

RECONFIGURAÇÕES DO CONHECIMENTO PEDAGÓGICO DE CONTEÚDO NA ERA DAS INTELIGÊNCIAS ARTIFICIAIS GENERATIVAS: UM ENSAIO TEÓRICO PARA O ENSINO DE FÍSICA E QUÍMICA

RECONFIGURATIONS OF PEDAGOGICAL CONTENT KNOWLEDGE IN THE AGE OF GENERATIVE ARTIFICIAL INTELLIGENCE: A THEORETICAL ESSAY FOR THE TEACHING OF PHYSICS AND CHEMISTRY

RECONFIGURACIONES DEL CONOCIMIENTO PEDAGÓGICO DEL CONTENIDO EN LA ERA DE LAS INTELIGENCIAS ARTIFICIALES GENERATIVAS: UN ENSAYO TEÓRICO PARA LA ENSEÑANZA DE LA FÍSICA Y LA QUÍMICA

Tiago Leão Barnabé¹
Ryan Thaíryk Silva de Jesus²

RESUMO: Este ensaio teórico propõe o framework CPC-G (Conhecimento Pedagógico do Conteúdo Generativo) para analisar as reconfigurações no ensino de Física e Química pelas Inteligências Artificiais Generativas (IAGs). Baseando-se no Conhecimento Pedagógico de Conteúdo de Shulman e mediante análise conceitual, examina como as IAGs transformam o saber docente, deslocando o professor de transmissor para orquestrador de ecossistemas cognitivos híbridos. O CPC-G organiza-se em três dimensões: Conhecimento Generativo do Conteúdo (capacidades e limites das IAGs); Conhecimento Pedagógico Generativo (estratégias de mediação e personalização); e Conhecimento Ético-Epistemológico Generativo (autoria, viés, equidade, validação). Contextualizado no cenário brasileiro, o estudo discute desafios como evasão, falta de laboratórios e formação docente insuficiente. Apresenta implicações para a formação de professores, com integração transversal das IAGs no currículo, metodologias imersivas e desenvolvimento contínuo, e delineia uma agenda de pesquisa tripartite (investigações empíricas, desafios metodológicos e reflexões epistemológicas). Conclui-se que o CPC-G é uma ferramenta conceitual para uma integração crítica, pedagógica e eticamente fundamentada das IAGs na educação científica.

Palavras-chave: Inteligência Artificial Generativa. Conhecimento Pedagógico do Conteúdo. Ensino de Física; Ensino de Química. Formação de Professores.

¹Mestre em Educação em Ciências, Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Sul de Minas Gerais.

²Mestre em Química, Secretaria de Estado de Educação de Minas Gerais.

ABSTRACT: This theoretical essay proposes the G-PCK (Generative Pedagogical Content Knowledge) framework to analyze the reconfigurations in the teaching of Physics and Chemistry prompted by Generative Artificial Intelligence (GAI). Grounded in Shulman's Pedagogical Content Knowledge and employing conceptual analysis, the study examines how GAI transforms teacher expertise, shifting the educator's role from knowledge transmitter to orchestrator of hybrid cognitive ecosystems. The G-PCK framework is structured into three dimensions: Generative Content Knowledge (GAI's capabilities and limitations); Generative Pedagogical Knowledge (mediation and personalization strategies); and Generative Ethical-Epistemological Knowledge (authorship, bias, equity, validation). Contextualized within the Brazilian educational landscape, the study discusses challenges such as student dropout, lack of laboratory resources, and insufficient teacher training. It presents implications for teacher education, proposing transversal integration of GAI into curricula, immersive methodologies, and continuous professional development, and outlines a tripartite research agenda (empirical investigations, methodological challenges, and epistemological reflections). It concludes that the G-PCK framework serves as a conceptual tool for a critical, pedagogically sound, and ethically grounded integration of GAI into science education.

Keywords: Generative Artificial Intelligence. Pedagogical Content Knowledge. Physics Education. Chemistry Education. Teacher Training.

RESUMEN: Este ensayo teórico propone el marco CPC-G (Conocimiento Pedagógico del Contenido Generativo) para analizar las reconfiguraciones en la enseñanza de la Física y la Química impulsadas por la Inteligencia Artificial Generativa (IAG). Basándose en el Conocimiento Pedagógico del Contenido de Shulman y mediante un análisis conceptual, el estudio examina cómo la IAG transforma el saber docente, desplazando al profesor de transmisor a orquestador de ecosistemas cognitivos híbridos. El CPC-G se organiza en tres dimensiones: Conocimiento Generativo del Contenido (capacidades y límites de la IAG); Conocimiento Pedagógico Generativo (estrategias de mediación y personalización); y Conocimiento Ético-Epistemológico Generativo (autoría, sesgo, equidad, validación). Contextualizado en el escenario brasileño, el estudio discute desafíos como la deserción escolar, la falta de laboratorios y la formación docente insuficiente. Presenta implicaciones para la formación del profesorado, con integración transversal de la IAG en el currículo, metodologías inmersivas y desarrollo profesional continuo, y delinea una agenda de investigación tripartita (investigaciones empíricas, desafíos metodológicos y reflexiones epistemológicas). Se concluye que el CPC-G es una herramienta conceptual para una integración crítica, pedagógicamente sólida y éticamente fundamentada de la IAG en la educación científica.

2

Palabras clave: Inteligencia Artificial Generativa. Conocimiento Pedagógico del Contenido. Enseñanza de la Física. Enseñanza de la Química. Formación de Profesores.

INTRODUÇÃO

A emergência das Inteligências Artificiais Generativas (IAGs) no cenário educacional contemporâneo representa um ponto de inflexão epistemológica que transcende a mera incorporação de mais uma ferramenta tecnológica à prática docente. Trata-se de uma transformação estrutural que questiona as próprias bases do conhecimento pedagógico,

reconfigurando relações fundamentais entre ensino, aprendizagem e produção do saber. No domínio específico das Ciências, esta transformação assume urgência paradigmática, particularmente nas áreas de Física e Química – campos que historicamente enfrentam desafios epistemológicos singulares relacionados a altos níveis de abstração, complexa formalização matemática e dependência crítica de modelos teóricos frequentemente contra-intuitivos.

