de um Foguete de Combustível Sólido (2017).
18. Seria Possível o Controle Climático? (2017).
19. Aquecimento Global - Uma Análise Termodinâmica (2017).
20. Termodinâmica do Sistema de Resfriamento Líquido em Computadores (2017).
21. Extração com Fluido Supercrítico de CO₂ (2017).

Dong et al. (2021) destacam a diversidade dos tópicos abordados, ressaltando que os projetos 3 e 21 abordaram mecanismos de solvatação, os projetos 7, 8, 10, 11 e 20 trataram de processos de transferência de calor, enquanto os demais exploraram diversas aplicações envolvendo calor, trabalho e energia. Os estudantes realizaram experimentos laboratoriais nos projetos 5, 7 e 17, elaboraram projetos de design nos tópicos 2, 4 e 11, além de realizarem simulações computacionais nos projetos 4, 7, 8 e 13. A maioria dos projetos demandou extensas

buscas bibliográficas e cálculos detalhados, sendo que alguns estudantes também apresentaram comprovação dos experimentos laboratoriais realizados, enquanto outros incluíram códigos computacionais ou aplicativos desenvolvidos durante a execução dos projetos.

Adicionalmente, os autores ressaltam que o tema do aquecimento global, caracterizado por um elevado impacto social, foi proposto recorrentemente pelos estudantes, com grupos dedicando-se a diferentes aspectos desse tópico. Esse fato sugere um alto nível de envolvimento dos estudantes com temas relacionados ao meio ambiente, ainda que esses conteúdos não sejam extensivamente abordados no currículo regular. Tópicos relacionados diretamente às relações entre calor e trabalho não foram considerados conceitualmente difíceis pelos estudantes, que se mostraram bastante criativos ao desenvolver seus projetos, tornando-os interessantes, significativos e por vezes divertidos. Os autores enfatizam que a proposta de manter os estudantes engajados e se divertindo sempre foi um dos objetivos centrais desse tipo de atividade pedagógica.

O método descrito favorece diretamente o desenvolvimento das competências comportamentais essenciais destacadas por Maisiri et al. (2019). Especificamente, esta abordagem promove habilidades de raciocínio por meio da comunicação técnica e interdisciplinaridade, incentivando os alunos a traduzirem conceitos termodinâmicos complexos em linguagem clara e acessível. Além disso, a implementação de projetos colaborativos fortalece as habilidades sociais, particularmente o trabalho em equipe, ao demandar interação constante entre estudantes com diferentes perspectivas e níveis de conhecimento. Por fim, a aprendizagem baseada em interesses estimula habilidades pessoais como a responsabilidade social e adaptabilidade, uma vez que os alunos são desafiados a alinhar objetivos técnicos aos impactos socioambientais dos projetos, preparando-os para lidar efetivamente com mudanças e desafios emergentes no contexto da Indústria 4.0.

4.1.2. Sistemas de Resposta do Estudante (SRS) e Gamificação no Ensino de Termodinâmica para Turmas Numerosas

Caserta et al. (2021) abordam, em sua pesquisa, o problema relacionado ao engajamento estudantil em turmas numerosas (mais de 100 estudantes) na disciplina de Termodinâmica, componente curricular essencial no curso de graduação em Engenharia Química. Os autores destacam que, em turmas grandes, frequentemente poucos estudantes, muitas vezes os mesmos, demonstram participação ativa nas aulas, seja respondendo perguntas feitas pelos docentes ou

formulando suas próprias dúvidas (Mayer et al., 2009).

A falta de engajamento dos estudantes, especialmente em disciplinas fundamentais dos primeiros anos, como a Termodinâmica, encontra-se associada a diversos efeitos negativos, incluindo desistência da disciplina e reprovação nos exames, repercutindo adversamente sobre a eficiência geral do sistema educacional.

Uma abordagem amplamente empregada para enfrentar esse problema é o uso de sistemas de resposta do estudante (*Student Response Systems – SRS*). Em uma implementação típica desses sistemas, o docente formula perguntas para a turma, os estudantes respondem utilizando dispositivos eletrônicos (*clickers*), e as respostas são registradas e apresentadas de maneira agregada, geralmente na forma de histogramas. Posteriormente, os resultados são discutidos pelo professor junto aos alunos.

O valor pedagógico dos SRS tem sido questionado por alguns autores (Lantz, 2010; Lasry, 2008). Uma das principais críticas refere-se ao chamado "efeito novidade", segundo o qual os SRS ofereceriam características divertidas e inovadoras, porém com limitada eficácia como recurso pedagógico efetivo (Lantz, 2010).

Por outro lado, potenciais vantagens dos SRS podem ser categorizadas em três grupos principais: (i) benefícios ambientais em sala de aula, como anonimato – permitindo que os alunos se engajem no processo de aprendizagem sem receio de críticas ou repreensões – e participação ativa; (ii) benefícios diretamente relacionados à aprendizagem, tais como maior interação, estímulo à discussão, ensino contingencial e melhoria no desempenho e qualidade da aprendizagem; e (iii) benefícios avaliativos, como feedback imediato, avaliação formativa e autoavaliação em comparação ao desempenho médio da turma (Kay e LeSage, 2009).

Todavia, boa parte das evidências favoráveis ao uso de SRS é baseada em estudos retrospectivos, fundamentados em dados dispersos e limitados da literatura científica. Ademais, ainda carecem pesquisas quantitativas robustas conduzidas em salas de aula numerosas, com um controle comparável, ao longo de vários anos.

Recentemente, a adoção dos SRS recebeu grande impulso a partir de dois fatores principais: a ampla difusão dos smartphones e a disponibilidade crescente de softwares educacionais baseados em jogos (*gamificação*). Este segundo fator, especialmente, tem resultado no desenvolvimento de diversas aplicações web que permitem ao professor formular questionários à turma e coletar as respostas dos alunos durante as aulas. A abordagem de gamificação consiste na utilização de jogos criativos com o intuito de aprimorar a aprendizagem e tornar o processo educativo mais dinâmico e atrativo (Gee, 2003). Esse enfoque tem sido particularmente útil para enfrentar a falta de motivação e engajamento frequentemente

observada nas gerações de estudantes que cresceram após a popularização das tecnologias digitais de consumo em massa (Göksün e Gürsoy, 2019). Várias plataformas online atualmente possibilitam a aplicação dessa metodologia, dentre as quais destacam-se *Kahoot!* (<https://kahoot.com/>), *Socrative* (<https://www.socrative.com/>) e *Quizziz* (<https://quizziz.com/>).

Especificamente no estudo descrito por Caserta et al. (2021), os autores utilizaram a plataforma *Kahoot!* para a coleta dos resultados descritos. A plataforma *Kahoot!* teve origem no projeto de pesquisa Lecture Quiz, desenvolvido na Universidade Norueguesa de Ciência e Tecnologia em 2006 (Wu et al., 2011), que posteriormente levou à criação de uma empresa start-up em 2012 (Wang e Tahir, 2020). *Kahoot!* foi concebido como um serviço baseado em nuvem, fornecendo interfaces *web* em *HTML5* que dispensam a necessidade de instalação de *software* no dispositivo do usuário (Wang, 2015).

Neste contexto, Caserta et al. (2021) relatam a aplicação quantitativa do uso de SRS em aulas da disciplina de Termodinâmica em Engenharia Química ao longo de um período de três anos acadêmicos consecutivos, iniciando-se no ano letivo de 2014/15, por meio da plataforma *Kahoot!*. Para controle comparativo, os autores utilizaram os três anos acadêmicos anteriores (2011/12–2013/14), nos quais não houve utilização de sistemas de resposta do estudante. A motivação para a pesquisa originou-se dos desafios enfrentados na docência de disciplinas básicas que apresentam várias dificuldades conceituais, como a Termodinâmica, ministradas para grandes contingentes de estudantes de graduação. Um dos principais desafios identificados pelos autores foi o de promover efetivamente a aprendizagem ativa, necessária ao desenvolvimento de habilidades cognitivas avançadas que são imprescindíveis na resolução de problemas quantitativos de engenharia, baseados na complexidade conceitual e teórica das disciplinas fundamentais.

4.1.2.1. Metodologia e Implementação dos Sistemas de Resposta do Estudante (SRS) em Termodinâmica

Caserta et al. (2021) descrevem que a pesquisa foi realizada na disciplina de Termodinâmica do curso de graduação em Engenharia Química, ministrada na Universidade de Napoli "Federico II". A disciplina possui 12 créditos acadêmicos, sendo cada crédito equivalente a 25 horas totais de trabalho discente (8 horas presenciais e 17 horas de estudo extraclasse), conforme o Sistema Europeu de Transferência e Acumulação de Créditos (*European Credit Transfer and Accumulation System – ECTS*) descrito por Sanz-Pérez (2019).

O curso ocorre no segundo semestre do segundo ano do programa acadêmico, que possui duração total de três anos.

A estrutura típica da disciplina prevê três avaliações intermediárias de resolução de problemas aplicadas em sala de aula, visando incentivar a participação ativa dos alunos. Além disso, exercícios para resolução em casa são propostos e esclarecidos em horários específicos de consulta ou tutoria. A nota final da disciplina, com valor máximo de 30 pontos, corresponde à média das três avaliações intermediárias, sendo possível atribuir até dois pontos adicionais para estudantes que participam ativamente de atividades extras, como presença nas tutorias e resolução dos exercícios propostos. Nas turmas com utilização dos sistemas de resposta do estudante (SRS), os pontos adicionais eram concedidos aos alunos que respondiam, em média, ao menos metade das perguntas de múltipla escolha propostas. Embora o bônus fosse relativamente pequeno em relação à nota final, a perspectiva de obter pontos adicionais mostrou-se motivadora para os estudantes.

A disciplina de Termodinâmica sucede conteúdos básicos prévios, tais como cálculo, química e física, sendo a primeira disciplina a introduzir os estudantes à perspectiva da Engenharia Química. As dificuldades conceituais da matéria, as elevadas exigências cognitivas relacionadas à aplicação das leis fundamentais na resolução de problemas, o primeiro contato com uma abordagem especificamente de engenharia e o grande número de alunos por turma (acima de 100) constituem os principais desafios enfrentados, motivando assim o emprego de ferramentas complementares de ensino, como os sistemas de resposta estudantil (SRS), adotados nesta pesquisa para estimular o engajamento estudantil.

