

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
FACULDADE DE FILOSOFIA, CIÊNCIAS E LETRAS DE RIBEIRÃO PRETO
DEPARTAMENTO DE QUÍMICA

ANDERSON OLIVEIRA DOS SANTOS

**Identificação e análise das relações entre os diferentes níveis de
representação do conhecimento químico em simuladores virtuais**

RIBEIRÃO PRETO

2026

ANDERSON OLIVEIRA DOS SANTOS

**Identificação e análise das relações entre os diferentes níveis de
representação do conhecimento químico em simuladores virtuais**

Dissertação apresentada ao Programa de
Mestrado Profissional em Química em Rede
Nacional (PROFQUI) da Universidade de São
Paulo DQ/FFCLRP/USP como requisitos para
obtenção do título de Mestre em Química.

Área de Concentração: Ensino de
Química

Orientador: Prof. Dr. Mauricio dos Santos
Matos

RIBEIRÃO PRETO

2026

Autorizo a reprodução e divulgação total ou parcial deste trabalho, por qualquer meio convencional ou eletrônico, para fins de estudo e pesquisa, desde que citada a fonte.

Catalogação na publicação Biblioteca

Santos, Anderson Oliveira

Identificação e análise das relações entre os diferentes níveis de representação do conhecimento químico em simuladores virtuais / Anderson Oliveira dos Santos; orientador: Prof. Dr. Mauricio dos Santos Matos. Ribeirão Preto: FFCLRP, 2026.

230 p. : il. ; 30 cm

Dissertação (mestrado em Ensino de Química) - Programa de Mestrado Profissional em Química em Rede Nacional, Faculdade de Filosofia, Ciências e Letras de Ribeirão Preto, Universidade de São Paulo, Ribeirão Preto, 2026.

1. Simuladores Virtuais. 2. Níveis de Representação. 3. Tecnologias Digitais Educacionais. I. Matos, Mauricio dos Santos, orient. II. Identificação e análise das relações entre os diferentes níveis de representação do conhecimento químico em simuladores virtuais.

CCD

“A vida não é fácil para nenhum de nós. Mas e daí? Devemos ter perseverança e, acima de tudo, confiança em nós mesmos. Devemos acreditar que somos dotados para algo e que esse algo, custe o que custar, deve ser alcançado.”

(Marie Curie)

AGRADECIMENTOS

A Deus, por ter sido minha força e sustento, concedendo proteção, sabedoria e amparo ao longo de toda esta trajetória.

À minha mãe, Nilzete, por todo amor, cuidado e apoio incondicional. Obrigado por nunca desistir de mim e por sempre acreditar nos meus sonhos.

Ao meu pai, Jefferson, por toda educação, incentivo e presença ao longo da minha caminhada.

À minha vó Madalena (in memoriam), por todo amor, cuidado e ensinamentos que marcaram profundamente minha infância e minha formação humana. Sua presença permanece viva em minha memória e em minha trajetória.

À minha amiga Brenda, por compartilhar comigo a trajetória do mestrado, as viagens aos sábados, os desafios e os aprendizados vivenciados ao longo dessa caminhada. Obrigado pelo apoio, parceria e incentivo constantes durante todo esse processo.

À minha amiga Mari, por toda amizade, apoio, cuidado e incentivo ao longo desta trajetória. Sua presença nos momentos difíceis tornou o caminho mais leve e significativo.

À professora Fabiana, pelo incentivo constante, acolhimento e apoio durante minha trajetória profissional.

Ao professor Renan, pelo apoio e parceria no incentivo e conselhos para desenvolvimento desse trabalho.

Ao Prof. Dr. Maurício dos Santos Matos, pela orientação, pelos ensinamentos e pelas contribuições fundamentais para o desenvolvimento desta pesquisa.

Aos professores do Programa de Pós-Graduação, pelos conhecimentos compartilhados e contribuições para minha formação acadêmica e profissional.

À Universidade de São Paulo (USP) e ao Programa de Mestrado Profissional em Química em Rede Nacional (PROFQUI), pela oportunidade de realização deste mestrado.

Por fim, agradeço a todos que, de alguma forma, contribuíram para minha trajetória pessoal, profissional e acadêmica até aqui.

RESUMO

SANTOS, A. O. Identificação e análise das relações entre os diferentes níveis de representação do conhecimento químico em simuladores virtuais. 2026. 230 p. Dissertação (Mestrado Profissional em Química em Rede Nacional) – Faculdade de Filosofia, Ciências e Letras de Ribeirão Preto, Universidade de São Paulo, Ribeirão Preto, 2026.

Esta dissertação investiga como três simulações do conjunto Balanceamento de Equações Químicas, da plataforma PhET, organizam e articulam representações do conhecimento químico em ambiente digital interativo. O corpus audiovisual compreende SVQ-A/Intro (00:10:45,146), SVQ-B/Equações (00:25:26,125) e SVQ-C/Jogo (00:16:53,360 relativo), com áudio interno do simulador e sem fala do usuário. A pesquisa qualitativa, documental e analítica aplica a Arquitetura Imagético-Contextual e sete dimensões: Multiplicidade Representacional, Variedade de Formas Representacionais Intranível, Correspondência Conceitual, Dinâmica Representacional, Relação Temporal, Modulação Representacional e Potencial Interativo-Representacional. A inspeção direta colapsou cliques repetidos que produziram a mesma resposta e consolidou cinco categorias funcionais em A, sete em B e dez em C; os timecodes foram usados somente como localizadores. Os resultados mostram um núcleo simbólico-submicroscópico comum, no qual coeficientes, partículas, balanças, barras e indicadores tornam observáveis conservação e proporcionalidade. Intro organiza exploração; Equações amplia o repertório e distingue balanceamento de simplificação; Jogo transforma a menor razão em requisito de progressão. Em A e B, o som atua sobretudo como confirmação temporal inespecífica de operações; em C, combina-se com feedbacks diferenciados de erro, acerto, pontuação e encerramento. Não foi identificada sonificação de variáveis químicas. O potencial didático-representacional depende de mediação e de tarefas que articulem formas e exijam justificativas; não se inferem aprendizagem, motivação ou eficácia.

Palavras-chave: Simuladores virtuais; Multirrepresentação; Balanceamento de equações químicas; Multimodalidade; Feedback sonoro.