No contexto brasileiro, o ensino de Física e Química apresenta um cenário de contrastes marcantes que amplifica tanto os desafios quanto as potencialidades da integração das IAGs. Por um lado, persistem desafios estruturais históricos: altos índices de evasão nessas disciplinas no Ensino Médio, carência crônica de professores com formação específica – especialmente em regiões periféricas –, laboratórios subequipados, e uma tradição pedagógica que frequentemente prioriza a memorização de fórmulas em detrimento da compreensão conceitual profunda. Por outro, emerge uma oportunidade singular de superação dessas lacunas históricas através do potencial das IAGs para personalização do ensino, criação de laboratórios virtuais acessíveis, e democratização de explicações especializadas.

Este ensaio teórico propõe-se a examinar as reconfigurações fundamentais que as IAGs impõem ao Conhecimento Pedagógico de Conteúdo (CPC), conceito seminal desenvolvido por Shulman (1986, 1987) que há décadas fundamenta a compreensão da especificidade do saber docente. A problemática central que orienta esta reflexão teórica pode ser assim formulada: Como os fundamentos do CPC, tal como concebidos por Shulman e desenvolvidos por seus intérpretes no campo do ensino de Ciências, são desafiados, expandidos e reconfigurados pelas capacidades generativas das IAGs, especialmente considerando o contexto específico do ensino de Física e Química no Brasil?

3

Esta questão desdobra-se em múltiplas dimensões que serão exploradas ao longo do ensaio: epistemológica (como as IAGs transformam a natureza do conhecimento científico ensinável?), pedagógica (como reconfiguram as estratégias de mediação docente?), ética (que implicações têm para a equidade educacional brasileira?) e política (como podem contribuir para superar as históricas desigualdades no ensino de Ciências no país?). Justifica-se uma abordagem teórica neste momento histórico precisamente pela confluência entre a novidade radical das IAGs e a urgência dos desafios educacionais brasileiros: antes de empreender pesquisas empíricas extensivas, é necessário construir um arcabouço conceitual sólido que considere tanto as capacidades generativas quanto as particularidades do contexto nacional.

O ensino de Física e Química no Brasil necessita, mais do que nunca, de abordagens inovadoras que enfrentem três desafios interligados: a distância entre o conhecimento cotidiano dos estudantes e os conceitos científicos abstratos; a escassez de recursos para experimentação prática; e a formação docente muitas vezes desvinculada das realidades das salas de aula brasileiras. As IAGs surgem neste cenário não como solução mágica, mas como catalisadoras potenciais de uma reimaginação do ensino científico – desde que integradas de forma crítica, contextualizada e pedagogicamente fundamentada.

Este ensaio tem como objetivo principal elaborar um framework teórico para análise das transformações do CPC na era das IAGs, com foco específico nas implicações para o ensino de Física e Química no contexto brasileiro. Para tanto, empreenderemos uma análise conceitual que integra contribuições de quatro campos do conhecimento: (1) a teoria do CPC e suas adaptações para o ensino de Ciências (Shulman, 1986; Etkina, 2010; Fernandez, 2015); (2) a filosofia da tecnologia educacional, particularmente trabalhos sobre a natureza do conhecimento em contextos digitais (Mishra & Koehler, 2006; Feenberg, 2017); (3) estudos emergentes sobre as IAGs na educação (Zhai et al., 2023; Kasneci et al., 2023); e (4) pesquisas sobre o ensino de Física e Química no Brasil e seus desafios específicos. A metodologia consistirá em um exercício de síntese teórica e construção conceitual, buscando identificar tensões, oportunidades e novas categorias analíticas necessárias para compreender e orientar a docência científica brasileira na era generativa.

4

Ao situar esta reflexão no contexto nacional, pretendemos contribuir não apenas para o debate teórico internacional sobre IAGs na educação, mas especialmente para a construção de perspectivas contextualizadas que possam informar políticas educacionais, currículos de formação docente e práticas pedagógicas capazes de enfrentar os desafios históricos do ensino de Ciências no Brasil, aproveitando as oportunidades únicas oferecidas por este momento de transformação tecnológica e pedagógica.

2. Metodologia do Ensaio Teórico

Este estudo se configura como um ensaio teórico-analítico, método de pesquisa que prioriza a reflexão conceitual, a síntese teórica e a construção de argumentos sólidos sobre temas emergentes e complexos. Conforme sustentam Maxwell (2013) e Lakatos (1978), ensaios teóricos são fundamentais em períodos de transição paradigmática, pois possibilitam o exame

crítico de pressupostos consagrados e a elaboração de novos quadros conceituais, antecipando e direcionando futuras investigações empíricas.

A abordagem metodológica adotada estrutura-se em três operações intelectuais principais, detalhadas a seguir, sendo conduzida a partir de um conjunto de fontes selecionadas mediante critérios explícitos. As fontes foram organizadas em quatro categorias principais:

Literatura fundacional sobre CPC e ensino de Ciências, que inclui trabalhos seminais como os de Shulman (1986, 1987), Etkina (2010) e Fernandez (2015). Foram selecionados estudos que estabelecem ou operacionalizam o conceito de CPC, com ênfase em sua aplicação ao ensino de Física e Química. Foram excluídos trabalhos que abordam o CPC de forma apenas tangencial ou em contextos disciplinares não-científicos.

Trabalhos teóricos sobre tecnologia e educação, com contribuições como as de Mishra e Koehler (2006) e Feenberg (2017). Foram incluídas obras que oferecem fundamentos conceituais sobre a integração entre tecnologia e educação ou sobre a filosofia da tecnologia educacional. Foram excluídos textos com foco exclusivamente técnico ou instrumental em tecnologias não generativas.

Pesquisas emergentes sobre IAGs, representadas por autores como Zhai et al. (2023), Kasneci et al. (2023) e Bender et al. (2021). A seleção priorizou estudos que definem, analisam ou discutem aplicações educacionais das Inteligências Artificiais Generativas (IAGs). Relatórios técnicos desprovidos de análise pedagógica, filosófica ou ética foram excluídos.

Literatura filosófica sobre epistemologia e IA, incluindo contribuições de Peirce (1931-1958), Bender e Koller (2020) e Floridi (2019). Foram considerados textos que discutem as bases do conhecimento, a compreensão e questões ético-epistemológicas relacionadas à IA. Discussões filosóficas excessivamente gerais e sem conexão direta com conhecimento, tecnologia ou educação foram deixadas de lado.