Para realizar um estudo comparativo, os autores definiram como grupo controle as turmas ministradas durante três anos acadêmicos anteriores (2011/12 a 2013/14), nos quais não foram utilizados os SRS. Nestas turmas-controle, a avaliação era realizada essencialmente por meio das três provas intermediárias, aplicadas em formato escrito. Os dados coletados dessas turmas-controle foram comparados aos dados obtidos durante os três anos acadêmicos subsequentes (2014/15 a 2016/17), quando o sistema de resposta estudantil baseado em smartphone foi empregado. O estudo englobou, ao todo, 1055 estudantes, sendo 497 alunos das turmas-controle e 558 alunos das turmas que utilizaram SRS. Em ambos os grupos (controle e SRS), as aulas foram ministradas pelo mesmo professor principal, auxiliado por um instrutor responsável pelas tutorias, consultas e correções, mantendo-se constantes o plano de ensino, o material didático e os exercícios utilizados nas aulas práticas. O estilo de ensino, predominantemente baseado em quadro negro e projeções pontuais de tabelas e figuras, foi mantido idêntico em ambos os grupos.

Nas turmas com utilização dos SRS, foram aplicados ao longo do curso quatro questionários com dez questões de múltipla escolha cada, utilizando-se o *software* descrito pelos autores. O tempo permitido para resposta por questão variou entre 30 e 60 segundos. A aplicação de cada questionário em sala de aula teve duração total entre 20 e 30 minutos, incluindo o tempo para configuração do projetor e da tela, bem como para os estudantes realizarem o login no sistema. Os questionários eram aplicados em aula sem aviso prévio aos estudantes

Os autores descrevem que os resultados obtidos por meio dos sistemas de resposta estudantil (SRS) foram coletados utilizando-se a plataforma *Kahoot!* (<https://kahoot.com/>). O software foi escolhido devido à sua eficácia, ausência de custos de utilização no período estudado, capacidade de receber um elevado número de participantes e a facilidade em executar testes diretamente nos smartphones dos estudantes, tanto via navegador web quanto por meio de um aplicativo.

Os questionários SRS foram aplicados uma a duas semanas antes de cada um dos três exames intermediários da disciplina. Esses testes eram compostos por questões de múltipla escolha que combinavam perguntas conceituais, numéricas e de interpretação gráfica. Os estudantes ingressavam nos testes do *Kahoot!* utilizando seu código de identificação acadêmica (ID). Desse modo, os resultados eram apresentados de forma anônima em relação aos demais estudantes, embora os resultados coletivos fossem exibidos em tela ao final de cada questão. Essa escolha pelo anonimato teve como objetivo encorajar a participação, proporcionando um maior nível de conforto e privacidade aos alunos, reduzindo, assim, possíveis pressões sociais normalmente associadas ao contexto de turmas numerosas (Kay e LeSage, 2009; Licorish et al., 2018; White e Dorman, 2001). De fato, a literatura reporta que muitos estudantes apresentam resistência em fazer ou responder publicamente perguntas feitas pelo professor (Exeter et al., 2010) e que os SRS podem contribuir para aumentar o engajamento de alunos reticentes (Graham et al., 2007; Tan et al., 2020).

Após o término do tempo estipulado para cada questão, a resposta correta era apresentada em tela, juntamente com o desempenho coletivo da turma, expresso em histograma contendo a porcentagem de respostas para cada alternativa. Esse procedimento permitia ao professor identificar tópicos com maior dificuldade entre os estudantes, possibilitando, assim, dedicar mais tempo ao esclarecimento dos conceitos correspondentes e oferecer exemplos ou aplicações adicionais. Além disso, o docente tinha a possibilidade de monitorar continuamente o progresso de aprendizagem da turma.

O desempenho acadêmico dos estudantes foi avaliado essencialmente por três métricas

principais: 1) as notas obtidas nos exames, 2) o tempo necessário até a aprovação na disciplina e 3) as taxas de desistência (abandono) da turma. A pontuação nos exames corresponde à nota final da disciplina, determinada pela média das três avaliações intermediárias ou, alternativamente, pelo exame final, conforme descrito anteriormente. Essas notas foram computadas separadamente para as turmas controle e para as turmas SRS, calculando-se uma média ao longo dos três anos de aplicação de cada metodologia. Quanto ao tempo para aprovação na disciplina, considerou-se a sessão de exames na qual o estudante efetivamente obteve aprovação; as sessões analisadas nesta pesquisa incluem as intermediárias, de verão e outono de cada ano acadêmico. Especificamente, estudantes que obtiveram aprovação nos três exames intermediários foram considerados como aprovados na sessão intermediária.

Outro parâmetro relevante analisado pelos autores refere-se ao engajamento estudantil, avaliado por meio da frequência e participação nas avaliações intermediárias realizadas durante a disciplina. Adicionalmente, a percepção dos estudantes acerca dos testes baseados em SRS foi investigada por meio de uma pesquisa anônima realizada imediatamente após cada questionário aplicado, utilizando-se o recurso de múltipla escolha disponibilizado pelo próprio software *Kahoot!*.

A pesquisa conduzida por Caserta et al. (2021) promove o desenvolvimento das competências comportamentais descritas por Maisiri et al. (2019) ao impulsiona o aprimoramento das habilidades de raciocínio, especificamente na comunicação técnica e interdisciplinar, ao incentivar os alunos a interpretar e responder questões conceituais, numéricas e gráficas em um curto espaço de tempo. Além disso, a metodologia empregada fortalece competências sociais como o trabalho em equipe, reduzindo barreiras de participação e estimulando interações positivas entre os estudantes.

4.1.3. Termodinâmica Acessível: Uso do *Excel* e VBA para Ensino de Propriedades de Soluções

Castier et al. (2011) destacam que a Termodinâmica na engenharia química é um tema que muitos estudantes consideram difícil de aprender, assim como alguns professores encontram desafios para ensinar. Enquanto a primeira lei da Termodinâmica, o princípio da conservação de energia, é relativamente fácil de compreender, a segunda lei e suas implicações mais abrangentes apresentam maiores dificuldades de entendimento. A Termodinâmica das soluções e suas aplicações para o equilíbrio de fases e químico também representam desafios

significativos. Em poucas semanas, os estudantes precisam aprender sobre propriedades residuais, de mistura, de diluição infinita, molares parciais e de excesso, além de fugacidades, atividades, coeficientes de fugacidade e coeficientes de atividade. É exigido que os estudantes dominem os aspectos conceituais dessas propriedades e saibam estimá-las por meio de modelos termodinâmicos. Métodos simples, como gás ideal, solução ideal e modelos gráficos, frequentemente permitem cálculos rápidos manuais com grande valor didático. No entanto, aplicações modernas da Termodinâmica das soluções ao projeto de processos químicos utilizam equações de estado (EOS) e modelos de energia livre de Gibbs em excesso (GE), geralmente complexos demais para cálculos manuais. Muitos desses modelos estão disponíveis em programas usados rotineiramente para o projeto de processos químicos, como ASPEN e HYSYS, que realizam cálculos totalmente automatizados de pontos de bolha e orvalho, flashes, entre outros.

XSEOS (Castier, 2008) - modelos de energia livre de Gibbs em excesso e equações de estado - é um suplemento do Excel que fornece funções para calcular propriedades Termodinâmicas, como propriedades residuais, propriedades de excesso e coeficientes de fugacidade e atividade. *XSEOS* ocupa um nicho intermediário entre cálculos manuais e cálculos totalmente automatizados. A ideia é que os estudantes utilizem as funções do suplemento para obter os valores das propriedades Termodinâmicas, permitindo que foquem no desenvolvimento de procedimentos para cálculos de flash, pontos de bolha e orvalho, e na determinação das necessidades energéticas e de potência em unidades de processos. Os autores consideram essa abordagem eficaz para a Termodinâmica na engenharia química (CET), pois expõe os estudantes a métodos modernos e os torna mais confiantes na resolução de problemas que exigem métodos numéricos.

Especialmente em países em desenvolvimento, instituições podem enfrentar dificuldades financeiras para adquirir licenças de software como *Mathcad* e *Matlab*. Por outro lado, o *Microsoft Office*, que inclui a planilha *Excel*® e o ambiente *Visual Basic for Applications* (VBA), está mais comumente disponível. Wong e Barford (2010) defenderam o uso do VBA como ferramenta para resolução de problemas em cursos de engenharia química. O objetivo a longo prazo do desenvolvimento do *XSEOS* é proporcionar um ambiente amigável ao usuário que seja aplicável também a cursos mais avançados ou especializados.

As rotinas em VBA (aproximadamente 22.700 linhas de código) que implementam os modelos e propriedades estão disponíveis como funções chamadas diretamente do *Excel*. Os cálculos centrais da maioria dessas rotinas foram programados usando álgebra computacional

(Castier, 1999). Usuários típicos interagem com o *XSEOS* diretamente através do *Excel*, porém o pacote permite acesso total e alterações no código VBA.

4.1.3.1. Conectando Teoria e Indústria: O XSEOS como Ferramenta para Projetos Interdisciplinares em Termodinâmica

Castier et al. (2011) informam que o suplemento *XSEOS* está disponível gratuitamente pelo autor, sendo seu uso confirmado em instituições como United Arab Emirates University (UAEU), Universidad del Zulia (Venezuela), Universidade Estadual de Maringá (Brasil), Universidade Federal da Bahia (Brasil) e Universidade Federal do Rio de Janeiro (Brasil).

Na UAEU, os fundamentos da Termodinâmica e suas aplicações aos ciclos de potência e refrigeração são abordados em um curso separado de Termodinâmica para engenharia. O curso de Termodinâmica em Engenharia Química (CET) inicia-se com uma breve revisão desses fundamentos e das propriedades do gás ideal, focando posteriormente na Termodinâmica das soluções (equações de estado e modelos de energia livre de Gibbs em excesso) e em equilíbrios químicos e de fases, utilizando o livro de Smith et al. (2005). Cerca de três semanas após o início do curso, são dedicados 30 minutos de aula para instalar o *XSEOS* e o *Solver* do *Excel* nos notebooks dos estudantes.

Na aula seguinte, aproximadamente 1 hora é destinada a explicar o funcionamento do *Solver* do *Excel* e resolver problemas envolvendo equações de estado cúbicas. Esses problemas são simples, nos quais, dadas duas especificações entre pressão (P), volume (V) e temperatura (T), objetiva-se encontrar a terceira. Como tarefa, os estudantes recebem problemas semelhantes e, posteriormente, utilizam o *XSEOS* para responder a um teste.