ABSTRACT

SANTOS, A. O. Identification and Analysis of the Relationships Among Different Levels of Representation of Chemical Knowledge in Virtual Simulations. 2026. 230 p. Dissertation (Professional Master's Degree in Chemistry) – Faculdade de Filosofia, Ciências e Letras de Ribeirão Preto, Universidade de São Paulo, Ribeirão Preto, 2026.

This dissertation investigates how three simulations from PhET's Balancing Chemical Equations set organize and articulate representations of chemical knowledge in an interactive digital environment. The audiovisual corpus comprises SVQ-A/Intro (00:10:45.146), SVQ-B/Equations (00:25:26.125), and SVQ-C/Game (00:16:53.360 relative time), with simulator-generated audio and no user speech. This qualitative, documentary, and analytical study applies the Image-Contextual Architecture and seven dimensions: Representational Multiplicity, Variety of Intra-level Representational Forms, Conceptual Correspondence, Representational Dynamics, Temporal Relation, Representational Modulation, and Interactive-Representational Potential. Direct inspection collapsed repeated clicks that produced the same response and consolidated five functional categories in A, seven in B, and ten in C; timecodes were used only as locators. Results show a shared symbolic–submicroscopic core in which coefficients, particles, balances, bar charts, and indicators make conservation and proportionality observable. Intro organizes exploration; Equations expands the repertoire and distinguishes balancing from simplification; Game turns the smallest whole-number ratio into a progression requirement. In A and B, sound mainly provides temporally synchronized but semantically nonspecific operation acknowledgement; in C, this role is combined with differentiated feedback for error, success, scoring, and completion. No sonification of chemical variables was identified. The didactic-representational potential depends on mediation and tasks that connect forms and demand explanations; no claims about learning, motivation, or effectiveness are made.

Keywords: Virtual simulations; Multiple representations; Balancing chemical equations; Multimodality; Auditory feedback.

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 – Delimitação das três simulações funcionais que compõem o corpus da pesquisa	86
Quadro 2 – Classificação das unidades de registro.....	96
Quadro 3 – Componentes de caracterização do eixo contextual preliminar AIC	101
Quadro 4 – Definição operacional das categorias	104
Quadro 5 – Fundamentação e estatuto das dimensões primárias.....	117
Quadro 6 – Síntese operacional das sete dimensões analíticas primárias do modelo de representação do conhecimento químico em simuladores virtuais de Química.....	120
Quadro 7 – Quadro de evidências audiovisuais funcionais	123
Quadro 8 – Questões decisórias para identificação de correspondência explícita entre a evidência observada e o objeto central da categoria	126
Quadro 9 – Matriz de síntese transversal reunindo as evidências consideradas mais relevantes para a construção da CRD e do PDR	136
Quadro 10 – Contribuições das dimensões primárias para a construção do Potencial Didático-Representacional (PDR).....	141
Quadro 11 – Diferenças entre o Potencial Interativo-Representacional (PIR) e Potencial Didático-Representacional (PDR).....	144
Quadro 12 – Critérios considerados para atribuição dos diferentes graus de sustentação para explicitar a relação entre evidência e interpretação	147
Quadro 13 – Tipologia das relações entre níveis e formas representacionais no conjunto temático	196
Quadro 14 – Categorias de ação/evento e funções sonoras por caso	198
Quadro 15 – Atendimento dos objetivos e limites da inferência	203
Quadro 16 – Síntese da codificação sonora do SVQ-A.....	213
Quadro 17 – Síntese da codificação sonora do SVQ-B.....	214
Quadro 18 – Síntese da codificação sonora do SVQ-C.....	215
Quadro 19 – Código de interpretação dos eventos audiovisuais.....	216
Quadro 20 – Matriz categorial completa da função sonora.....	217
Quadro 21 – Responsabilidades da ferramenta e do pesquisador	222
Quadro 22 – Inventário mínimo de entrada e controle técnico	223

Quadro 23 – Fases, produtos provisórios e portas de validação	224
Quadro 24 – Campos obrigatórios da matriz de eventos audiovisuais	225
Quadro 25 – Categorias funcionais provisórias para descrição do som.....	226
Quadro 26 – Critérios de seleção, descarte e documentação de frames	227
Quadro 27 – Regra decisória para produtos de sistematização	228
Quadro 28 – Lista de verificação para validação pelo pesquisador	229

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Primeiro modelo para representação dos níveis de conhecimento químico.....	56
Figura 2 – Modelo de Johnstone para os níveis de representação	58
Figura 3 – Figura esquemática do modelo analítico de representação do conhecimento químico em simuladores virtuais de Química.....	119
Figura 4 – Interface inicial e delimitação funcional do SVQ-A/Intro	152
Figura 5 – Controle audiovisual de um ajuste de coeficiente no SVQ-A.....	153
Figura 6 – Arquitetura do SVQ-A e menu de formas de visualização	154
Figura 7 – Coocorrência da equação simbólica e do modelo de partículas no SVQ-A	155
Figura 8 – Balanças por elemento como forma quantitativa intranível no SVQ-A.....	156
Figura 9 – Correspondência entre coeficientes, partículas e estado balanceado no SVQ-A	157
Figura 10 – Atualização coordenada de coeficiente e representações no SVQ-A.....	158
Figura 11 – Sincronia entre ação, impulso sonoro e feedback visual no SVQ-A	159
Figura 12 – Modulação do SVQ-A pela alternância entre partículas e barras	160
Figura 13 – Mudança de reação e construção de estado no espaço interativo do SVQ-A	161
Figura 14 – Recorrência da gramática de interação em reações distintas do SVQ-A	162
Figura 15 – Configuração representacional dominante do SVQ-A	163
Figura 16 – Feedback global positivo e potencial didático-representacional do SVQ-A	164
Figura 17 – Síntese categorial audiovisual do SVQ-A/Intro	165
Figura 18 – Interface inicial e delimitação funcional do SVQ-B/Equações ...	166
Figura 19 – Controle audiovisual de uma seleção no SVQ-B	167
Figura 20 – Arquitetura ampliada do módulo Equações no SVQ-B	168