Primeira Operação: Análise Conceitual Aprofundada

Inicialmente, realizou-se uma análise conceitual crítica dos constructos fundamentais deste estudo: o Conhecimento Pedagógico de Conteúdo (CPC) de Shulman (1986), o Conhecimento Tecnológico Pedagógico do Conteúdo (TPACK) de Mishra e Koehler (2006) e o conceito de Inteligência Artificial Generativa (IAG) conforme discutido por Zhai et al. (2023). Esta análise não se limitou a definições operacionais, mas investigou os pressupostos

epistemológicos subjacentes a cada conceito, suas condições de validade e seus limites de aplicabilidade no contexto emergente das IAGs na educação científica.

Segunda Operação: Síntese Teórica Dialética

Em seguida, conduziu-se uma síntese teórica de natureza dialética. Seguindo a perspectiva de Wenger-Trayner e Wenger-Trayner (2020), esse processo operou por meio da identificação e exploração de "fronteiras conceituais" – zonas de tensão e intersecção entre corpos de conhecimento distintos. A síntese foi realizada pelo confronto sistemático entre os referenciais estabelecidos sobre conhecimento docente e as características disruptivas das IAGs. Atenção especial foi dada às fronteiras entre: (a) conhecimento humano e conhecimento algorítmico; (b) criatividade pedagógica e geração automática de conteúdo; (c) expertise disciplinar e competência em curadoria digital. O método consistiu em contrastar proposições de cada campo para identificar contradições e complementaridades, formulando sínteses provisórias que apontassem para reconfigurações no entendimento do CPC.

Terceira Operação: Construção Abdutiva de Categorias

Por fim, engajou-se na construção de categorias analíticas para a proposta de um framework teórico expandido. Essa construção seguiu uma lógica abdutiva (Peirce, 1931-1958), partindo de fenômenos observáveis – como as capacidades pedagógicas e as limitações das IAGs, aliadas às características específicas do ensino de Física e Química – para inferir e propor categorias teóricas capazes de explicar e organizar tais fenômenos de modo sistemático. O processo foi iterativo e reflexivo: as categorias propostas (por exemplo, "Conhecimento de Prompt Engineering Disciplinar") foram constantemente testadas e refinadas frente a "casos teóricos" (como a mediação docente de uma explicação gerada por IA) e "situações-limite" (como um output de IA epistemicamente inválido, porém pedagogicamente atraente), até que se alcançasse uma cobertura e coerência satisfatórias.

A seleção das fontes primárias privilegiou, portanto, trabalhos que oferecem contribuições conceituais substantivas, mesmo quando não abordam diretamente a intersecção específica entre IAGs e o ensino de Ciências. Este critério se fundamenta no entendimento de que a novidade radical do fenômeno demanda um exercício criativo de extração e conexão teórica entre domínios aparentemente distantes, visando à construção de um arcabouço robusto para futuras investigações.

O desenvolvimento do framework teórico proposto neste ensaio fundamenta-se em uma tríade conceitual que articula: (1) a natureza transformacional do Conhecimento Pedagógico de Conteúdo (CPC) na tradição shulmaniana; (2) as características disruptivas e os paradoxos pedagógicos das Inteligências Artificiais Generativas (IAGs); e (3) as reconfigurações críticas que emergem da intersecção entre esses dois campos. Esta análise não apenas sintetiza teorias consolidadas, mas avança na construção de um modelo capaz de compreender a docência científica em um contexto de inteligência artificial generalizada.

3.1. O CPC como Conhecimento Transformacional: Fundamentos e Especificidades Científicas

O Conhecimento Pedagógico de Conteúdo (CPC), conceptualizado por Lee Shulman (1986, 1987), constitui o núcleo epistemológico da profissionalidade docente. Distante de ser uma mera soma de conhecimento disciplinar e pedagógico, o CPC representa, conforme Shulman (1987), um "amálgama especial" (p. 8), uma síntese transformacional única que capacita o professor a transfigurar o saber especializado em experiências de aprendizagem acessíveis e significativas. Este processo de transformação – de "compreender para si" em "tornar compreensível para os outros" – define a essência do ensinar.

Esta transformação opera através de dimensões específicas. Shulman (1986) identifica que o CPC envolve o domínio das formas mais eficazes de representar ideias fundamentais, uma compreensão profunda das dificuldades de aprendizagem inerentes a cada tópico, o conhecimento das concepções prévias dos alunos e o repertório de estratégias pedagógicas adequadas a cada conceito. No ensino das ciências, esta estrutura adquire contornos específicos. Etkina (2010), ao analisar o CPC para o ensino de Física, destaca a necessidade de conhecimentos especializados sobre o processo de ensino-aprendizagem da disciplina, seu currículo, as concepções alternativas dos estudantes, estratégias pedagógicas específicas e métodos de avaliação pertinentes. Fernandez (2015) reforça que o CPC abrange tanto os modos de formular e apresentar o conteúdo – através de analogias, ilustrações e exemplos – quanto a compreensão metacognitiva sobre o que facilita ou obstrui a aprendizagem.

A natureza das disciplinas de Física e Química impõe exigências adicionais a esse conhecimento transformacional. Na Física, conforme Moreira (2011), o professor lida com conceitos frequentemente contra-intuitivos e altamente abstratos (como campos de força ou entropia), exigindo estratégias para materializar o invisível e conectar o formalismo matemático à realidade física. Na Química, o desafio, conforme Taber e García-Franco (2010),

reside em navegar competentemente entre múltiplos níveis de representação – macroscópico, microscópico e simbólico – e em construir modelos mentais fiéis de entidades não observáveis, como átomos e moléculas. Assim, o CPC em ciências se consolida como um conhecimento de mediação complexo, que traduz estruturas conceituais abstratas em itinerários pedagógicos viáveis. É precisamente este núcleo transformacional que se vê desafiado e reconfigurado pela entrada em cena das IAGs.