O curso continua com as propriedades residuais e sua relação com as equações de estado. Exemplos de expansão e compressão a entalpia ou entropia constante, utilizando planilhas do *XSEOS*, são apresentados em aula. Nesse momento, o instrutor demonstra os passos necessários para configurar e solucionar os problemas, enquanto os estudantes realizam os cálculos em seus próprios computadores. Também são discutidas as relações entre energia livre de Gibbs residual molar, fugacidade de compostos puros e o critério de isofugacidade para equilíbrio de fases. Exemplos envolvendo condições de saturação para compostos puros também são resolvidos com o *XSEOS* em aula. Ao todo, os estudantes utilizam o *XSEOS* por cerca de 1 hora nessas atividades, preparando-se para o primeiro dos dois projetos do curso baseados no suplemento, realizados em grupos de três estudantes, em média.

O primeiro projeto aborda aplicações de equações de estado e propriedades residuais em compostos puros, com o objetivo de praticar cálculos das cargas térmicas e das necessidades de potência em fluxogramas simples contendo combinações arbitrárias de bombas, compressores, turbinas, misturadores, evaporadores, condensadores e trocadores de calor. Cada projeto inclui um fluxograma específico (de 4 a 6 unidades), um composto definido e um modelo termodinâmico selecionado pelo instrutor.

Os grupos entregam arquivos do *Excel* com seus cálculos, acompanhados de um relatório escrito contendo premissas, resultados e discussões. Geralmente, os grupos gastam aproximadamente 4 horas realizando os cálculos no *XSEOS*, além do tempo inicial para compreensão do problema e levantamento de dados, e o tempo final para elaboração do relatório. A maioria dos grupos conclui os objetivos propostos, variando apenas na necessidade de suporte do instrutor.

O curso prossegue abordando conceitos de Termodinâmica das soluções como funções de excesso, propriedades molares parciais e coeficientes de atividade, consolidados por cálculos manuais. Após três semanas, os estudantes voltam a utilizar o *XSEOS* em aula por aproximadamente 1 hora, realizando cálculos de equilíbrio de fase para misturas binárias sob baixa pressão. Eles ajustam parâmetros de interação para modelos como UNQUAC e NRTL com dados isotérmicos e apreciam quando obtêm boa concordância entre valores experimentais e calculados. Além disso, utilizam funções de propriedades em excesso do *XSEOS* para calcular cargas térmicas em misturadores líquidos.

O segundo projeto é baseado em artigos recentes do *Journal of Chemical and Engineering Data*, com foco em cálculos de propriedades em excesso e equilíbrio entre fases sólido-líquido, líquido-líquido e vapor-líquido. Cada grupo recebe um artigo específico para leitura e, durante reuniões com o instrutor, definem-se tarefas específicas para reprodução gráfica dos dados originais. Frequentemente, grupos precisam buscar fontes adicionais para obter dados complementares de alta qualidade, como o *NIST Chemistry Webbook*. O uso do *XSEOS* varia entre 5 e 10 horas por grupo neste projeto.

Ao final do curso, cada grupo entrega seus arquivos *Excel* e realiza uma apresentação em sala de aula. Os estudantes apreciam a concordância dos cálculos com os resultados da literatura recente, fortalecendo sua confiança em suas habilidades e conhecimentos adquiridos. As notas são atribuídas considerando tanto a qualidade dos resultados (avaliação em grupo) quanto à participação individual e habilidade em responder perguntas durante a apresentação.

O método descrito por Castier et al. (2011) promove o desenvolvimento das competências técnicas e comportamentais de acordo com a categorização de Maisiri et al.

(2019). A utilização do suplemento *XSEOS* em conjunto com o *Solver* do *Excel* estimula diretamente o desenvolvimento de habilidades tecnológicas específicas, ao exigir que os estudantes manipulem ferramentas digitais para solucionar problemas reais envolvendo propriedades Termodinâmicas. Adicionalmente, as atividades realizadas com esses softwares fortalecem competências técnicas relacionadas à programação e simulação computacional, visto que os estudantes devem compreender, configurar e realizar cálculos utilizando modelos e algoritmos numéricos complexos. O método apresentado ainda promove o desenvolvimento de competências comportamentais, especialmente habilidades de raciocínio associadas à resolução de problemas complexos, tomar decisões técnicas adequadas e interpretar resultados comparando-os criticamente com dados experimentais recentes.

4.2. Estudos de Caso

4.2.1. Tendências e Demandas em Termodinâmica: Resultados do Inquérito da EFCE (2019 vs. 2010)

Kontogeorgis et al., (2021) relatam os resultados de um inquérito conduzido em 2019 pelo *Working Party on Thermodynamics and Transport Properties* da *European Federation of Chemical Engineering* (EFCE). O novo levantamento foi motivado pelos achados do estudo anterior (Hendriks et al., 2010), considerado influente nas diretrizes adotadas por indústria e academia, e teve como objetivo avaliar as mudanças ocorridas na última década.

O questionário atualizado manteve vários itens do instrumento original e acrescentou questões sobre digitalização, dados e comparações diretas com os resultados de 2010, totalizando dez perguntas (ante sete anteriormente). A pesquisa obteve 37 respostas - principalmente de empresas europeias com atuação global, além de participantes dos EUA e Japão - correspondendo a uma taxa de retorno de aproximadamente 60 %, superior aos 47 % de 2010.

As áreas de maior relevância indicadas pelas empresas concentram-se em estimativas e medições de propriedades Termodinâmicas e de transporte. Destacam-se: Termodinâmica de eletrólitos; modelos preditivos, como métodos de contribuição de grupos e o VTPR (*volume-translated* Peng–Robinson); modelagem e otimização de processos assistida por computador, inclusive intensificação de processos e manufatura contínua; propriedades termofísicas diversas (por exemplo, pressões de vapor e entalpias de vaporização); corrosão;

simulação de reservatórios; captura, utilização e armazenamento de CO₂ (CCUS); materiais de base biológica; e aplicações farmacêuticas.

4.2.1.1. Desafios Atuais em Termodinâmica Industrial: Dados, Modelagem e Lacunas Tecnológicas

Kontogeorgis et al., (2021) relatam que, ainda que menos da metade das empresas participantes do levantamento de 2010 tenha respondido ao novo inquérito, quase todas se posicionaram quanto à existência de desafios e mudanças relevantes em propriedades Termodinâmicas e de transporte na última década. Diversas companhias afirmam ser atualmente muito mais fácil localizar e acessar dados do que há dez anos; contudo, à medida que o volume de informações aumentou, a qualidade de parte desses dados diminuiu. A maioria indica redução nos investimentos em medições experimentais e ampliação do uso de simulações moleculares, as quais exigem verificação laboratorial.

Os respondentes apontam necessidade crescente de medições adicionais e do desenvolvimento de novas técnicas. Um exemplo citado refere-se à determinação de pressão de vapor de compostos de alta massa molar e volatilidade extremamente baixa (excetuando polímeros), para a qual metodologias clássicas - Knudsen, estática e *headspace* - pouco evoluíram. A maioria das empresas concorda que a modelagem de sistemas eletrolíticos continua sendo um desafio relevante, tanto em termos fundamentais quanto práticos; mencionam, por exemplo, a indisponibilidade de parâmetros essenciais em modelos como o e-NRTL.

Mudanças na formação acadêmica dos recém graduados foram observadas com ambivalência. Algumas empresas reconhecem avanço na capacidade de programação e versatilidade em modelagem computacional, mas assinalam declínio nas habilidades experimentais, atribuído a mudanças de prioridade e à redução de espaço laboratorial. Consequentemente, o tempo antes dedicado ao treinamento em modelagem é agora empregado no desenvolvimento das competências laboratoriais de novos colaboradores.

Quanto aos campos de aplicação, os participantes relatam foco expressivo em dados e modelagem de eletrólitos, além de interesse por compostos e misturas complexas. Muitos citam desafios adicionais vinculados à simulação de processos, frequentemente relacionados à disponibilidade e qualidade de dados ou modelos, bem como a limitações de interfaces e à confiabilidade e velocidade dos cálculos nos simuladores.

Como foi destacado por um dos respondentes, o ciclo virtuoso de aprendizagem a partir de estudos precedentes e do retorno de plantas industriais é considerado imprescindível para o avanço das ferramentas de simulação, abrangendo balanços rigorosos de massa e energia em regime estacionário, propriedades de equilíbrio em sistemas complexos e propriedades não-equilíbrio (cinéticas e de transporte).

De modo geral, os participantes mostram-se satisfeitos com o estado da arte dos algoritmos, embora velocidade e robustez permaneçam tópicos a aperfeiçoar. Aponta-se, ainda, que a importância dos algoritmos termodinâmicos pode ser secundária quando se busca a convergência global de uma simulação. Diversas empresas enfatizam a necessidade de treinamento contínuo no uso de simuladores, tanto por meio de parcerias com universidades quanto internamente.

A propagação de incertezas e a análise de sensibilidade em simuladores recebem atenção especial: quantificar a incerteza em propriedades físicas é considerado fundamental para o projeto de processos e a operacionalidade de plantas.

A questão relativa à digitalização (nova neste levantamento) buscou identificar oportunidades para cálculos e previsões de propriedades mediante avanços em big data, computação de alto desempenho, aprendizado de máquina (ML), inteligência artificial (IA), meta-modelagem e mineração de dados. As respostas revelaram visões diversas quanto ao estado atual e às tendências futuras, mas a maioria das empresas considera o tema prioritário. Preocupações recorrentes incluem a escassez de dados adequados para treinar modelos de ML/IA: dados de produção, operados em ponto fixo, raramente servem de base a previsões de propriedades; o acesso a bases extensas, como o NIST ou o TDE, é considerado crucial, mas oneroso para muitos. Destaca-se, ainda, a necessidade de que métodos de ML/IA sejam orientados por fundamentos físicos, evitando abordagens puramente *data-driven*.

Apesar das ressalvas levantadas, diversas empresas identificam perspectivas promissoras para o emprego de ML e IA tanto na área de dados termodinâmicos quanto em operações unitárias. Os usos mencionados incluem: (i) extração, comparação e reconciliação de dados provenientes da literatura; (ii) verificação de consistência de bancos de dados proprietários; (iii) meta-análises de múltiplos conjuntos de dados; (iv) consolidação de bases corporativas e acadêmicas; (v) geração de alertas para valores atípicos decorrentes de medições defeituosas; (vi) disponibilização de métodos avançados por meio de interfaces simplificadas; (vii) obtenção simultânea de diversas previsões acompanhadas de estatísticas e (viii) integração de fontes distintas com vistas a modelos mais robustos.