Figura 21 – Equação e balanças como representações coordenadas no SVQ-B	169
Figura 22 – Gráficos de barras como forma quantitativa intranível no SVQ-B	170
Figura 23 – Correspondência entre balanceamento e simplificação no SVQ-B	171
Figura 24 – Atualização coordenada de um estado representacional no SVQ-B	172
Figura 25 – Relação temporal entre ajustes sucessivos e resposta visual no SVQ-B	173
Figura 26 – Modulação representacional pelo seletor “Ver” no SVQ-B	174
Figura 27 – Seleção de equação e construção de estados no SVQ-B	175
Figura 28 – Recorrência da gramática representacional em classes do SVQ-B	176
Figura 29 – Configuração representacional dominante do SVQ-B	177
Figura 30 – Feedback de balanceamento e simplificação no SVQ-B	178
Figura 31 – Síntese categorial audiovisual do SVQ-B/Equações	179
Figura 32 – Tela de escolha de nível e delimitação funcional do SVQ-C/Jogo	180
Figura 33 – Controle audiovisual da entrada no nível 1 do SVQ-C	181
Figura 34 – Arquitetura da rodada antes da conferência no SVQ-C	182
Figura 35 – Equação e partículas na construção de uma resposta do SVQ-C	183
Figura 36 – Variedade modal no feedback de erro do SVQ-C	184
Figura 37 – Correspondência conceitual e feedback de acerto no SVQ-C	185
Figura 38 – Transformação da tentativa em estado avaliativo no SVQ-C	186
Figura 39 – Sincronia entre submissão e feedback de erro no SVQ-C	187
Figura 40 – Modulação da rodada para a tela de pontuação no SVQ-C	188
Figura 41 – Seleção de nível e entrada no espaço interativo do SVQ-C	189
Figura 42 – Recorrência da gramática de jogo em níveis distintos do SVQ-C	190
Figura 43 – Configuração representacional dominante do SVQ-C/Jogo	191
Figura 44 – Feedback audiovisual de acerto e recompensa no SVQ-C	192
Figura 45 – Síntese categorial audiovisual do SVQ-C/Jogo	193

Figura 46 – Delimitação comparativa dos três casos funcionais	194
Figura 47 – Arquiteturas e especializações dos módulos Intro, Equações e Jogo	194
Figura 48 – Níveis e formas representacionais mobilizados no conjunto	195
Figura 49 – Correspondências conceituais e tratamento da proporção mínima	197
Figura 50 – Regimes de transformação e feedback audiovisual nos três casos	198
Figura 51 – Possibilidades de exploração, seleção e progressão no conjunto	199
Figura 52 – Convergências, divergências e complementaridades funcionais	200
Figura 53 – Configuração representacional integrada do conjunto temático	201
Figura 54 – Potencial didático-representacional articulado entre os três módulos	202
Figura 55 – Diálogo entre feedback do corpus e literatura audiovisual recente	202
Figura 56 – Síntese intercasos e resposta à questão de pesquisa.....	203

SUMÁRIO

1 CONTEXTUALIZAÇÃO DA PESQUISA A PARTIR DA MINHA TRAJETÓRIA PESSOAL E PROFISSIONAL	18
2 INTRODUÇÃO	22
2.1 Uma revisão bibliográfica narrativa sobre a temática dos simuladores virtuais e a sua apropriação pela literatura científica	22
2.2 Justificativa	46
2.3 Problematização	50
2.4 Objetivo geral e objetivos específicos	53
3 REFERENCIAL TEÓRICO	55
3.1 Os níveis de representação do conhecimento químico e suas implicações para o ensino de Química	55
3.2 Múltiplas representações, multimodalidade e ambientes digitais interativos	69
4 METODOLOGIA	81
4.1 Natureza e abordagem da pesquisa	83
4.2 Constituição e delimitação do corpus	85
4.3 Exploração audiovisual-funcional, corpus audiovisual e organização do material analítico	87
4.4 Unidades de contexto e classificação das unidades de registro	90
4.5 Eixo contextual preliminar: Arquitetura Imagético-Contextual (AIC)	97
4.6 Dimensões primárias do modelo analítico	102
4.7 Procedimentos de codificação e análise	120
4.8 Construção das sínteses transversais	134
5 RESULTADOS E DISCUSSÕES	151
5.1 Análise individual das três simulações funcionais do corpus	151
5.2 Síntese integradora do conjunto temático Balanceamento de Equações Químicas ...	193
6 CONCLUSÃO	204
REFERÊNCIAS	208
APÊNDICES	213
APÊNDICE A — PROTOCOLO E SÍNTESE DA CODIFICAÇÃO DO SVQ-A	213
APÊNDICE B — PROTOCOLO E SÍNTESE DA CODIFICAÇÃO DO SVQ-B	214
APÊNDICE C — PROTOCOLO E SÍNTESE DA CODIFICAÇÃO DO SVQ-C	215
APÊNDICE D — CÓDIGO DE INTERPRETAÇÃO AUDIOVISUAL INTERCASOS	216

APÊNDICE E — MATRIZ CONSOLIDADA DE CATEGORIAS DE AÇÃO/EVENTO E FUNÇÃO SONORA.....	217
APÊNDICE F — PROTOCOLO MESTRE DE ANÁLISE PRELIMINAR DE VÍDEOS DE SIMULADORES VIRTUAIS E SISTEMATIZAÇÃO DE EVIDÊNCIAS.....	221
ANEXOS.....	233
ANEXO A — SIMULADOR “BALANCEAMENTO DE EQUAÇÕES QUÍMICAS” DO PHET	233

1 CONTEXTUALIZAÇÃO DA PESQUISA A PARTIR DA MINHA TRAJETÓRIA PESSOAL E PROFISSIONAL

Este capítulo tem como objetivo contextualizar a pesquisa desenvolvida a partir da trajetória pessoal, acadêmica e profissional do autor desta dissertação de mestrado, evidenciando os caminhos, experiências e vivências que contribuíram para a constituição deste trabalho. Mais do que apresentar acontecimentos de forma cronológica, busca-se construir uma narrativa que situe a pesquisa em um percurso humano e formativo, marcado por experiências que contribuíram para a constituição do percurso formativo e profissional do pesquisador, favorecendo a aproximação com questões relacionadas ao Ensino de Química e às possibilidades de investigação envolvendo tecnologias digitais educacionais.