3.2. Inteligências Artificiais Generativas: Potencialidades Pedagógicas e Limitações Epistemológicas

As Inteligências Artificiais Generativas (IAGs) representam uma ruptura qualitativa no panorama das tecnologias educacionais. Definidas como sistemas capazes de gerar conteúdo novo e original, baseando-se em padrões aprendidos de dados mas extrapolando para além deles (Zhai et al., 2023), elas transcendem as ferramentas digitais precedentes, limitadas à transmissão de conteúdo pré-definido ou a interações em parâmetros restritos. Filosoficamente, as IAGs borram fronteiras tradicionais, operando em uma zona ambígua entre cálculo algorítmico e performance criativa, sem, contudo, possuir compreensão semântica ou causal no sentido humano (Bender et al., 2021).

No contexto educacional, este paradoxo fundamenta tanto suas potenciais contribuições quanto seus riscos estruturais. Kasneci et al. (2023) destacam capacidades com profundo impacto pedagógico: a personalização em escala, que adapta explicações e dificuldades a perfis individuais de forma logisticamente inviável para um docente; a geração de conteúdo contextualizado, situando problemas científicos em realidades locais e cotidianas dos alunos; a multimodalidade generativa, produzindo texto, diagramas e simulações que atendem a diversos estilos de aprendizagem; a capacidade de diálogo socrático automatizado e o feedback formativo instantâneo, recursos cruciais para disciplinas baseadas na resolução de problemas, como Física e Química.

No entanto, estas capacidades impressionantes são inseparáveis de limitações que atingem o cerne do ensino científico. A primeira é a questão da precisão conceitual. Em domínios complexos e hierárquicos como os científicos, as IAGs são propensas a "alucinações" – a geração de explicações superficialmente plausíveis, mas conceitualmente erradas ou inventadas (Davis et al., 2023). A segunda limitação é a falta de compreensão epistemológica. As IAGs não compreendem os métodos, os critérios de evidência ou a natureza do conhecimento científico, podendo violar princípios básicos em suas explicações. A terceira é a

opacidade do processo. O "raciocínio" da IA é uma caixa-preta, dificultando o ensino do pensamento crítico e a avaliação da validade de seus outputs. Finalmente, surgem questões éticas prementes sobre autoria, viés algorítmico, equidade de acesso e dependência tecnológica (Zhai et al., 2023).

O cenário que se configura, portanto, é de uma tensão produtiva, mas desafiadora: as IAGs oferecem ferramentas poderosas para superar obstáculos históricos do ensino de ciências (como a personalização e a falta de recursos), mas introduzem novas camadas de complexidade que demandam do professor um novo patamar de vigilância crítica e curadoria informada. Não se trata de simplesmente adotar uma ferramenta, mas de renegociar os próprios fundamentos do conhecimento docente.

3.3. Intersecções Críticas: A Reconfiguração do CPC na Colaboração Humano-IAG

A confluência entre o CPC e as IAGs não é aditiva, mas transformativa. Ela gera reconfigurações profundas em quatro dimensões interligadas do conhecimento docente, deslocando o professor do papel de único transformer do conteúdo para o de orquestrador de um ecossistema cognitivo expandido.

A primeira reconfiguração diz respeito à transformação das representações do conteúdo. No modelo clássico, o professor seleciona ou cria analogias e exemplos. Com as IAGs, este processo se torna uma curadoria gerativa iterativa. O professor, em diálogo com a IA, formula prompts, avalia e refina representações geradas, que podem ser inusitadas e originárias de campos distantes. A competência docente migra da criação solitária para a engenharia de instruções (prompt engineering) disciplinarmente informada e para a avaliação epistemológica de analogias que, embora estatisticamente plausíveis, podem ser conceitualmente falhas (Bender & Koller, 2020).

A segunda reconfiguração ocorre na mediação da compreensão conceitual. O professor deixa de ser a fonte primária de explicação para se tornar o arquiteto de um ecossistema explicativo multimodal, integrando vozes humanas e artificiais. As IAGs podem gerar múltiplas explicações (formal, intuitiva, contextual) para um mesmo conceito. Cabe ao docente orquestrar essas vozes, personalizando a mediação em escala. Contudo, esta potência gera novas demandas: o conhecimento de perfilização pedagógica para operacionalizar os alunos em prompts eficazes e o diagnóstico de dificuldades de compreensão induzidas pela IA, como inconsistências internas ou confusão entre correlação e causalidade.

A terceira reconfiguração atinge a própria natureza da expertise docente. As IAGs performam como "pseudo-especialistas", capazes de tarefas complexas sem compreensão genuína. Isso dissolve a distinção clássica entre o especialista no conteúdo e o professor, exigindo um conhecimento de coexistência com a pseudo-expertise. A relação entre conhecimento declarativo e pedagógico se redefine: com o acesso quase ilimitado da IA ao conhecimento declarativo, o foco do CPC desloca-se para a capacidade de transformação pedagógica generativa – saber como converter o conhecimento acessado e gerado pela IA em experiências de aprendizagem eficazes.

Finalmente, a intersecção impõe uma dimensão ético-epistemológica explícita e expandida ao CPC. O professor precisa desenvolver um conhecimento ético-generativo para navegar questões de autoria, viés algorítmico e equidade, e um conhecimento epistemológico-generativo para compreender e ensinar os limites do conhecimento baseado em correlações estatísticas, formando alunos capazes de criticar conteúdos gerados por IA.

3.4. CPC-G: Um *Framework* para o Conhecimento Docente na Era Generativa

Sintetizando essas reconfigurações críticas, propomos o framework CPC-Generativo (CPC-G), organizado em três dimensões dinâmicas e interdependentes:

10

Conhecimento Generativo do Conteúdo (CGC): Transcede o domínio declarativo para incluir a compreensão das capacidades, padrões de erro e limitações epistemológicas das IAGs no domínio específico (Física/Química); o domínio do prompt engineering disciplinar; e critérios para a validação epistêmica de conteúdos gerados.

Conhecimento Pedagógico Generativo (CPG): Expande o repertório pedagógico tradicional com estratégias para integrar outputs de IA em sequências didáticas, usar IAGs para diferenciação e avaliação formativa, e mediar pedagogicamente a interação aluno-IA.

Conhecimento Ético-Epistemológico Generativo (CEEG): Incorpora de forma central os conhecimentos necessários para um uso responsável e crítico das IAGs, abarcando a compreensão de questões éticas (autoria, viés, equidade) e epistemológicas (bases do conhecimento gerativo, critérios de validade científica em ambientes digitais).