As empresas também mencionam, de modo recorrente, a importância de combinar

modelos tradicionais baseados em conhecimento com abordagens de aprendizagem profunda, destacando a complementaridade entre ambas. Além disso, enfatizam que métodos de ML/IA devem ser guiados por princípios físicos, de modo a evitar previsões puramente orientadas a dados sem fundamentação teórica. Várias companhias destacam, ainda, a sinergia entre modelos clássicos baseados em conhecimento e abordagens de aprendizado profundo, reconhecendo-se a importância de compreender quando aplicar técnicas de big data e quando recorrer a métodos tradicionais.

4.2.1.2. O Futuro do Ensino em Termodinâmica: Integrando IA, *Open-Source* e Sustentabilidade

Kontogeorgis et al., (2021) concluíram o inquérito com uma pergunta aberta, permitindo que os participantes comentassem aspectos adicionais ou reforçassem pontos já discutidos. Muitos responderam com considerações sobre o ensino de engenharia química e o papel da Termodinâmica, frequentemente de forma enfática. Entre as contribuições, destacou-se a proposta de “modernização do currículo básico de Termodinâmica nas universidades europeias” com três metas principais: (i) ampliar a visão dos futuros especialistas sobre a relevância de seu trabalho e a melhor forma de atender demandas da indústria e da academia; (ii) fortalecer competências em ciência de dados, simulação molecular e integração de modelos termodinâmicos com outras áreas de modelagem; e (iii) aumentar a presença de análise de incertezas, com representação transparente de erros e intervalos de confiança.

Outra temática recorrente foi a combinação de inteligência artificial com propriedades Termodinâmicas, vista como alternativa à escassez de dados e às limitações de modelos empíricos correlativos. Um participante observou que “é preciso vulgarizar um pouco mais os conceitos termodinâmicos básicos e métodos numéricos em softwares open-source, como Python ou R, aumentando a visibilidade da comunidade de Termodinâmica e tornando a área mais atraente aos estudantes”. Ressaltou-se que bases de dados estruturadas - DIPPR, NIST, entre outras - constituem “Big Data” essenciais para abordagens híbridas que unem modelos baseados em conhecimento e algoritmos de machine learning, contribuindo para o desenvolvimento de “gêmeos digitais” de plantas químicas e bioquímicas.

O tema de mudança climática e sustentabilidade, pouco mencionado ao longo do questionário, foi enfatizado por uma empresa que defendeu que “este tópico deve estar no topo da agenda em todos os lugares”. Os autores registram, contudo, que a situação vem evoluindo:

várias companhias confirmaram que a sustentabilidade, incluindo a redução drástica de emissões de gases de efeito estufa, passou a ser elemento central de suas estratégias corporativas, tendência agora observada em muitas organizações ao redor do mundo.

4.2.1.3. Modernização do Ensino de Termodinâmica Entre Laboratório e Simulação

Kontogeorgis et al., (2021) relatam que numerosas empresas participantes manifestaram preocupação com o declínio da qualidade dos dados experimentais e o fechamento de laboratórios especializados. Para garantir confiabilidade, sugerem-se esforços adicionais na avaliação crítica de novos dados, na comunicação sistemática de erros experimentais e na verificação de consistência Termodinâmica dos valores publicados. A introdução de rotinas de automação tem acentuado a carência de especialistas capazes de analisar resultados de forma rigorosa, ocasionando aumento de informações incorretas.

Os respondentes ressaltam que o modelamento termodinâmico deve apoiar não apenas o desenho de processos, mas também o desenvolvimento de produtos, especialmente formulações nas quais propriedades interfaciais e de transporte são cruciais. Reaparece, como no inquérito anterior, a preocupação com a formação em Termodinâmica: embora a nova geração de engenheiros demonstre maior versatilidade em modelagem, carece de habilidades experimentais e de análise crítica, o que pode levar à disseminação de dados defeituosos e, por conseguinte, a cálculos de engenharia equivocados. Propõe-se uma modernização de longo prazo do currículo, com ênfase em tópicos como entropia e exergia, estes relevantes em avaliações tecno-econômicas de tecnologias de armazenamento e transporte de energia, além de simulações moleculares cada vez mais empregadas na geração de dados.

Pela primeira vez, o levantamento abordou explicitamente a digitalização. Os participantes convergem na ideia de que grandes bases de dados, combinadas com algoritmos avançados (aprendizado de máquina, inteligência artificial, meta-modelagem), devem ser aplicadas a sistemas complexos, análises de risco e tendências, além da produção de dados pseudo-experimentais para Termodinâmica, modelagem de processos e CFD. Para cálculos de propriedades, recomendam-se abordagens QSPR (*Quantitative structure–activity relationship*)/ML. Já na simulação de operações unitárias, técnicas de ML, AI e mineração de dados auxiliariam na otimização de parâmetros. Muitos entrevistados defendem a busca de sinergias entre modelos tradicionais baseados em conhecimento e métodos de aprendizagem

profunda, encorajando a continuidade desses esforços inovadores.

4.2.2. Tendências e Desafios na Modelagem Termodinâmica Industrial: Entre Simulações Moleculares e Aprendizado de Máquina

A pesquisa conduzida por de Hemptinne et al. (2022) atende inicialmente à solicitação de resumir os principais pontos levantados na revisão realizada por Kontogeorgis et al., (2021), propondo uma visão concisa sobre o estado da arte e as principais direções recomendadas para a comunidade da Termodinâmica aplicada na próxima década. Na construção desta análise, além dos resultados do levantamento mencionado, os autores consideraram diversos documentos adicionais, entre eles cinco relatórios de simpósios anteriores sobre o uso industrial da Termodinâmica, produzidos pelo grupo de trabalho industrial da EFCE.

Uma questão central destacada pelos pesquisadores refere-se à relevância prática da Termodinâmica aplicada no contexto atual. A sociedade contemporânea enfrenta múltiplos desafios globais, e o conhecimento técnico-científico proporcionado pela Termodinâmica é considerado essencial para abordar muitos deles. Em resposta a esses desafios, as Nações Unidas definiram e acordaram 17 Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS), visando criar um mundo melhor até 2030, combatendo a pobreza, reduzindo desigualdades e enfrentando urgências como as mudanças climáticas, entre outras questões. Esses objetivos têm recebido atenção global significativa e estão diretamente relacionados a temas como água, energia, clima, oceanos, urbanização, transporte, ciência e tecnologia.

De acordo com a *American Chemical Society* (ACS), a química desempenha um papel crucial no alcance dos ODS, devido à sua ampla abrangência tecnológica, econômica e de saúde humana. A ACS identifica especificamente sete ODS prioritários nos quais a química e as tecnologias químicas devem exercer papel significativo na promoção do desenvolvimento sustentável global.

Concluindo, de Hemptinne et al. (2022) afirmam que a Termodinâmica aplicada tem condições ideais para desempenhar um papel estratégico na resolução dos grandes desafios atuais. Sendo a ciência que estuda as interações entre energia e matéria, a Termodinâmica ocupa uma posição privilegiada para auxiliar no alcance dos ODS e, conseqüentemente, na construção de um futuro mais sustentável. Sua contribuição é essencial para compreender, projetar e otimizar processos e produtos industriais cada vez mais complexos.

4.2.2.1. Modelagem Termodinâmica na Era da Computação Avançada

Na pesquisa realizada por de Hemptinne et al. (2022), todas as aplicações discutidas exigem, em algum ponto, o cálculo de propriedades físico-químicas. Essas propriedades podem ser obtidas utilizando como entradas as condições operacionais e a composição do fluido (no caso de projeto de processos) ou, alternativamente, identificando o composto ou mistura que melhor atende às exigências desejadas (no projeto de produtos). Para tanto, modelos são essenciais. Embora exista uma tendência crescente para o uso de abordagens baseadas em aprendizado de máquina (ML) e quimioinformática na previsão das propriedades dos compostos, os autores destacam que tais métodos não substituirão completamente os modelos fisicamente fundamentados, resultado de mais de um século de pesquisa (Jirasek et al., 2004).

Existe uma expectativa por parte da comunidade usuária em acessar ferramentas que ofereçam resultados numericamente corretos de maneira "automática", o que é denominado como "totalmente preditivo". Infelizmente, ferramentas infalíveis como essas ainda não existem. Atualmente, o que está disponível são documentos que auxiliam o engenheiro a selecionar o modelo mais apropriado. Frequentemente, essa escolha está limitada à disponibilidade do modelo em simuladores comerciais, que possuem parâmetros extensivos e documentação detalhada (Economou et al., 2014).

Como comunidade de especialistas, os autores enfatizam que ferramentas "automáticas" nunca eliminarão a necessidade de profissionais treinados para planejar cenários de simulação e interpretar resultados. Fenômenos não intuitivos podem ocorrer, levando a perdas de tempo, recursos financeiros e até questões de segurança.

Os autores recomendam cautela quanto ao uso do termo "preditivo", ressaltando que os modelos discutidos são equações matemáticas com parâmetros ajustados a partir de dados experimentais. A previsibilidade pode referir-se à extrapolação para outras condições de processo, composição da mistura ou propriedades, ou a compostos similares, através de métodos de contribuição de grupo (GC). Modelos baseados em equações de estado (EoS) têm a capacidade de descrever consistentemente muitas propriedades, o que é menos comum em modelos baseados em coeficientes de atividade e menos ainda nas abordagens correlativas baseadas em ML. A previsibilidade frequentemente refere-se à capacidade de descrever misturas fluidas sem dados experimentais prévios, algo necessário para avaliações rápidas de viabilidade de processos ou desenvolvimento de produtos.

A simulação molecular refere-se à modelagem matemática da matéria (sólida, líquida ou gasosa, compostos puros ou misturas) em nível molecular, levando em consideração

interações inter e intramoleculares por meio de funções potenciais conhecidas como campos de força. Desenvolvida originalmente na década de 1950, esta técnica esteve limitada durante décadas devido às elevadas exigências computacionais. O aumento significativo do poder computacional a custos acessíveis atualmente permite realizar grandes simulações em diferentes escalas (temporais e espaciais), possibilitando a compreensão precisa de fenômenos complexos.

O contínuo desenvolvimento de novas arquiteturas computacionais impulsiona o aumento da capacidade computacional, seguindo a Lei de Moore, que prevê a duplicação da capacidade de processamento a cada dois anos aproximadamente (Figura 8). Este crescimento exponencial da capacidade computacional abre novas perspectivas para simulações moleculares cada vez mais detalhadas e precisas, permitindo a modelagem de sistemas com maior complexidade, tanto em termos das interações moleculares quanto das escalas temporais e espaciais envolvidas. Com isso, cientistas e engenheiros terão a oportunidade de investigar fenômenos anteriormente inacessíveis, abordando desde propriedades físicas específicas até a dinâmica detalhada de processos químicos e materiais avançados. Consequentemente, espera-se um avanço significativo na capacidade de prever comportamentos e propriedades, reduzindo assim custos experimentais e acelerando a inovação tecnológica em diversas áreas industriais, desde a fabricação de novos materiais até o desenvolvimento de processos mais sustentáveis e eficientes.