A elaboração desta dissertação não ocorreu de maneira isolada ou desvinculada da minha trajetória de vida. Ao contrário, foi sendo construída ao longo de diferentes experiências, desde a infância e a formação escolar até a formação técnica, acadêmica e profissional, incluindo minha atuação docente e as vivências acumuladas ao longo desse percurso. Dessa forma, compreender os caminhos que conduziram à elaboração desta pesquisa significa também compreender as motivações, inquietações e sentidos atribuídos ao estudo desenvolvido.

Revisitar a própria trajetória implica retomar caminhos atravessados por descobertas, desafios, questionamentos e processos de reconstrução. Mais do que recuperar acontecimentos do passado, essa reflexão possibilita compreender os movimentos formativos que constituíram minha identidade humana, acadêmica e profissional e que, de diferentes maneiras, influenciaram minha forma de compreender a educação e o ensino de Química.

Desde os primeiros anos de minha formação, compreendi que o conhecimento poderia representar possibilidades e caminhos que, muitas vezes, pareciam distantes da realidade em que estava inserido. A educação deixou de ocupar apenas um espaço institucional e passou a representar um lugar de pertencimento, transformação e construção de autonomia. Oriundo da escola pública e integrante de uma família de origem humilde, cresci em um contexto no qual os estudos eram compreendidos como uma possibilidade concreta de transformação social.

Meus pais, apesar das dificuldades financeiras e da intensa rotina de trabalho, sempre valorizaram a educação e incentivaram minha formação. Nesse contexto, encontrei no conhecimento não apenas uma possibilidade de mobilidade social, mas também uma forma de compreender o mundo de maneira mais ampla, questionando fenômenos, construindo significados e desenvolvendo minha própria identidade.

Durante a infância e adolescência, fui um estudante participativo, comunicativo e curioso. Tinha interesse em aprender, questionar e compreender o funcionamento das coisas ao meu redor. Ao longo da educação básica, as áreas relacionadas às Ciências da Natureza despertavam em mim uma atenção especial, principalmente pela possibilidade de interpretar fenômenos, compreender transformações e estabelecer relações entre os conhecimentos científicos e situações presentes no cotidiano.

Essa curiosidade sempre esteve acompanhada da necessidade de compreender os processos de maneira mais profunda. As explicações superficiais ou respostas prontas não eram suficientes; havia constantemente o desejo de investigar, estabelecer relações e atribuir significado ao conhecimento construído.

Durante o Ensino Médio, paralelamente ao curso técnico em Química realizado no período diurno, desenvolvia atividades profissionais no período noturno como forma de contribuir com minhas despesas pessoais e familiares. Essa fase foi marcada pelo desafio de conciliar trabalho, estudos e formação profissional, exigindo dedicação, organização e persistência. Mesmo diante do desgaste físico e emocional provocado por essa rotina, o ingresso em uma universidade pública permanecia como um objetivo central em minha trajetória.

O ingresso no Instituto Federal de São Paulo, no curso de Licenciatura em Química, representou uma importante etapa de aproximação com o conhecimento científico e com a formação docente. Durante esse período, também iniciei minha trajetória profissional na indústria química, experiência que contribuiu para ampliar minhas reflexões sobre a profissão, minhas expectativas futuras e os diferentes caminhos possíveis dentro da área da Química.

Foi também durante a graduação que ocorreu uma aproximação mais intensa com a pesquisa acadêmica, especialmente com as discussões relacionadas ao ensino de Química e às possibilidades de utilização das tecnologias digitais no contexto educacional. A participação em uma iniciação científica envolvendo a utilização da linguagem de programação Scratch aplicada ao ensino de conceitos relacionados ao

DNA e ao RNA ampliou minha compreensão sobre o potencial das ferramentas digitais como recursos capazes de favorecer processos de ensino e aprendizagem.

Entretanto, foi principalmente durante os estágios supervisionados da graduação que a docência passou a ocupar um espaço central em minha trajetória. O contato com a sala de aula despertou um sentimento de pertencimento e transformou minha compreensão sobre o papel do professor. A partir dessas experiências, passei a compreender o ensino não apenas como um processo de transmissão de conteúdos, mas como um espaço de diálogo, construção coletiva do conhecimento e formação humana.

Embora tenha realizado minha graduação no Instituto Federal, a Universidade de São Paulo sempre representou um sonho pessoal e acadêmico. Desde jovem, imaginava a possibilidade de estudar naquela instituição, porém as limitações financeiras e a necessidade de permanecer próximo à minha realidade impediram que esse desejo fosse concretizado naquele momento.

Após a graduação e já atuando como professor da rede pública de ensino, mantive constantemente a preocupação em aproximar a Química da realidade dos estudantes. Buscava utilizar diferentes recursos didáticos e tecnológicos, considerando que as mídias digitais já faziam parte do cotidiano dos alunos e poderiam contribuir para tornar o ensino mais próximo de suas experiências.

Nesse processo, frequentemente recorria à internet em busca de ferramentas, metodologias e produtos educacionais que pudessem auxiliar minha prática docente. Entre essas buscas, o Portal eduCAPES tornou-se uma importante fonte de consulta, especialmente por disponibilizar materiais produzidos no contexto acadêmico. Foi nesse ambiente que tive contato com produtos educacionais desenvolvidos por estudantes do Mestrado Profissional em Química em Rede Nacional (PROFQUI).

Até então, eu não conhecia o programa. A partir desse primeiro contato, busquei compreender sua proposta, suas linhas de pesquisa, instituições associadas, corpo docente e objetivos formativos. Esse movimento despertou meu interesse pelo PROFQUI e representou uma possibilidade de continuidade da minha formação acadêmica articulada às demandas presentes na minha prática profissional.

Meu ingresso no PROFQUI constituiu, portanto, a continuidade de uma trajetória construída pela articulação entre pesquisa, docência e formação acadêmica. Um dos aspectos mais significativos desse percurso foi a convivência com outros

professores que, assim como eu, vivenciavam diariamente os desafios, questionamentos e possibilidades da sala de aula.

As experiências compartilhadas com colegas e professores do programa ultrapassaram o âmbito das discussões acadêmicas. Foram momentos de diálogo sobre a realidade escolar, as dificuldades enfrentadas pelos estudantes, os desafios da profissão docente e, principalmente, sobre o compromisso coletivo de construir práticas educativas mais significativas e humanizadas.