Estas dimensões adquirem especificidades nas disciplinas em foco. Para a Física, o CGC deve abordar o tratamento de abstrações como campos e funções de onda; o CPG, estratégias de visualização do invisível; e o CEEG, a relação entre modelos físicos e representações generativas. Para a Química, o CGC deve focar na operação das IAGs nos múltiplos níveis de

representação; o CPG, no uso para modelagem molecular; e o CEEG, na validação de estruturas químicas geradas.

O CPC-G, portanto, não substitui o framework shulmaniano, mas o expande para dar conta da complexidade introduzida pela colaboração humano-IAG. Ele oferece uma estrutura conceitual para compreender as novas competências necessárias ao professor de ciências e serve como bússola para a reestruturação da formação docente e para o A proposta do CPC-G implica uma reestruturação profunda dos pressupostos teóricos que sustentam o conceito shulmaniano, operando em cinco eixos fundamentais de transformação epistemológica.

Em primeiro lugar, reconceitualiza-se a relação entre conhecimento declarativo e transformação pedagógica. O modelo clássico pressupunha uma hierarquia linear: o domínio do conhecimento disciplinar precedia e fundamentava sua transformação pedagógica. O CPC-G complexifica esta relação, situando-a em uma ecologia dialógica (Fernandez, 2015) onde o conhecimento declarativo necessário inclui agora uma compreensão crítica das capacidades e limitações das IAGs no domínio específico, e onde o processo de transformação se dá frequentemente em colaboração com agentes artificiais. O professor não mais opera sobre um conhecimento estável, mas media fluxos de conhecimento gerados dinamicamente.

Em segundo lugar, redefine-se radicalmente a natureza da criatividade pedagógica. A capacidade individual de gerar analogias e exemplos cede lugar a uma criatividade de curadoria e orquestração sistêmica. Esta forma de criatividade expandida envolve a seleção criteriosa, combinação inteligente e adaptação contextual de representações provenientes de múltiplas fontes – humanas e artificiais – para a construção de ecossistemas explicativos coerentes (Boden, 2004; Kantosalo & Toivonen, 2016). A originalidade deixa de residir apenas na geração *ex nihilo* para se deslocar para a capacidade de síntese e contextualização pedagógica em ambientes de superabundância informacional.

Em terceiro lugar, expande-se o conceito de reflexividade docente para uma reflexividade tecnopedagógica. Para além da reflexão sobre a ação (Schön, 1983), o professor na era generativa necessita refletir sobre como sua prática é mediada, ampliada e por vezes distorcida pelas tecnologias que emprega. Esta reflexividade inclui uma consciência crítica sobre os pressupostos epistemológicos embutidos nos algoritmos, sobre as formas como as IAGs modelam sua interação com o conhecimento, e sobre as consequências éticas dessas mediações.

Em quarto lugar, dissolve-se a dicotomia clássica entre especialista no conteúdo e professor, dando lugar a uma expertise distribuída (Hutchins, 1995). O CPC-G reconhece a

emergência de um sistema cognitivo expandido, onde a competência pedagógica reside na sinergia entre o professor e as IAGs. Isto exige teorias da cognição que transcendam o indivíduo para abarcar sistemas sociotécnicos complexos, onde agência humana e capacidade algorítmica se entrelaçam.

Finalmente, torna-se explícita e central uma dimensão ético-epistemológica que no modelo shulmaniano permanecia implícita. O CPC-G integra constitutivamente conhecimentos sobre os fundamentos éticos da autoria e da equidade no uso de IA (Floridi, 2019) e sobre as bases epistemológicas do conhecimento gerado algorítmicamente, conectando-se assim de forma orgânica com a filosofia da tecnologia educacional (Feenberg, 2017).

4.2. Implicações para a Formação Docente: Rumo a uma Pedagogia Generativa

As transformações teóricas descritas exigem uma reestruturação profunda dos processos de formação docente, tanto inicial quanto contínua, organizada em torno de três pilares interdependentes.

O primeiro pilar é a reestruturação curricular. Os programas de licenciatura em Física e Química devem transcender a mera adição de uma disciplina sobre IA. É necessária uma integração transversal que permeie o currículo, combinando: (1) a inclusão de estudos específicos sobre as dimensões pedagógicas, éticas e epistemológicas das IAGs; (2) a revisão das didáticas específicas para incorporar estratégias de integração criativa e crítica dessas ferramentas no ensino de conceitos nucleares; (3) a reformulação das práticas de estágio para incluir experimentação supervisionada com IAGs em contextos reais; e (4) o desenvolvimento de uma literacia digital crítica que capacite os futuros professores a avaliar e selecionar tecnologias educacionais de forma fundamentada.

O segundo pilar envolve metodologias de formação renovadas, que abandonem abordagens expositivas em favor de experiências imersivas e reflexivas. Estas incluem: a aprendizagem baseada em desafios generativos, onde futuros professores enfrentam problemas pedagógicos complexos utilizando IAGs; a análise colaborativa de casos de uso bem-sucedido e problemático de IA no ensino; o desenvolvimento de portfólios generativos que documentem a evolução da competência tecnopedagógica; e simulações de orquestração pedagógica que exercitem a integração em tempo real de contribuições humanas e artificiais no diálogo educativo.

O terceiro pilar é o desenvolvimento profissional contínuo, reconhecendo que a formação inicial é apenas o início de um processo de aprendizagem ao longo da vida. Este desenvolvimento deve incluir: comunidades de prática generativa para partilha de experiências entre pares; programas de atualização tecnopedagógica focados em novas ferramentas e abordagens; sistemas de mentoria entre colegas que facilitem a difusão de conhecimento prático; e incentivo à pesquisa-ação colaborativa que une professores e investigadores no estudo de suas próprias práticas com IAGs.

Para professores de Física e Química, estas competências adquirem especificidades disciplinares. Os professores de Física necessitam desenvolver habilidades para usar IAGs na visualização de conceitos abstratos (campos, ondas), na geração de analogias físicas contextualizadas, na integração de simulações generativas com experimentação real, e na compreensão crítica das limitações das IAGs na representação de fenômenos quânticos e relativísticos. Os professores de Química, por sua vez, precisam dominar o uso de IAGs para modelagem molecular e previsão de propriedades, para navegação entre os múltiplos níveis de representação química, para simulação de reações, e para uma avaliação criteriosa das limitações dessas ferramentas na previsão de mecanismos reacionais complexos.