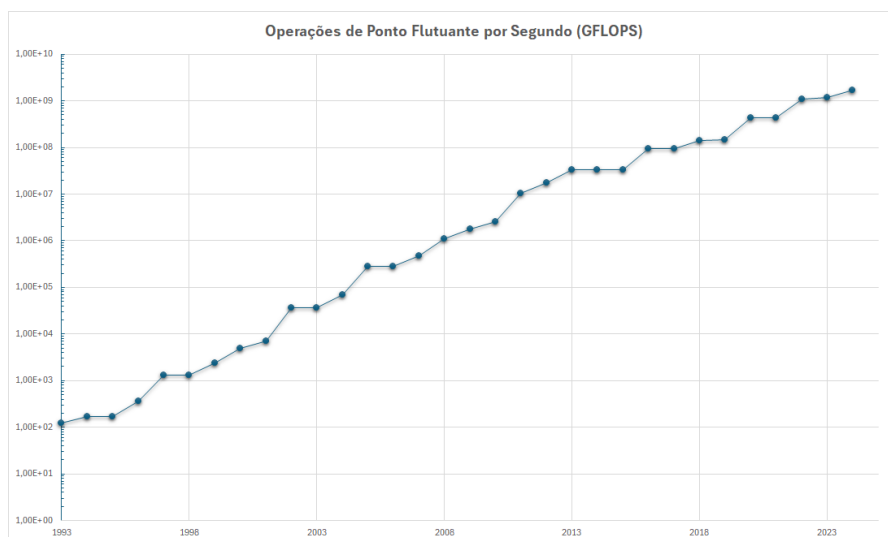


Figura 8: Número de operações de ponto flutuante realizadas por segundo pelo supercomputador mais rápido em um determinado ano. Esse valor é expresso em *gigaFLOPS*, equivalente a 10^9 operações de ponto flutuante por segundo. Fonte: (Dongarra et al. (2024))

É destacado pelos autores o uso de métodos computacionais hierárquicos multiescala para o projeto e a modelagem precisa de processos químicos e novos materiais na indústria química. Um exemplo bem-sucedido mencionado pelos autores é a aplicação de simulações de dinâmica molecular para prever com precisão a difusividade de reagentes e produtos em nanoporos catalíticos, sob condições reais de temperatura e pressão, especificamente no processo gás-para-líquido (GTL) (Papavasileiou et al., 2019). O processo GTL converte gás de síntese (*syngas*, composto principalmente por H_2 e CO) em frações líquidas de hidrocarbonetos, incluindo parafinas (desde n-hexano até ceras), olefinas e, em menor proporção, compostos oxigenados como álcoois. As previsões obtidas por simulações moleculares foram utilizadas para parametrizar modelos empíricos empregados na otimização operacional de uma instalação industrial em larga escala no Catar.

Os resultados obtidos por simulações moleculares são frequentemente validados através de comparação com dados experimentais existentes. Atualmente, essas simulações também guiam experimentos na investigação de novas moléculas ou sistemas químicos, em condições de temperatura e pressão ainda não exploradas. Um exemplo citado pelos autores é a medição das propriedades termofísicas de misturas de fluidos associadas ao processo GTL, cujas previsões iniciais foram realizadas por meio de simulação molecular (Heller et al., 2014). Dados

obtidos por espalhamento dinâmico de luz demonstraram excelente concordância com tais previsões. Como reconhecimento da acurácia desses métodos, o periódico "*Journal of Chemical and Engineering Data*", conhecido pela publicação de dados termodinâmicos altamente precisos, passou a aceitar desde 2010 artigos contendo exclusivamente dados obtidos por simulações moleculares de sistemas reais, sem necessidade obrigatória de dados experimentais.

Adicionalmente, métodos de aprendizado de máquina (ML) podem ser treinados usando tanto dados experimentais quanto dados gerados por simulação molecular, reduzindo significativamente o esforço computacional necessário. Um exemplo mencionado refere-se ao desenvolvimento de modelos preditivos baseados em ML por pesquisadores da Universidade Northwestern, voltados ao design de estruturas metal-orgânicas (MOFs) aplicáveis na separação de gases e outras aplicações tecnológicas.

Por fim, os autores destacam que a simulação molecular pode ser especialmente útil na previsão de propriedades em sistemas altamente tóxicos, corrosivos ou em condições que impossibilitam a realização de experimentos. No entanto, ressaltam que apesar da crescente qualidade e precisão dos resultados obtidos por simulações moleculares, estas nunca eliminarão completamente a necessidade de medições experimentais reais de alta qualidade.

4.2.2.2. Os Desafios da Formação em Termodinâmica na Engenharia Química Moderna

Ao analisar o levantamento intitulado "Requisitos Industriais para Propriedades Termodinâmicas e de Transporte: 2020" (Kontogeorgis et al., (2021)), de Hemptinne et al. (2022) destaca a atenção à educação, treinamento e colaboração na área da engenharia química, destacando o papel da Termodinâmica aplicada. Muitos participantes mencionaram a redução do tempo dos cursos universitários devido ao Processo de Bolonha em países europeus e apontaram uma insuficiência no conhecimento básico em Termodinâmica e seus modelos associados. Ressaltaram também a necessidade de educação adicional e treinamento para suprir essa lacuna. A educação em diversos níveis foi identificada como fundamental para a aplicação bem-sucedida da Termodinâmica na indústria, abrangendo desde o nível básico (graduação e pós-graduação) até a educação e aprendizagem continuada ao longo da carreira profissional.

De acordo com os autores, é essencial que todo engenheiro químico possua uma noção básica sobre equilíbrio de fases e principais modelos termodinâmicos. Contudo, destacaram que há uma demanda significativa por especialistas, sendo o doutorado apontado como o meio mais eficiente para alcançar essa especialização. Tal formação enfrenta limitações como a

disponibilidade reduzida de estudantes interessados, número limitado de bolsas de doutorado e a escassez de oportunidades profissionais atrativas após a formação. A pesquisa revelou preocupação quanto à diminuição do número de especialistas industriais, situação que compromete a capacidade das empresas em resolver problemas e inovar. A Termodinâmica aplicada é crucial para diversos cálculos e projetos da engenharia química, e erros nessa área podem prejudicar ou inviabilizar melhorias industriais. Esse declínio na especialização preocupa não só pela saúde das empresas, mas também pela atratividade dessa carreira para futuras gerações de engenheiros.

Considerando os diversos desafios e aplicações da Termodinâmica enfrentados, a pesquisa enfatizou a importância da educação continuada e treinamento constante dos profissionais da indústria. Desde o início da carreira, é essencial que o engenheiro de processos compreenda bem as noções básicas da Termodinâmica e os modelos apropriados para diferentes aplicações e sistemas. Engenheiros frequentemente utilizam diversos simuladores com modelos termodinâmicos integrados. Com o surgimento de novas áreas de aplicação, processos sustentáveis, materiais avançados e novos componentes industriais, a área das propriedades termofísicas está em constante evolução. Assim, é necessário que os engenheiros estejam cientes das vantagens e limitações dessas ferramentas, sabendo quando consultar especialistas. O papel desses especialistas é frequentemente subestimado, embora contribuam significativamente para acelerar inovações, otimizar ferramentas de simulação, prevenir acidentes ao antecipar eventos inesperados e facilitar interações com instituições acadêmicas e consórcios, representando eficazmente às necessidades da indústria.

Por fim, os autores destacam que a Termodinâmica aplicada desempenha um papel essencial na transição para uma economia sustentável e circular. Fornecendo modelos, ferramentas e dados à comunidade de engenharia, ela pode contribuir significativamente para reduzir o impacto ambiental das atividades humanas, mantendo ao mesmo tempo um padrão de vida adequado nas sociedades contemporâneas.

CONCLUSÃO

A Termodinâmica mantém-se como disciplina fundamental na formação do engenheiro químico, constituindo a base teórica e prática para o projeto, análise e otimização de processos industriais. No contexto da Indústria 4.0, caracterizada pela integração de tecnologias digitais, automação e sistemas ciberfísicos, o ensino desta disciplina enfrenta desafios amplificados, que demandam a reavaliação de metodologias pedagógicas e a incorporação de competências técnicas e comportamentais alinhadas às novas exigências do mercado.

Os estudos revisados evidenciam que as dificuldades tradicionais no aprendizado de Termodinâmica, como a abstração matemática, a articulação entre teoria e prática e a interpretação de fenômenos físicos por meio de equações, são agravadas pela necessidade de preparar profissionais capazes de operar em ambientes tecnologicamente complexos. Estratégias pedagógicas inovadoras, como a integração de ferramentas computacionais (simulações moleculares, química quântica aplicada e softwares como *Excel/VBA*), a gamificação por meio de sistemas de resposta estudantil (SRS) e a aprendizagem baseada em projetos investigativos, demonstram potencial para superar essas barreiras. Tais abordagens não apenas facilitam a compreensão conceitual, mas também desenvolvem habilidades digitais e analíticas críticas para a manipulação de *big data*, modelagem preditiva e otimização de processos, pilares da Indústria 4.0.

A análise das competências exigidas pela quarta revolução industrial reforça a importância de equilibrar *hard skills*, como domínio de tecnologias emergentes (IoT, IA, robótica) e métodos numéricos, com *soft skills*, incluindo pensamento crítico, colaboração interdisciplinar e adaptabilidade. A literatura destaca que a consolidação dessas competências depende da interação entre academia e indústria, por meio de currículos flexíveis, ensino baseado em fenômenos reais e parcerias em fábricas de aprendizagem.

Em síntese, o ensino da Termodinâmica na era da Indústria 4.0 demanda uma transformação pedagógica contínua, que priorize a integração entre fundamentos teóricos, aplicações práticas e competências digitais. A articulação entre instituições acadêmicas e setor industrial, aliada à adoção de estratégias educacionais inovadoras, é crucial para formar profissionais capacitados a enfrentar os desafios tecnológicos e socioambientais do século XXI, contribuindo para processos industriais mais eficientes, sustentáveis e alinhados aos princípios da Quarta Revolução Industrial.