Ao longo desse processo, as experiências compartilhadas contribuíram para que eu revisitasse minha própria trajetória e ampliasse minha compreensão sobre o ensino. Cada discussão, relato de prática e reflexão construída no ambiente do mestrado evidenciava que o conhecimento não se constitui de forma individualizada, mas também por meio das relações, das trocas e dos encontros entre sujeitos que compartilham objetivos comuns em torno da educação.

Foi nesse contexto de diálogo e reflexão que minhas inquietações relacionadas ao ensino de Química se fortaleceram. As discussões desenvolvidas no programa, associadas às experiências vivenciadas diariamente em sala de aula, conduziram-me a observar com maior atenção questões relacionadas à forma como conceitos químicos abstratos são representados e organizados nos diferentes recursos utilizados no Ensino de Química, especialmente em ambientes digitais interativos.

Nesse cenário, os simuladores virtuais passaram a despertar meu interesse devido às possibilidades de interação, visualização e articulação entre diferentes níveis de representação dos fenômenos químicos. A compreensão de que esses recursos poderiam reorganizar formas de apresentação e visualização de conceitos abstratos motivou a investigação sobre como essas representações são mobilizadas e organizadas nesses ambientes digitais.

Assim, a escolha da temática desta pesquisa emerge da convergência entre minha trajetória como professor, minhas inquietações acerca do ensino de Química e meu interesse pelas potencialidades representacionais das tecnologias digitais no processo educativo. A pesquisa desenvolvida nesta dissertação representa, portanto, não apenas uma investigação acadêmica, mas também uma continuidade de um percurso formativo marcado pela busca constante por compreender criticamente como recursos digitais organizam representações do conhecimento químico e como essas características podem subsidiar decisões docentes mais fundamentadas.

2 INTRODUÇÃO

2.1 Uma revisão bibliográfica narrativa sobre a temática dos simuladores virtuais e a sua apropriação pela literatura científica

Esta seção se propõe a fazer uma revisão bibliográfica narrativa, de caráter analítico e não exaustivo, sobre a temática dos simuladores virtuais e a sua apropriação pela literatura científica. O foco não está no uso pontual de um simulador em uma aula isolada, mas na forma como a literatura científica tem analisado, revisado, mapeado e problematizado a presença desses recursos em processos formativos. Por isso, foram assumidos como critério de inclusão da busca nas bases de dados apenas os estudos sobre a temática caracterizados como artigos de revisão sistemática¹, revisão de literatura², revisão bibliométrica³, revisão histórica⁴, revisão

¹ A **revisão sistemática** é um estudo secundário que busca identificar, selecionar, avaliar criticamente e sintetizar, de maneira rigorosa e transparente, todas as evidências científicas disponíveis sobre uma questão de pesquisa específica. Seu principal objetivo é reduzir vieses do pesquisador e produzir uma visão abrangente e confiável sobre determinado fenômeno.

² A **revisão de literatura**, também denominada frequentemente **revisão narrativa**, consiste em uma análise e discussão de trabalhos científicos já publicados sobre determinado tema, buscando apresentar conceitos, perspectivas teóricas, tendências e lacunas existentes na área. Diferentemente da revisão sistemática, não necessariamente segue um protocolo rígido de busca e seleção. O pesquisador realiza uma análise interpretativa da literatura com base em sua compreensão teórica e nos objetivos do estudo.

³ A **revisão bibliométrica** utiliza métodos quantitativos para analisar a produção científica existente sobre determinado tema, identificando padrões, tendências, autores, instituições, periódicos, redes de colaboração e evolução temporal das publicações. Seu foco principal não é necessariamente compreender profundamente o conteúdo dos estudos, mas mapear a estrutura e o desenvolvimento de um campo científico.

⁴ A **revisão histórica** busca compreender a evolução de determinado conceito, teoria, prática ou campo científico ao longo do tempo. Seu objetivo é reconstruir trajetórias históricas, identificando mudanças, rupturas, permanências, influências sociais, políticas e culturais que contribuíram para a constituição de determinado conhecimento.

de segunda ordem⁵, meta-análise⁶, revisão descritiva⁷, revisão de escopo⁸ e análise comparativa da literatura⁹ disponibilizados nas bases de dados Eric¹⁰ e Web of Science¹¹, no período de 2016 a 2026, assumindo como critério de exclusão artigos fora da temática ou fora do perfil de artigos citados. A intenção é compreender como os simuladores virtuais e recursos correlatos vêm sendo apropriados como objeto de pesquisa, recurso pedagógico, tecnologia educacional e campo de problematização científica.

A temática dos simuladores virtuais vem assumindo centralidade crescente na literatura educacional, especialmente quando associada ao ensino de ciências, à experimentação mediada por tecnologias digitais, aos laboratórios virtuais, aos laboratórios remotos, às simulações computacionais e aos ambientes de realidade virtual. A apropriação científica desse tema, entretanto, não ocorre de modo uniforme. O corpus¹² analisado mostra que diferentes estudos usam terminologias próximas

⁵ A **revisão de segunda ordem** é uma pesquisa que analisa outras revisões da literatura, em vez de analisar diretamente estudos primários. Ou seja, seu objeto de investigação são revisões sistemáticas, meta-análises ou outros estudos de síntese já publicados. Seu objetivo é reunir, comparar e avaliar conclusões provenientes de diferentes revisões, identificando consensos, divergências e lacunas.

⁶ A **meta-análise** é uma técnica estatística utilizada para combinar quantitativamente os resultados de diferentes estudos que investigaram uma mesma questão de pesquisa. Ela geralmente está associada a revisões sistemáticas e permite calcular um efeito geral a partir de vários estudos independentes. Seu objetivo é aumentar o poder estatístico da análise e identificar padrões que podem não ser evidentes em estudos individuais.

⁷ A **revisão descritiva** tem como objetivo reunir e organizar informações existentes sobre determinado tema, apresentando características, tendências e principais contribuições da literatura. Seu foco está na descrição do estado atual do conhecimento, sem necessariamente realizar uma análise crítica aprofundada ou uma síntese estatística. É mais estruturada que uma revisão narrativa, mas menos rigorosa que uma revisão sistemática.