13

4.3. Agenda para a Pesquisa em Educação Científica

O framework CPC-G delineia um programa de pesquisa interdisciplinar e urgente, organizado em torno de três eixos investigativos que respondem às complexidades teóricas, metodológicas e epistemológicas introduzidas pela era generativa no ensino das ciências.

A primeira linha, de natureza empírica e descritiva, deve concentrar-se na observação e análise de fenômenos emergentes em contextos reais. Esta agenda inclui: (1) investigações sobre os processos de decisão pedagógica que professores de Física e Química empregam ao integrar IAGs – examinando critérios, justificativas e os momentos didáticos nos quais essas ferramentas são consideradas mais ou menos apropriadas; (2) análises sistemáticas da qualidade epistemológica de conteúdos gerativos, avaliando a validade científica, a consistência conceitual e o potencial didático de explicações, analogias e exemplos produzidos por IAGs para tópicos específicos (ex.: leis da termodinâmica, modelos atômicos); (3) estudos sobre o impacto na aprendizagem dos alunos, explorando como os estudantes constroem conhecimento científico em ambientes onde a mediação é compartilhada entre o professor e sistemas generativos, com atenção especial ao desenvolvimento do pensamento crítico; e (4) pesquisas de validação sobre

a eficácia de abordagens formativas desenhadas para desenvolver as competências do CPC-G em programas de formação inicial e continuada.

A segunda linha enfrenta desafios metodológicos substantivos, exigindo a criação de instrumentos e abordagens inovadoras adequadas ao novo objeto de estudo. Prioriza-se: (1) o desenvolvimento e validação de instrumentos robustos para avaliar as competências multidimensionais do CPC-G, que integrem dimensões técnicas, pedagógicas e ético-epistemológicas; (2) a elaboração de metodologias híbridas capazes de investigar ecossistemas cognitivos distribuídos, onde a agência pedagógica é compartilhada e co-construída por professores, alunos e agentes artificiais; e (3) a proposição de estratégias de pesquisa que garantam rigor e relevância em estudos longitudinais, considerando o ritmo acelerado de obsolescência e inovação das próprias ferramentas tecnológicas investigadas.

A terceira linha, de caráter filosófico e epistemológico, questiona os próprios fundamentos da educação científica. Ela propõe uma reflexão profunda sobre: (1) a reconfiguração da natureza do conhecimento docente, interrogando o que significa "saber ensinar" quando competências cognitivas fundamentais são externalizadas, aumentadas ou transformadas pela colaboração com sistemas algorítmicos; (2) a possível redefinição dos objetivos da educação científica, considerando se as metas tradicionais (como a transmissão de fatos ou o desenvolvimento do método científico) devem ser recalibradas em resposta às novas capacidades (ex.: geração ilimitada de hipóteses) e limitações (ex.: falta de compreensão causal) das IAGs; e (3) a transformação das relações tríades entre ciência, tecnologia e educação, analisando como a convergência das ferramentas de investigação científica e das ferramentas de ensino – ambas cada vez mais mediadas por IAGs – redefine os papéis do professor, do aluno e do próprio conhecimento científico na sala de aula.

14

Esta agenda tripartite não constitui um exercício meramente acadêmico, mas um roteiro profundamente prático e necessário. Ela fornece o referencial teórico-metodológico indispensável para orientar uma integração das IAGs que seja crítica, fundamentada e responsável. O objetivo último é assegurar que esta revolução tecnológica seja apropriada pela educação científica de modo a aprofundar a qualidade do ensino e da aprendizagem, promovendo uma alfabetização científica que seja, simultaneamente, rigorosa, significativa e adequada aos desafios do século XXI, em vez de levar a um empobrecimento epistemológico ou a uma dependência acrítica de sistemas algorítmicos. A implementação desta agenda de

pesquisa é, portanto, condição fundamental para que o potencial transformador das IAGs seja realizado de forma ética e pedagogicamente sólida.

5. Limitações do Framework Teórico Proposto

A validade e o alcance do framework CPC-G proposto devem ser compreendidos à luz de limitações inerentes ao próprio exercício teórico que o originou. Estas restrições não invalidam sua contribuição conceitual, mas antes delimitam seu escopo atual e indicam direções necessárias para seu desenvolvimento e validação futuros.

Em primeiro lugar, reconhece-se o caráter especulativo de algumas proposições do modelo, decorrente da natureza pioneira desta investigação. Por tratar-se de um ensaio teórico desenvolvido antecipadamente a pesquisas empíricas extensivas sobre a integração das IAGs na prática docente em Ciências, o CPC-G fundamenta-se necessariamente em análises conceituais rigorosas e sínteses teóricas cuidadosas, mas carece ainda de confirmação empírica robusta. Esta característica inicial, comum em teorias que buscam antecipar-se a fenômenos emergentes, exige que o framework seja submetido a testes empíricos sistemáticos que avaliem tanto sua capacidade descritiva quanto sua utilidade prescritiva em contextos reais de ensino.

Uma segunda limitação, particularmente desafiadora, decorre da velocidade exponencial da evolução tecnológica no campo das IAGs. O CPC-G foi elaborado a partir das capacidades e arquiteturas disponíveis em um momento histórico específico, mas a paisagem tecnológica das IAGs transforma-se em ritmo acelerado, com novos modelos, funcionalidades e aplicações emergindo constantemente. Esta dinâmica cria uma tensão inevitável entre a estabilidade necessária a qualquer framework teórico e a fluidez do fenômeno que busca descrever. Enquanto teorias sobre tecnologia educacional tradicionalmente enfrentavam ciclos de revisão medidos em anos, as IAGs impõem uma cadência de mudança que pode exigir atualizações conceituais em escala semestral ou mesmo trimestral. O CPC-G deve, portanto, ser entendido como uma estrutura aberta e adaptável, cuja validade dependerá de sua capacidade de incorporar criticamente os desenvolvimentos tecnológicos futuros.