REFERÊNCIAS

- A View on the Future of Applied Thermodynamics Jean-Charles de Hemptinne, Georgios M. Kontogeorgis, Ralf Dohrn, Ioannis G. Economou, Antoon ten Kate, Susanna Kuitunen, Ljudmila Fele Žilnik, Maria Grazia De Angelis, and Velisa Vesovic Industrial & Engineering Chemistry Research 2022 61 (39), 14664-14680 DOI: 10.1021/acs.iecr.2c01906
- A.C. Pereira, F. Romero, A review of the meanings and the implications of the Industry 4.0 concept, *Procedia Manufacturing*, Volume 13, 2017, Pages 1206-1214, ISSN 2351-9789, <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2017.09.032>.
- Adeyeri, S., Kanisuru, M., Khumbulani, M., & Olukorede T. (2015). Integration of agent technology into manufacturing enterprise: 31:127–182 167. A review and platform for industry 4.0. In *Proceedings of the 2015 international conference on industrial engineering and operations management Dubai, United Arab Emirates (UAE)* (pp. 1625–1635).
- Adolph, S., Tisch, M. and Metternich, J. 2014. Challenges and approaches to competency development for future production. *Journal of International Scientific Publications—Educational Alternatives*, 12(1): pp.
- Allen, J. B.; Barker, L. N.; Ramsden, J. H. Guided inquiry laboratory. *J. Chem. Educ.* 1986, 63, 533.
- American Chemical Society. Chemistry & Sustainable Development Goals. <https://www.acs.org/content/acs/en/sustainability/chemistry-sustainable-development-goals.html>
- Amir Karimi *Proceedings of IMECE2008 2008 ASME International Mechanical Engineering Congress and Exposition* October 31–November 6, 2008, Boston, Massachusetts, USA <https://asmedigitalcollection.asme.org/proceedings>
- Barragán-Arroche, J.F., Bazúa, E., 2004. Tools for teaching thermodynamics in Chemical Engineering. *Technol. Sci.* 19 (2), 83–91
- Bauer, W., Schlund, S., Marrenbach, D., & Ganschar, O. (2014). Industry 4.0—Volkswirtschaftliches Potenzial für Deutschland, BITKOM company. <http://www.produktionsarbeit.de/content/dam/produktionsarbeit/de/documents/Studie-Industrie-4-0-Volkswirtschaftliches-Potential-fuer-Deutschland.pdf>
- Bauernhansl, T. (2014). Die vierte Industrielle Revolution. *Der Weg in ein wertschaffendes Produktionsparadigma*, 4 (p.p. 3–35.)
- Bauernhansl, T., ten Hompel, M., & Vogel-Heuser, B. (Eds.) (2014). *Industry 4.0 in Produktion, Automatisierung und Logistik. Anwendung, Technologien und Migration* 8, 30–40
- Becker N. and Towns M., (2012), Students' understanding of mathematical expressions in physical chemistry contexts: an analysis using Sherin's symbolic forms, *Chem. Educ. Res. Pract.*, 13(3), 209–220
- Benešová, A. and Tupa, J. 2017. Requirements for education and qualification of people in Industry 4.0. *Procedia Manufacturing*, 11, pp. 2195-2202.
- Birch, F. Finite Elastic Strain of Cubic. *Phys. Rev.* 1947, 71, 809–824. Murnaghan, F. D. Finite Deformations of an Elastic Solid. *American Journal of Mathematics* 1937, 59, 235.
- Borrageiro, Kayla & Mennega, Nita. (2023). Essential Skills Needed in the Fourth Industrial Revolution (4IR): A Systematic Literature Review. 1-13. 10.23919/IST-Africa60249.2023.10187815.
- Bucy B. R., Thompson J. R. and Mountcastle D. B., (2007), Student (mis)application of partial differentiation to material properties, *Proceedings of the 2006 Physics Education Research Conference of the American Institute of Physics*
- Bungart, S. (2014). Industrial internet versus industry 4.0. *Produktion—Technik und Wirtschaft für die deutsche Industrie*. Retirado de www.produktion.de/automatisierung/industrial-internet-versus-Industry-4-0/print
- Bürger, T., & Tragl, K. (2014). SPS-Automatisierung mit den Technologien der IT-Welt verbinden. *Technologien und Migration* (pp. 559–569)
- Caratozzolo, P., Bravo, E., Garay-Rondero, C., & Membrillo-Hernandez, J. 2021. "Educational Innovation: Focusing on enhancing the skills of Generation Z workforce in STEM." 2021 World Engineering Education Forum/Global Engineering Deans Council (WEEF/GEDC)
- Caratozzolo, Patricia, Gabriela Sirkis, Clara Piloto, and Marc Correa. 2020. "Skills Obsolescence and Education Global Risks in the Fourth Industrial Revolution Lifelong Learning and Skills Obsolescence View Project

Cognitive Tools of Serious-Storytelling in Engineering View Project Skills Obsolescence and Education Global Risks in the Fourth Industrial Revolution,” November. <https://doi.org/10.1109/WEEFGEDC49885.2020.9293687>.

- Castier, M., 1999. Automatic implementation of thermodynamic models using computer algebra. *Comput. Chem. Eng.* 23, 1229–1245.
- Castier, M., 2008. XSEOS: an open software for chemicalengineering thermodynamics. *Chem. Eng. Educ.* 42 (2), 74–81.
- Chang, V., Ramachandran, M., Wills, G., Walters, R., Li, C., & Watters, P. (2016). Editorial for FGCS special issue: Big Data in the cloud. *Future Generation Computer Systems*, 65, (p.p. 73–75)
- Chemistry Education Research and Practice, 2014, 15, p. p. 320 DOI: 10.1039/c4rp00011k
- Christensen W. M. and Thompson J. R., (2010), Investigating student understanding of physics concepts and the underlying calculus concepts in thermodynamics, *Proceedings of the 13th Annual Conference on Research in Undergraduate Mathematics Education*.
- Christensen W. M. and Thompson J. R., (2012), Investigating graphical representations of slope and derivative without a physics context, *Physical Review Letters Special Topics Physics Education Research*, 8, 023101.
- Chui, M., Manyika, J. and Miremadi, M. 2016. Where machines could replace humans - and where they can't (yet). McKinsey & Company, Chicago, pp. 1-16.
- Cimini, Chiara, Albachiara Boffelli, Alexandra Lagorio, Matteo Kalchschmidt, and Roberto Pinto. 2020. “How Do Industry 4.0 Technologies Influence Organisational Change? An Empirical Analysis of Italian SMEs.” *Journal of Manufacturing Technology Management* 32 (3): 695–721. <https://doi.org/10.1108/jmtm-04-2019-0135>
- Corcio, M. (2016). Manufacturing intelligence, group manager: Automation, MES & Electricity. http://www.iiconsortium.org/smart-factory-forum/MIGUEL-CORCIO-Keynote_IIC-MC-Smart_Manufacturing.pdf. Available on August 28, 2017
- Cotet, G. B., Carutasu, N. L., & Chiscop, F. 2020. “Industry 4.0 Diagnosis from an iMillennial Educational Perspective.” *Education Sciences*, 10(1), 21.
- Cotet, G.B., Balgiu, B.A. and Zaleschi, V.C. 2017. Assessment procedure for the soft skills requested by Industry 4.0. *MATEC Web of Conferences*, 121, pp. 07005.
- Cotet, Gabriela, Beatrice Balgiu, and Violeta -Carmen Zaleschi. 2017. “Assessment Procedure for the Soft Skills Requested by Industry 4.0.”
- Derrick M. E. and Derrick F. W., (2002), Predictors of success in physical chemistry, *J. Chem. Educ.*, 79(8), 1013–1016.
- Dincer, I., Rosen, M.A., 2007. *Exergy: energy, environment and sustainable development*, first ed. Springer, USA.
- Discutir as habilidades e competências específicas que a Indústria 4.0 exige dos engenheiros, como pensamento crítico, resolução de problemas complexos, interdisciplinaridade e habilidades em tecnologia digital.
- Dongarra et al. (2024) – with minor processing by Our World in Data. “Floating-Point Operations per Second (GFLOPS)” [dataset]. Dongarra et al., “TOP 500” [original data] - <https://ourworldindata.org/technological-change>
- E. Oztemel, S. Gursev, "Literature review of Industry 4.0 and related technologies" - *Journal of Intelligent Manufacturing* (2020) 31:127–182 <https://doi.org/10.1007/s10845-018-1433-8>
- Economou, I. G.; de Hemptinne, J.-C.; Dohrn, R.; Hendriks, E.; Keskinen, K.; Baudouin, O. Industrial use of thermodynamics workshop: Round table discussion on 8 July 2014. *Chem. Eng. Res. Des.* 2014, 92, 2795–2796
- Evans, A., & Annunziata, B. (2012). Industrial internet: Pushing the boundaries of minds and machines. https://www.ge.com/docs/chapters/Industrial_Internet.pdf.
- Exeter, D.J., Ameratunga, S., Ratima, M., Morton, S., Dickson, M., Hsu, D., Jackson, R., 2010. Student engagement in very large classes: the teachers' perspective. *Stud. High. Educ.* 35 (7), 761–775.