⁸ A revisão de escopo (**scoping review**) é uma metodologia destinada a mapear a extensão, natureza e características da produção científica existente sobre um determinado tema. Diferentemente da revisão sistemática, que geralmente busca responder uma pergunta específica sobre eficácia ou relação causal, a revisão de escopo procura compreender o que existe publicado, quais conceitos são utilizados, quais lacunas permanecem e como o campo está estruturado. É especialmente útil em áreas emergentes ou com conceitos ainda pouco consolidados.

⁹ A **análise comparativa da literatura** consiste em investigar diferentes estudos, teorias, abordagens ou perspectivas científicas estabelecendo relações de comparação entre eles. O objetivo é identificar aproximações, diferenças, convergências, divergências e contribuições específicas de cada produção. Pode ser utilizada como método independente ou como etapa dentro de outros tipos de revisão.

¹⁰ O **ERIC** (*Education Resources Information Center*) é a maior base de dados de literatura educacional do mundo, patrocinada pelo Departamento de Educação dos Estados Unidos. Ela indexa artigos revisados por pares, teses, livros e relatórios focados em todos os níveis de ensino, desde a educação infantil até o ensino superior.

¹¹ A **Web of Science** (WoS) é uma das bases de dados referenciais e de citações científicas mais prestigiadas do mundo. Desenvolvida pela *Clarivate Analytics*, ela permite buscar artigos, livros e anais de conferências, além de rastrear quem citou quem e calcular métricas como o Fator de Impacto e o Índice H.

¹² **Corpus** é uma palavra de origem latina (*corpus* = corpo, conjunto), amplamente utilizada em diversas áreas acadêmicas. No português científico, ela já é considerada um termo técnico incorporado

para designar objetos que não são equivalentes: simuladores virtuais¹³, laboratórios virtuais¹⁴, laboratórios remotos¹⁵, simulações computacionais¹⁶, realidade virtual imersiva¹⁷ e plataformas específicas, como o PhET¹⁸. Essa diversidade terminológica amplia o alcance do campo, mas também produz uma tensão conceitual que precisa ser enfrentada.

A análise permite sustentar uma posição cautelosa: os simuladores virtuais não devem ser compreendidos como solução autônoma para os problemas do ensino, tampouco como substitutos automáticos do laboratório presencial. A literatura incluída aponta potencialidades consistentes, como ampliação do acesso, visualização de fenômenos abstratos, repetição de experimentos, redução de riscos e possibilidade de manipulação de variáveis. Ao mesmo tempo, os estudos também indicam limites relevantes, sobretudo quando tais recursos são utilizados sem mediação docente, sem integração curricular, sem objetivos didáticos claros e sem atenção às condições materiais de acesso. Assim, a questão central não é apenas se os simuladores virtuais

ao vocabulário acadêmico, especialmente quando se refere ao conjunto de documentos, textos, dados ou materiais que constituem o objeto de análise de uma pesquisa.

¹³ Os **simuladores virtuais** são ambientes digitais interativos que permitem ao usuário representar, manipular e observar fenômenos ou sistemas reais por meio de modelos computacionais desenvolvidos em um ambiente virtual

¹⁴ Os **laboratórios virtuais** são ambientes digitais que simulam a estrutura e as atividades realizadas em um laboratório físico, permitindo que estudantes executem procedimentos experimentais por meio de uma interface computacional. Diferentemente de um simulador isolado, o laboratório virtual geralmente busca reproduzir uma experiência experimental completa, incluindo equipamentos, materiais, procedimentos, coleta de dados e análise dos resultados.

¹⁵ Os **laboratórios remotos** são sistemas que permitem ao estudante controlar e acessar equipamentos laboratoriais reais localizados fisicamente em outro espaço, utilizando uma conexão pela internet. Diferentemente dos laboratórios virtuais, o experimento não é uma representação computacional: o estudante manipula um equipamento real por meio de interfaces digitais.

¹⁶ As **simulações computacionais** são representações matemáticas ou computacionais de sistemas reais ou hipotéticos, desenvolvidas para prever comportamentos, testar modelos e analisar fenômenos complexos. Embora possam constituir a base tecnológica de simuladores virtuais e laboratórios virtuais, o conceito de simulação computacional é mais amplo e está relacionado principalmente ao **modelo científico utilizado para representar um fenômeno**.

¹⁷ A **realidade virtual imersiva (RVI)** consiste em uma tecnologia que permite ao usuário experimentar um ambiente digital tridimensional por meio de dispositivos específicos, como óculos de realidade virtual, sensores de movimento e controladores. O diferencial da realidade virtual em relação aos simuladores tradicionais é o sentimento de presença e imersão, no qual o usuário percebe o ambiente digital como um espaço no qual pode interagir.

¹⁸ O **PhET Interactive Simulations** é uma plataforma educacional desenvolvida pela Universidade do Colorado Boulder que disponibiliza simulações interativas gratuitas para o ensino de Ciências, Matemática e outras áreas do conhecimento. Diferentemente de um laboratório virtual tradicional, o PhET não busca necessariamente reproduzir um laboratório físico completo. Seu objetivo principal é criar ambientes de exploração conceitual nos quais os estudantes possam manipular variáveis, visualizar fenômenos e construir modelos mentais.

funcionam, mas em que condições pedagógicas, curriculares, técnicas e epistemológicas¹⁹ eles podem contribuir para a aprendizagem.

No campo educacional, o Ensino de Ciências aparece como território privilegiado para essa discussão. Isso ocorre porque as Ciências da Natureza envolvem fenômenos frequentemente invisíveis, perigosos, caros, microscópicos, rápidos, lentos, abstratos ou operacionalmente difíceis de reproduzir em laboratórios escolares. Em Química, os simuladores e laboratórios virtuais são mobilizados para a visualização de fenômenos submicroscópicos, estequiometria e representação de processos químicos. Em Física, aparecem associados à experimentação virtual, à manipulação de variáveis, à cinemática e ao uso recorrente do PhET. Em Biologia, são vinculados à visualização de processos celulares, moleculares, genéticos, microbiológicos, anatômicos e biotecnológicos. A distribuição da produção analisada sobre o tema, contudo, mostra uma assimetria: a produção nas áreas de Física e Química é mais volumosa e metodologicamente visível do que na área de Biologia.