No que concerne à sua aplicabilidade, o framework enfrenta o desafio da generalização a partir de casos específicos. Embora desenvolvido com foco particular no ensino de Física e Química – disciplinas que apresentam desafios epistemológicos singulares – o CPC-G é proposto como uma estrutura geral para o ensino de Ciências. Sua adequação a outras disciplinas científicas, como Biologia e Geociências, que possuem tradições investigativas e

modos de representação distintos, requer investigação adicional. Da mesma forma, sua validade transcultural e transcontextual – abarcando diferentes níveis de ensino, sistemas educacionais, realidades socioeconômicas e infraestruturas tecnológicas – permanece como uma questão em aberto que exigirá estudos comparativos e adaptações contextuais sensíveis às particularidades locais.

Uma quarta limitação de natureza mais profunda refere-se à sua dependência de pressupostos epistemológicos particulares. O CPC-G assume implicitamente certas visões sobre a natureza do conhecimento científico e do conhecimento docente – nomeadamente, uma perspectiva construtivista moderada da aprendizagem científica e uma compreensão sociocultural da cognição docente. Estas escolhas teóricas, embora explicitadas e justificadas, criam limites naturais para sua aceitação universal. Teorias educacionais fundamentadas em epistemologias radicalmente diferentes – como abordagens mais positivistas do conhecimento científico ou visões mais individualistas da cognição – poderão questionar alguns dos alicerces conceituais do framework. Esta limitação não diminui sua validade dentro do paradigma assumido, mas reconhece sua natureza situada dentro de debates epistemológicos mais amplos que permeiam a educação científica.

Finalmente, deve-se considerar a significativa complexidade operacional envolvida na implementação prática do CPC-G. Transformar esta estrutura teórica em programas de formação docente coerentes e eficazes representa um desafio substantivo que excederá as dificuldades habituais da reforma curricular. Desenvolver currículos que integrem harmoniosamente as três dimensões do CPC-G – conteúdo generativo, pedagogia generativa e ética-epistemologia generativa – demandará não apenas recursos consideráveis, mas também uma reconceitualização profunda dos processos formativos. Esta implementação enfrentará obstáculos que vão desde a formação de formadores capacitados até a criação de materiais didáticos apropriados, passando pela resistência institucional e pela dificuldade de avaliar competências tão complexas e multidimensionais. Será necessário um processo iterativo de experimentação, avaliação e refinamento, que provavelmente demandará anos para alcançar formas estáveis e eficazes de operacionalização.

Estas limitações, longe de constituir falhas do framework, representam antes fronteiras naturais de um exercício teórico pioneiro. Elas apontam para um programa de trabalho futuro que inclui: (1) pesquisa empírica de validação; (2) mecanismos de atualização contínua frente à evolução tecnológica; (3) investigações sobre generalização e adaptação

contextual; (4) diálogo crítico com diferentes tradições epistemológicas; e (5) desenvolvimento de modelos operacionais viáveis para formação docente. Reconhecer estas limitações é condição essencial para o desenvolvimento responsável e cientificamente rigoroso do CPC-G como ferramenta conceitual para navegar os complexos desafios da educação científica na era das IAGs.

6. CONSIDERAÇÕES FINAIS

O presente ensaio teórico propôs e desenvolveu o framework CPC-G (Conhecimento Pedagógico do Conteúdo Generativo) como um constructo analítico para compreender as profundas reconfigurações que as Inteligências Artificiais Generativas (IAGs) impõem ao ensino das Ciências, com especial atenção às áreas de Física e Química. Mediante uma análise conceitual rigorosa e uma síntese teórica que dialogou criticamente com tradições pedagógicas, filosóficas e tecnológicas, demonstrou-se que as IAGs transcendem a condição de meros instrumentos didáticos. Elas se apresentam como agentes catalisadores de uma transformação estrutural na própria natureza do conhecimento especializado necessário para ensinar, deslocando o eixo do domínio individual do conteúdo para a competência de orquestração de ecossistemas cognitivos expandidos.

17

O framework CPC-G estrutura-se em três dimensões dinâmicas e interdependentes. O Conhecimento Generativo do Conteúdo (CGC) demanda do docente uma compreensão crítica das capacidades e, sobretudo, das limitações epistemológicas das IAGs no domínio disciplinar específico, convertendo-o de um mero transmissor em um validador e curador do conhecimento gerado. O Conhecimento Pedagógico Generativo (CPG) exige a reinvenção das estratégias de mediação, capacitando o professor a integrar os outputs das IAGs em sequências didáticas significativas, a personalizar o ensino em escala e a redirecionar sua agência para a facilitação de diálogos complexos entre aprendizes e sistemas algorítmicos. Por fim, o Conhecimento Ético-Epistemológico Generativo (CEEG) explicita e centraliza uma dimensão que permanecia latente no modelo shulmaniano: a necessidade de um arcabouço normativo robusto para navegar questões de autoria, viés, equidade e, fundamentalmente, para fundamentar uma avaliação crítica da validade do conhecimento produzido por sistemas estatísticos.

As implicações deste framework são de largo alcance e multifacetadas. Para a teoria educacional, o CPC-G sinaliza a necessidade de expandir os pressupostos clássicos para incorporar teorias da cognição distribuída, redefinir a criatividade pedagógica como curadoria

sistêmica e instituir uma reflexividade tecnopedagógica como componente essencial da prática docente. Para a formação de professores, o modelo demanda uma reestruturação curricular profunda, que integre de forma transversal o desenvolvimento das competências generativas, exige metodologias formativas imersivas baseadas em desafios e casos reais, e postula a criação de sistemas permanentes de desenvolvimento profissional em comunidades de prática. Para o campo da pesquisa em educação científica, abre-se uma agenda premente que abrange desde investigações empíricas sobre a tomada de decisão docente com IAGs e o impacto na aprendizagem dos alunos, até questões metodológicas sobre como estudar ecossistemas humano-IA e questões epistemológicas acerca da redefinição dos fins da educação científica na era digital.