- Fallera, C., & Feldmüllera, D. (2015). Industry 4.0 learning factory for regional SMEs. In *The 5th conference on learning factories 2015* (Vol. 32, pp. 88–91).
- Gee, J.P., 2003. What video games have to teach us about learning and literacy. *Comput. Entertainment (CIE)* 1 (1), 20.
- Graham, C.R., Tripp, T.R., Seawright, L., Joeckel, G., 2007. Empowering or compelling reluctant participators using audience response systems. *Act. Learn. High. Educ.* 8 (3), 233–258.
- Göksün, D.O., Gürsoy, G., 2019. Comparing success and engagement in gamified learning experiences via Kahoot and Quizizz. *Comput. Educ.* 135, 15–29.
- H. Kagermann, “Change Through Digitization - Value Creation in the Age of Industry 4.0,” in *Manag. of Perm. Change*, Springer, 2015.
- Hahn K. E. and Polik W. F., (2004), Factors influencing success in physical chemistry, *J. Chem. Educ.*, 81(4), 567–572
- Hattingh, S., 2018. “Preparing the workforce for the Fourth Industrial Revolution.” *Skills at Work Theory and Practice Journal*, 9(1), pp.6-18.
- Heller, A.; Koller, T. M.; Rausch, M. H.; Fleys, M. S. H.; Bos, A. N. R.; van der Laan, G. P.; Makrodimitri, Z. A.; Economou, I. G.; Fröba, A. P. Simultaneous determination of thermal and mutual diffusivity of binary mixtures of n-octacosane with carbon monoxide, hydrogen, and water by dynamic light scattering. *J. Phys. Chem. B* 2014, 118, 3981–3990.
- Hendriks, E.; Kontogeorgis, G. M.; Dohrn, R.; de Hemptinne, J. C.; Economou, I. G.; Zilnik, L. F.; Vesovic, V. Industrial Requirements for Thermodynamics and Transport Properties. *Ind. Eng. Chem. Res.* 2010, 49, 11131–11141.
- Hermann, M., Tobias, P., & Otto, B. (2016). Design principles for industry 4.0 scenarios. http://www.thiagobranquinho.com/wp-content/uploads/2016/11/Design-Principles-for-Industrie-4_0-Scenarios.pdf.
- Herreid, C. F. ConfChem Conference on Case-Based Studies in Chemical Education: The Future of Case Study Teaching in Science. *J. Chem. Educ.* 2013, 90, 256–257.
- [https://en.wikipedia.org/wiki/Gaussian_\(software\)](https://en.wikipedia.org/wiki/Gaussian_(software))
- <https://www.globalgoals.org/>
- In-Class Student Questions and Take-Home Projects for Chemical Engineering ThermodynamicsXiao DongJournal of Chemical Education 2021 98 (4), 1193-1200DOI: 10.1021/acs.jchemed.0c01253
- Industrial Requirements for Thermodynamic and Transport Properties: 2020Georgios M. Kontogeorgis, Ralf Dohrn, Ioannis G. Economou, Jean-Charles de Hemptinne, Antoon ten Kate, Susanna Kuitunen, Miranda Mooijer, Ljudmila Fele Žilnik, and Velisa VesovicIndustrial & Engineering Chemistry Research 2021 60 (13), 4987-5013DOI: 10.1021/acs.iecr.0c05356
- Ivaldi, Silvia, Giuseppe Scaratti, and Ezio Fregnan. 2021. “Dwelling within the Fourth Industrial Revolution: Organizational Learning for New Competences, Processes and Work Cultures.” *Journal of Workplace Learning* 34 (1): 1–26. <https://doi.org/10.1108/jwl-07-2020-0127>.
- Jirasek, F.; Hasse, H. Perspective: Machine Learning of Thermophysical Properties. *Fluid Phase Equilib.* 2021, 549, 113206. (25) Abildskov, J.; Kontogeorgis, G. M. Chemical Product Design: A New Challenge of Applied Thermodynamics. *Chem. Eng. Res. Des.* 2004, 82, 1505–1510.
- Joback, K. G.; Reid, R. C. Estimation of Pure-Component Properties from Group-contributions. *Chem. Eng. Commun.* 1987, 57, 233–243.
- K. Zhou, T. Liu, and L. Zhou, “Industry 4.0: Towards Future Industrial Opportunities and Challenges,” in *International Conference on Fuzzy Systems and Knowledge Discovery*, 2016, pp. 2147–2152.
- Kagermann, H., Lukas, W., & Wahlster, W. (2011). *Industry 4.0: Mit dem Internet der Dinge auf dem Weg zur 4. Industriellen Revolution*. VDI nachrichten, Vol. 13, pp. 1090–1100.
- Kagermann, H., Wahlster, W., & Helbig, J. (2013). Recommendations for implementing the strategic initiative Industry 4.0. Final report of the industry 4.0 working group, http://www.acatech.de/fileadmin/user_upload/Baumstruktur_nach_Website/Acatech/root/de/Material_fuer_Sonderseiten/Industrie_4.0/Final_report__Industrie_4.0_accessible.pdf. Available on August 22, 2017.

- Kannan, K. Sumitha P.N., and Alaa Garad. 2020. "Competencies of Quality Professionals in the Era of Industry 4.0: A Case Study of Electronics Manufacturer from Malaysia." *International Journal of Quality & Reliability Management* 38 (3): 839–71. <https://doi.org/10.1108/ijqrm-04-2019-0124>.
- Karimi, A. "Course and Program Outcome Assessment Process." IMECE2005-81962, Proceedings of IMECE2005, Proceedings of ASME International Mechanical Engineering Congress and Exposition November 5-11, 2005, Orlando, Florida. & Karimi, A. 2005 "Lessons Learned in the Assessment of Course and Program Outcomes Processes," presented in session T3B2, 2005 Annual Meeting of the Gulf-Southwest Section of ASEE, Corpus Christi, Texas, March 23-25, 2005.
- Kay, R.H., LeSage, A., 2009. Examining the benefits and challenges of using audience response systems: a review of the literature. *Comput. Educ.* 53 (3), 819–827.
- Kayembe, C. and D Nel. 2019. "Challenges and Opportunities for Education in the Fourth Industrial Revolution" 11 (3).
- Kim, S.; Chen, J.; Cheng, T.; Gindulyte, A.; He, J.; He, S.; Li, Q.; Shoemaker, B. A.; Thiessen, P. A.; Yu, B.; Zaslavsky, L.; Zhang, J.; Bolton, E. E. PubChem 2019 update: improved access to chemical data. *Nucleic Acids Res.* 2019, 47, D1102–D1109.
- Klemeš, J.J., Varbanov, P.S., Walmsley, T.G., Jia, X., 2018. New directions in the implementation of Pinch Methodology (PM). *Renew. Sustain. Energy Rev.* 98, 439–468.
- Kowalska, M., Pazdzior, M., & Maziopa, A. (2018). Erratum to: Implementation of QFD method in quality analysis of confectionery products. *Journal of Intelligent Manufacturing*, 29, 449–450.
- Lantz, M.E., 2010. The use of 'clickers' in the classroom: teaching innovation or merely an amusing novelty? *Comput. Human Behav.* 26 (4), 556–561.
- Lasi, H., Fettek, P., Kemper, G., Feld, T., & Hoffmann, M. (2014). Industry 4.0: Bedarfssog und Technologiedruck als Treiber der vierten Industrillen Revolution. *The 'International Journal of Wirtschaftsinformatik*, 56, 261–264.
- Lasry, N., 2008. Clickers or flashcards: is there really a difference? *Phys. Teach.* 46 (4), 242–244.
- Latimer, K.; Dwaraknath, S.; Mathew, K.; Winston, D.; Persson, K. A. Evaluation of thermodynamic equations of state across chemistry and structure in the materials project. *npj Computat. Mater.* 2018, 4, 40.
- Layuan, L., & Chunlin, L. (2002). A multicast routing protocol supporting multiple QoS constraints. In 10th IEEE international conference on networks (Vol. 2). <https://doi.org/10.1109/icon.2002.1033285>.
- Lee, J., Lapira, E., Bagheri, B., & Kao, H. A. (2013). Recent advances and trends in predictive manufacturing systems in big data environment. *Manufacturing Letters*, 1(1), 38–41
- Leitao, P., Geraldes, C. A. S., Fernandes, F. P., & Badikyan, H. 2020. "Analysis of the Workforce Skills for the Factories of the Future." 2020 IEEE Conference on Industrial Cyberphysical Systems (ICPS) pp. 353-358.
- Li, Y.-H. Equation of state of water and sea water. *Journal of Geophysical Research* 1967, 72, 2665–2678. Dymond, J. H.; Malhotra, R. The Tait equation: 100 years on. *Int. J. Thermophys.* 1988, 9, 941–951.
- Licorish, S.A., Owen, H.E., Daniel, B., George, J.L., 2018. Students' perception of Kahoot!'s influence on teaching and learning. *Res. Pract. Technol. Enhanc. Learn.* 13 (1), 1–23.
- Linstrom, P. J. NIST Standard Reference Database 69. NIST Chemistry WebBook, 1997.
- Lucke, A. (2008). Manufacturing systems and technologies for the new frontier. In *The 41st CIRP conference on manufacturing systems, Tokyo, Japan (Vol 2, pp. 115–118)*.
- M. Castier, Mohamed M. Amer, XSEOS: An evolving tool for teaching chemical engineering thermodynamics, *Education for Chemical Engineers*, Volume 6, Issue 2, 2011, Pages e62-e70, ISSN 1749-7728, <https://doi.org/10.1016/j.ece.2010.12.002>.
- Mahaffy, P. G.; Brush, E. J.; Haack, J. A.; Ho, F. M. *Journal of Chemical Education Call for Papers Special Issue on Reimagining Chemistry Education: Systems Thinking, and Green and Sustainable Chemistry.* *J. Chem. Educ.* 2018, 95, 1689–1691.
- Maisiri, W., Darwish, H., & van Dyk, L. (2019). AN INVESTIGATION OF INDUSTRY 4.0 SKILLS REQUIREMENTS. *The South African Journal of Industrial Engineering*, 30(3), 90–105. <https://doi.org/10.7166/30-3-2230>