2.1.1 Apropriações conceituais: simulador virtual, laboratório virtual, laboratório remoto, simulação computacional e realidade virtual

A primeira questão substantiva que emerge da literatura é conceitual. A literatura tecnológica educacional não usa uma única denominação para tratar dos recursos digitais de experimentação e simulação. Em alguns estudos, o foco recai sobre laboratórios virtuais; em outros, sobre laboratórios remotos, simulações computacionais, realidade virtual imersiva, laboratórios online, interfaces digitais ou plataformas específicas, como o PhET. Essa variedade revela a expansão do campo, mas também exige cuidado analítico. A adoção de um termo genérico, como ‘simuladores virtuais’, pode ser útil como categoria agregadora, desde que não apague as diferenças internas entre esses objetos.

¹⁹ Condições epistemológicas correspondem aos aspectos relacionados à natureza, estrutura e formas de construção do conhecimento científico que orientam a utilização de determinado recurso educacional. No contexto dos simuladores virtuais, referem-se à maneira como esses ambientes favorecem a compreensão, representação, interpretação e articulação dos conceitos científicos, considerando as características específicas do conhecimento químico.

O simulador virtual pode ser entendido, no contexto deste capítulo, como um recurso digital que representa fenômenos, processos, sistemas ou situações e permite algum nível de operação interativa realizada durante a exploração funcional com variáveis, parâmetros, modelos ou representações. Ele não precisa necessariamente constituir um laboratório completo, nem envolver imersão em realidade virtual. Pode estar presente em plataformas educacionais simples, ambientes gráficos bidimensionais, softwares interativos ou recursos web. Essa concepção aparece de modo indireto nos estudos sobre PhET, simulações computacionais e *softwares* de apoio ao ensino, especialmente nas áreas de Química e Física, nas quais a manipulação de variáveis e a visualização de relações conceituais são elementos recorrentes.

O laboratório virtual, por sua vez, é mais específico. Ele tende a designar ambientes digitais organizados para simular práticas laboratoriais ou processos experimentais. Esses ambientes podem permitir ao estudante selecionar materiais, executar procedimentos, observar resultados, testar hipóteses ou explorar fenômenos científicos. Estudos como os de Raman et al. (2022), Heradio et al. (2016), Potkonjak et al. (2016), Reeves e Crippen (2021), Santos, Fernandes e Silva (2017), Campos Mera e Benarroch Benarroch (2024) e Rosli e Ishak (2024) mostram que os laboratórios virtuais se tornaram um eixo consolidado de investigação, especialmente em ciência, tecnologia, engenharia e educação científica.

O laboratório remoto deve ser diferenciado do laboratório virtual. Enquanto o laboratório virtual simula digitalmente uma prática ou fenômeno, o laboratório remoto envolve acesso a equipamentos, instrumentos ou experimentos reais operados a distância por meio de interface digital. Essa diferença aparece de forma clara em estudos comparativos e bibliométricos sobre laboratórios presenciais, simulados, virtuais e remotos. Ma e Nickerson (2006), Heradio et al. (2016), Faulconer e Gruss (2018), Fadda, Salis e Vivanet (2022) e Santos, Fernandes e Silva (2017) tratam essa distinção como relevante para avaliar acesso, autenticidade experimental, custos, segurança, interação e aprendizagem.

A simulação computacional é uma categoria ainda mais abrangente. Ela pode envolver modelos matemáticos, animações interativas, ambientes bidimensionais, softwares de representação, simulações PhET, modelos de fenômenos físicos, químicos ou biológicos, entre outras possibilidades. Na literatura científica analisada, essa categoria aparece especialmente nos estudos voltados ao Ensino de Física e ao

Ensino de Química. Silva, Romeu e Barroso (2022) discutem simulações computacionais em aulas de Física; Carvalho, Marçal de Barros Filho e Lima (2023) analisam *softwares* de simulação para o ensino de estequiometria; Medeiros Jr., Naia e Lopes (2024) tratam especificamente das simulações interativas do PhET nas práticas de ensino da Física. Nesses casos, a simulação computacional não é necessariamente laboratório virtual, mas pode cumprir função experimental, representacional ou investigativa.

A realidade virtual, por fim, diz respeito a ambientes de experiência imersiva ou semi-imersiva. Nem toda simulação virtual é realidade virtual, e nem todo laboratório virtual é ambiente imersivo. A realidade virtual acrescenta dimensões de presença, imersão, interação espacial e experiência tridimensional, o que amplia as possibilidades pedagógicas, mas também complexifica o desenho instrucional. Kavanagh et al. (2017), Durukan, Artun e Temur (2020), Pellas, Dengel e Christopoulos (2020) e Lui, Not e Wong (2023) mostram que a realidade virtual na educação e no Ensino de Ciências exige atenção a fatores como desenho de aprendizagem, fundamentação teórica, experiência do usuário, efeitos sobre motivação, engajamento, aprendizagem e possíveis limitações técnicas ou metodológicas.

A apropriação conceitual feita neste capítulo, portanto, assume os '**recursos virtuais de simulação**' como categoria ampla, dentro da qual se distinguem simuladores virtuais, laboratórios virtuais, laboratórios remotos, simulações computacionais e realidade virtual. Essa escolha evita dois problemas. O primeiro seria restringir demais a busca e perder estudos relevantes que usam termos diferentes. O segundo seria fundir objetos distintos e produzir uma análise conceitualmente frágil. A literatura sugere que a potência desses recursos está justamente em sua variedade, mas essa variedade só se torna analiticamente produtiva quando as diferenças são nomeadas.

2.1.2 Breve panorama bibliométrico e histórico da produção

O panorama bibliométrico e histórico da produção²⁰ indica que os laboratórios virtuais e recursos correlatos não constituem uma agenda recente, embora sua visibilidade tenha aumentado significativamente nas últimas décadas. Estudos de caráter histórico e bibliométrico mostram que a produção científica sobre laboratórios virtuais se consolidou em diálogo com a expansão das tecnologias digitais, com a flexibilização de ambientes educacionais, com o crescimento da educação online e com a necessidade de ampliar o acesso a experiências laboratoriais. Raman et al. (2022), ao analisarem três décadas de produção sobre laboratórios virtuais, oferecem um dos registros mais robustos desse movimento, cobrindo o período de 1991 a 2021 e identificando 9.523 publicações. O estudo aponta crescimento expressivo entre 2011 e 2021, com intensificação no período da pandemia.