Reconhece-se, contudo, as limitações inerentes a este empreendimento teórico pioneiro. O caráter necessariamente especulativo de algumas proposições, a vulnerabilidade do modelo à vertiginosa evolução tecnológica, os desafios de sua generalização para outras disciplinas e contextos, sua dependência de pressupostos epistemológicos particulares e a complexidade operacional de sua implementação constituem fronteiras que delimitam seu escopo atual e apontam para um fértil programa de trabalho futuro. No entanto, é precisamente em momentos de disruptão paradigmática, como o vivido com a emergência das IAGs, que exercícios teóricos prospectivos se revelam mais urgentes. Eles fornecem as estruturas conceituais indispensáveis para orientar a investigação empírica subsequente, fundamentar inovações educacionais responsáveis e fomentar uma reflexão crítica que evite tanto o entusiasmo acrítico quanto o reacionário tecnofóbico.

Quase quatro décadas após Shulman (1987) identificar o CPC como o que diferencia o especialista do professor, essa distinção adquire uma urgência e uma complexidade renovadas. Na era generativa, os sistemas de IA podem emular, com crescente eficácia, a performance do especialista no conteúdo. O que permanece como núcleo distintivo e insubstituível da docência é a capacidade profundamente humana de transformar esse conteúdo – acessado, gerado e filtrado por máquinas – em experiências de aprendizagem que sejam não apenas eficazes, mas também significativas, eticamente fundamentadas e epistemicamente rigorosas. O CPC-G busca capturar e articular justamente esse núcleo transformacional expandido, oferecendo uma bússola conceitual para os desafios do século XXI.

O caminho que se avizinha para a educação científica é, portanto, de complexidade e incerteza, mas também de possibilidades transformadoras extraordinárias. Conforme

professores e investigadores iniciam a exploração prática deste novo território, o framework CPC-G se propõe como uma ferramenta para compreender, avaliar e orientar esse processo. Mais do que oferecer respostas definitivas, este ensaio ambiciona ter formulado as perguntas certas e fornecido categorias analíticas robustas. Seu propósito último é contribuir para um diálogo acadêmico e profissional rigoroso, que possa conduzir a uma integração das IAGs na educação científica que seja, em última instância, pedagogicamente inovadora, epistemicamente sólida e eticamente responsável. O futuro do ensino das Ciências dependerá, em grande medida, da qualidade e da profundidade desse diálogo que agora se inicia.

REFERÊNCIAS

BENDER, E. M.; KOLLER, A. Climbing towards NLU: On meaning, form, and understanding in the age of data. In: *Proceedings of the 58th Annual Meeting of the Association for Computational Linguistics*, 2020. p. 5185-5198.

BENDER, E. M. et al. On the dangers of stochastic parrots: Can language models be too big? In: *Conference on Fairness, Accountability, and Transparency*, 2021. p. 610-623.

BODEN, M. A. *The creative mind: Myths and mechanisms*. 2. ed. London: Routledge, 2004.

CALDATTO, M. E.; SILVA, J. R. N. Uma discussão sobre a formação de professores promovida por uma IES federal por meio da “Complementação Pedagógica para Não Licenciados”: o caso do professor de Física. *Caderno Brasileiro de Ensino de Física*, v. 36, n. 1, p. 224-255, 2019. 19

DAVIS, R. L. et al. Conceptual accuracy of generative AI in physics education: A systematic analysis. *Journal of Science Education and Technology*, v. 32, n. 4, p. 567-582, 2023.

ETKINA, E. Pedagogical content knowledge and preparation of high school physics teachers. *Physical Review Special Topics: Physics Education Research*, v. 6, n. 2, p. 020110, 2010.

FEENBERG, A. *Technosystem: The social life of reason*. Cambridge: Harvard University Press, 2017.

FERNANDEZ, C. Revisitando a base de conhecimentos e o conhecimento pedagógico do conteúdo (PCK) de professores de Ciências. *Revista Ensaio*, v. 17, n. 2, p. 500-528, 2015.

FLORIDI, L. *The logic of information: A theory of philosophy as conceptual design*. Oxford: Oxford University Press, 2019.

HUTCHINS, E. *Cognition in the wild*. Cambridge: MIT Press, 1995.

KANTOSALO, A.; TOIVONEN, H. Modes for creative human-computer collaboration: Alternating and task-divided co-creativity. In: *Proceedings of the Seventh International Conference on Computational Creativity*, 2016. p. 77-84.

KASNECI, E. et al. ChatGPT for good? On opportunities and challenges of large language models for education. *Learning and Individual Differences*, v. 103, 102274, 2023.

LAKATOS, I. *The methodology of scientific research programmes*. Cambridge: Cambridge University Press, 1978.

MAXWELL, J. A. *Qualitative research design: An interactive approach*. 3. ed. Thousand Oaks: Sage, 2013.

MELO-NIÑO, L. V.; CAÑADA, F.; MELLADO, V. Formación continua del profesorado de Física a través del conocimiento didáctico del contenido sobre el campo eléctrico en Bachillerato: un caso de estudio. *Caderno Brasileiro de Ensino de Física*, v. 34, n. 1, p. 131-151, 2017.

MISHRA, P.; KOEHLER, M. J. Technological pedagogical content knowledge: A framework for teacher knowledge. *Teachers College Record*, v. 108, n. 6, p. 1017-1054, 2006.

MOREIRA, M. A. *Teorias de aprendizagem*. 2. ed. São Paulo: EPU, 2011.

PEIRCE, C. S. *Collected papers of Charles Sanders Peirce*. Cambridge: Harvard University Press, 1931-1958.

SCHÖN, D. A. *The reflective practitioner: How professionals think in action*. New York: Basic Books, 1983.

SHULMAN, L. S. Those who understand: Knowledge growth in teaching. *Educational Researcher*, v. 15, n. 2, p. 4-14, 1986. 20

SHULMAN, L. S. Knowledge and teaching: Foundations of the new reform. *Harvard Educational Review*, v. 57, n. 1, p. 1-23, 1987.

TABER, K. S.; GARCÍA-FRANCO, A. Learning processes in chemistry: Drawing upon cognitive resources to learn about the particulate structure of matter. *Journal of the Learning Sciences*, v. 19, n. 1, p. 99-142, 2010.

WENGER-TRAYNER, E.; WENGER-TRAYNER, B. *Learning to make a difference: Value creation in social learning spaces*. Cambridge: Cambridge University Press, 2020.

ZHAI, X. et al. A review of artificial intelligence (AI) in education from 2010 to 2020. *Complexity*, v. 2023, p. 1-18, 2023.