- Maresova, P., Soukal, I., Svobodova, L., Hedvicakova, M., Javanmardi, E., Selamat, A., & Krejcar, O. 2018. "Consequences of Industry 4.0 in Business and Economics." *Economies*, 6(3)
- Martín N. Gatti, Federico M. Perez, Juliana López van der Horst, Florencia Volpe Giangiordano, Francisco Pompeo, Towards the meaningful learning of thermodynamics: A proposal for teaching exergy. *Education for Chemical Engineers*, Volume 44, 2023, Pages 117-132, ISSN 1749-7728, <https://doi.org/10.1016/j.ece.2023.05.006>.
- Mavrikios, D., Georgoulas, K. and Chryssolouris, G. 2018. The teaching factory paradigm: Developments and outlook. *Procedia Manufacturing*, 23, pp. 1-6.
- Mayer, R.E., Stull, A., DeLeeuw, K., Almeroth, K., Bimber, B., Chun, D., Bulger, M., Campbell, J., Knight, A., Zhang, H., 2009. Clickers in college classrooms: fostering learning with questioning methods in large lecture classes. *Contemp. Educ. Psychol.* 34 (1), 51–57
- Mettes, C. T. C. W.; Pilot, A.; Roossink, H. J.; Kramers-Pals, H. Teaching and learning problem solving in science. *J. Chem. Educ.* 1980, 57, 882
- Mettes, C. T. C. W.; Pilot, A.; Roossink, H. J.; Kramers-Pals, H. Teaching and learning problem solving in science: Part II: Learning problem solving in a thermodynamics course. *J. Chem. Educ.* 1981, 58, 51.
- Mian, S. H., Salah, B., Ameen, W., Moiduddin, K., & Alkhalefah, H. 2020 "Adapting Universities for Sustainability Education in Industry 4.0: Channel of Challenges and Opportunities." *Sustainability*, 12(15), 6100.
- Mie, G. Zur kinetischen Theorie der einatomigen Körper. *Ann. Phys.* 1903, 316, 657–697. Grüneisen, E. Theorie des festen Zustandes einatomiger Elemente. *Ann. Phys.* 1912, 344, 257–306. Born, M. Über die elektrische Natur der Kohäsionskräfte fester Körper. *Ann. Phys.* 1920, 366, 87–106.
- Motyl, B., Baronio, G., Uberti, S., Speranza, D. & Filippi, S. 2017. How will change the future engineers?
- Murnaghan, F. D. The Compressibility of Media under Extreme Pressures. *Proc. Natl. Acad. Sci. U. S. A.* 1944, 30, 244–247.
- N. von Tunzelmann. *Struct. Chang. Econ. Dyn.* 14(4) (2003) 365–384.
- Nguyen, A. T. 2022. "Industry 4.0 competencies: a model for the Vietnamese workforce." *Industrial and Commercial Training*, 54(2), 201–219.
- Nyden, M. R.; Petersson, G. A. Complete basis set correlation energies. I. The asymptotic convergence of pair natural orbital expansions. *J. Chem. Phys.* 1981, 75, 1843–1862
- Ochterski, J. W. Thermochemistry in Gaussian. <https://gaussian.com/thermo/>
- Oke, Adekunle, and Fatima Araujo Pereira Fernandes. 2020. "Innovations in Teaching and Learning: Exploring the Perceptions of the Education Sector on the 4th Industrial Revolution (4IR)." *Journal of Open Innovation: Technology, Market, and Complexity* 6 (2): 31. <https://doi.org/10.3390/joitmc6020031>.
- Oztemel, E., Gursev, S. Literature review of Industry 4.0 and related technologies. *J Intell Manuf* 31, 127–182 (2020). <https://doi.org/10.1007/s10845-018-1433-8>
- P. Atkins, J. de Paula. *Physical Chemistry*, Oxford University Press and W. H. Freeman (2010)
- P. Atkins. *A Very Short Introduction: To the Laws of Thermodynamics*, Oxford University Press, Oxford (2010). Originally published as *Four Laws that Drive the Universe* (2008).
- Pack, D. C.; Evans, W. M.; James, H. J. The Propagation of Shock Waves in Steel and Lead. *Proceedings of the Physical Society* 1948, 60, 1–8.
- Papavasileiou, K. D.; Peristeras, L. D.; Bick, A.; Economou, I. G. Molecular Dynamics Simulation of Pure n-Alkanes and Their Mixtures at Elevated Temperatures Using Atomistic and Coarse Grained Force Fields. *J. Phys. Chem. B* 2019, 123, 6229–6243.
- Peter Atkins. Teaching thermodynamics: The challenge. *Pure Appl. Chem.*, Vol. 83, No. 6, pp. 1217–1220, 2011
- Petersson, G. A.; Bennett, A.; Tensfeldt, T. G.; Al-Laham, M. A.; Shirley, W. A.; Mantzaris, J. A complete basis set model chemistry. I. The total energies of closed-shell atoms and hydrides of the first-row elements. *J. Chem. Phys.* 1988, 89, 2193–2218.
- Piątkowski, M. J. 2020. "Expectations and Challenges in the Labour Market in the Context of Industrial Revolution 4.0. The Agglomeration Method-Based Analysis for Poland and Other EU Member States." *Sustainability*, 12(13), 5437.

- Podgórska, M. 2022. "Challenges and Perspectives in Innovative Projects Focused on Sustainable Industry 4.0— A Case Study on Polish Project Teams." *Sustainability*, 14(9).
- Poirier, J.-P.; Tarantola, A. A logarithmic equation of state. *Phys. Earth Planet. Inter.* 1998, 109, 1–8.
- Pollock E. B., Thompson J. R. and Mountcastle D. B., (2007), Student understanding of the physics and mathematics of process variables in P–V diagrams, *Proceedings of the 2007 physics education research conference of American Institute of Physics.*
- Porlán R., Rivero A., 1998. *Teachers' knowledge.* Diada Editorial, Sevilla, Spain.
- Prifti, L., Knigge, M., Kienegger, H. and Krcmar, H. 2017. A competency Model for "Industrie 4.0" Employees. In 13th International Conference on Wirtschaftsinformatik (WI). St. Gallen, Switzerland, pp.46-60
- R. Schmidt, M. Möhring, R.-C. Härting, C. Reichstein, P. Neumaier, and P. Jozinović, "Industry 4.0 - Potentials for Creating Smart Products: Empirical Research Results," in *International Conference on Business Information Systems*, 2015, pp. 16–27.
- Rodríguez, J.A. *Introduction to thermodynamics with some engineering applications*, 2003. Universidad Tecnológica Nacional, Buenos Aires, Argentina, 235–246.
- Saniuk, Sebastian, Sandra Grabowska, and Wieslaw Grebski. 2022. "Knowledge and Skills Development in the Context of the Fourth Industrial Revolution Technologies: Interviews of Experts from Pennsylvania State of the USA." *Energies* 15 (7): 2677. <https://doi.org/10.3390/en15072677>.
- Santos, Gilberto, Jose Carlos Sá, Maria João Félix, Luis Barreto, Filipe Carvalho, Manuel Doiro, Kristina Zgodavová, and Miladin Stefanović. 2021. "New Needed Quality Management Skills for Quality Managers 4.0." *Sustainability* 13 (11): 6149. <https://doi.org/10.3390/su13116149>.
- Sanz-Pérez, E., 2019. Students' performance and perceptions on continuous assessment. *Redefining a chemical engineering subject in the European highereducation area.* *Educ. Chem. Eng.* 28, 13–24.
- Schallock, B., Rybski, C., Jochem, R. and Kohl, H. 2018. Learning factory for Industry 4.0 to provide future skills beyond technical training. *Procedia Manufacturing*, 23, pp. 27-32.
- Schultz, D.; Duffield, S.; Rasmussen, S. C.; Wageman, J. Effects of the Flipped Classroom Model on Student Performance for Advanced Placement High School Chemistry Students. *J. Chem. Educ.* 2014, 91, 1334–1339
- Schwab, Klaus. 2017. "The Fourth Industrial Revolution: What It Means, How to Respond." *World Economic Forum*. 2017.
- Sergio Caserta, Giovanna Tomaiuolo, Stefano Guido, Use of a smartphone-based Student Response System in large active-learning Chemical Engineering Thermodynamics classrooms, *Education for Chemical Engineers*, Volume 36, 2021, Pages 46-52, ISSN 1749-7728, <https://doi.org/10.1016/j.ece.2021.02.003>.
- Skilton, M. and Hovsepian, F., 2018. *The 4th Industrial Revolution.* Springer Nature
- Smith, J.M., van Ness, H.C., Abbott, M.M., 2005. *Introduction to Chemical Engineering Thermodynamics*, 7th ed. McGraw-Hill, New York.
- Sun, C. (2012). Application of RFID technology for logistics on internet of things. *Procedia Computer Science*, 1, 106–111.
- Tan, E., Small, A., Lewis, P., 2020. Have a question? Just ask it: using an anonymous mobile discussion platform for student engagement and peer interaction to support large group teaching. *Res. Learn. Technol.*, 28.
- Teng, Weili, Chenwei Ma, Saeed Pahlevansharif, and Jason James Turner. 2019. "Graduate Readiness for the Employment Market of the 4th Industrial Revolution." *Education + Training* 61 (5): 590–604. <https://doi.org/10.1108/et-07-2018-0154>.
- Thaenkaew, Suporn, Jirasak Achariyayos, Virulh Hutavadhana, and Kanokwan Ruangsiri. 2021. "An Integrated Learning of Communication and Presentation for Industrial Work through Seminar for Special Project Preparation Using Phenomenon-Based Learning Approach." 2021 6th International STEM Education Conference (ISTEM-Ed), November. <https://doi.org/10.1109/istem-ed52129.2021.9625120>.
- Thompson J. R., Bucy B. R. and Mountcastle D. B., (2006), Assessing student understanding of partial derivatives in thermodynamics, *Proceedings of the 2005 Physics Education Research Conference of the American Institute of Physics.*

- Vinet, P.; Smith, J. R.; Ferrante, J.; Rose, J. H. Temperature effects on the universal equation of state of solids. *Phys. Rev. B: Condens. Matter Mater. Phys.* 1987, 35, 1945–1953. Vinet, P.; Ferrante, J.; Rose, J. H.; Smith, J. R. Compressibility of solids. *J. Geophys. Res.* 1987, 92, 9319.
- Vrchota, J., Maříková, M., Řehoř, P., Rolínek, L., & Toušek, R. 2019. “Human Resources Readiness for Industry 4.0.” *Journal of Open Innovation: Technology, Market, and Complexity*, 6(1), 3.
- Wang, A.I., 2015. The wear out effect of a game-based student response system. *Comput. Educ.* 82, 217–227
- Wang, A.I., Tahir, R., 2020. The effect of using Kahoot! for learning—A literature review. *Comput. Educ.* 149, 103818.
- White, M., Dorman, S.M., 2001. Receiving social support online: implications for health education. *Health Educ. Res.* 16 (6), 693–707.
- Wichmann, R.L., Eisenbart, B., Gericke, K. (2019) ‘The Direction of Industry: A Literature Review on Industry 4.0’, in *Proceedings of the 22nd International Conference on Engineering Design (ICED19)*, Delft, The Netherlands, 5-8 August 2019. DOI:10.1017/dsi.2019.219
- Wilson, J.H. and Daugherty, P.R. 2018. Collaborative Intelligence: Humans and AI are joining forces. *Harvard Business review*, Brighton, Issue Number: July-August, pp. 114-123.
- Wong, K.W.W., Barford, J.P., 2010. Teaching Excel VBA as a problem solving tool for chemical engineering core courses. *Educ. Chem. Eng.* 5, e72–e77.
- World Economic Forum. 2016. *The future of jobs: Employment, skills and workforce strategy for the fourth industrial revolution*. Global Challenge Insight Report, World Economic Forum, Geneva.
- Wu, B., Wang, A.I., Børresen, E.A., Tidemann, K.A., 2011. Improvement of a Lecture Game Concept-Implementing Lecture Quiz 2.0. *CSEDU*, pp. 26–35, 2.
- Zoller, U. The fostering of question-asking capability: A meaningful aspect of problem-solving in chemistry. *J. Chem. Educ.* 1987, 64, 510.