A análise bibliométrica de Heradio et al. (2016) também ocupa posição relevante, pois mapeia laboratórios virtuais e remotos na educação e permite visualizar o campo como uma área de investigação estruturada. Ao lado de Raman et al. (2022), esse trabalho mostra que a produção não se limita a relatos de uso, mas inclui análises de padrões de publicação, autores, áreas, instituições, periódicos e tendências. Com isso, o tema deixa de aparecer apenas como ferramenta didática e passa a ser tratado como objeto de produção científica, com história, redes, campos de aplicação e problemas próprios.

Na literatura de base, Ma e Nickerson (2006) assumem papel importante ao comparar laboratórios presenciais, simulados e remotos. O estudo é anterior à expansão mais recente das plataformas educacionais digitais, mas já formula uma tensão que permanece atual: a comparação entre diferentes formatos laboratoriais não deve se limitar à oposição entre real e virtual. O laboratório presencial oferece materialidade, manipulação física e contato direto com instrumentos; o laboratório simulado favorece repetição, flexibilidade e modelagem; o laboratório remoto preserva a relação com equipamentos reais, mas mediada por acesso a distância. Essa diferenciação continua sendo central para evitar análises simplistas.

Potkonjak et al. (2016), ao revisarem laboratórios virtuais para educação em ciência, tecnologia e engenharia, contribuem para consolidar a percepção de que

²⁰ O **panorama bibliométrico e histórico da produção** consiste em uma análise sistemática da literatura científica de determinada área do conhecimento, articulando indicadores quantitativos da produção acadêmica com uma perspectiva histórica de sua evolução, a fim de compreender tendências, crescimento, principais contribuições, mudanças conceituais, pesquisadores envolvidos e transformações ocorridas ao longo do tempo.

esses ambientes atravessam diferentes áreas de conhecimento. A expansão do tema está fortemente associada a cursos de engenharia, ciências naturais, tecnologia e educação superior, mas a busca ampliada indica que o Ensino de Ciências na educação básica também se tornou espaço relevante de investigação. Essa transição é importante: inicialmente, muitos laboratórios virtuais aparecem associados à formação técnica e universitária; depois, passam a ser discutidos no Ensino Médio, na educação básica e nas disciplinas escolares de Química, Física e Biologia.

No corpus analisado, observa-se que a produção mais recente é marcada pela presença de revisões sistemáticas específicas. Há revisões sobre laboratórios online no Ensino de Ciências (Santos; Fernandes; Silva, 2017), laboratórios virtuais no Ensino de Ciências (Campos Mera; Benarroch Benarroch, 2024; Rosli; Ishak, 2024), realidade virtual no Ensino de Ciências (Durukan; Artun; Temur, 2020; Lui; Not; Wong, 2023), laboratórios virtuais em Biologia (Byukusenge; Nsanganwimana; Tarmo, 2022), simulações em Química (Chan et al., 2021; Palacios; Pascual; Moreno-Mediavilla, 2024) e simulações ou laboratórios virtuais em Física (Silva; Mercado, 2020; Timóteo et al., 2022; Silva; Romeu; Barroso, 2022; Medeiros Jr.; Naia; Lopes, 2024; Darman et al., 2024). Esse deslocamento mostra que o campo entrou em uma fase de maior especialização.

O panorama histórico também sugere que a pandemia de COVID-19 acelerou a visibilidade dos laboratórios virtuais e remotos, mas não criou o campo. O crescimento recente deve ser lido como intensificação de uma trajetória anterior. Laboratórios virtuais, remotos e simulados já eram discutidos antes da emergência sanitária, mas a necessidade de continuidade das atividades educacionais em ambientes online tornou mais evidente sua relevância. A contribuição de Raman et al. (2022) é especialmente útil nesse ponto, pois insere a expansão recente em uma série histórica mais ampla.

2.1.3 Simuladores virtuais na educação

Na educação, os simuladores virtuais e recursos correlatos são apropriados principalmente como meios de ampliar acesso, flexibilizar experiências, reduzir custos, favorecer segurança e tornar visíveis fenômenos que seriam difíceis de

observar diretamente. Essa apropriação aparece tanto em estudos de educação superior quanto em pesquisas voltadas à educação básica. Reeves e Crippen (2021), ao revisarem laboratórios virtuais em cursos de graduação em ciência e engenharia entre 2009 e 2019, indicam que grande parte dos estudos se concentra em mudanças no conhecimento de conteúdo, com menor diversidade teórica e metodológica. Esse achado é relevante porque mostra uma tendência do campo: medir aprendizagem conceitual é mais frequente do que investigar dimensões sociais, instrucionais, epistemológicas e práticas da experiência laboratorial.

A revisão de Faulconer e Gruss (2018) ajuda a compreender as vantagens e os limites de experiências laboratoriais online, remotas e a distância. Os autores discutem benefícios como flexibilidade, acesso, redução de custos e possibilidade de continuidade de práticas em contextos nos quais o laboratório físico é limitado. Ao mesmo tempo, o estudo aponta a necessidade de investigar diferenças de custo, aquisição de habilidades procedimentais, preparação para atividades avançadas e tempo de contato com o instrutor. Essa formulação reforça uma posição crítica: o laboratório virtual pode ampliar o acesso à experiência científica, mas não resolve automaticamente todas as dimensões formativas do trabalho laboratorial.

A literatura educacional também problematiza a comparação entre recursos virtuais e laboratórios presenciais. Fadda, Salis e Vivanet (2022), ao realizarem uma revisão sistemática de segunda ordem sobre laboratórios virtuais e remotos em STEM no Ensino Médio, identificam que esses ambientes tendem a ser eficazes quando integrados a práticas tradicionais e acompanhados de mediação adequada. O achado é decisivo porque desloca o debate da substituição para a integração. O problema pedagógico não deve ser formulado como escolha binária entre real e virtual²¹, mas como desenho de ecossistemas de aprendizagem em que diferentes recursos cumpram funções complementares.

²¹ Segundo Lévy (1996), “o virtual não se opõe ao real, mas sim ao atual” (p. 16). Nesse sentido, a atualização não deve ser compreendida como uma simples passagem do possível para o concreto, mas como um processo criativo de resolução de problemas, no qual novas formas de existência podem emergir. Assim, o virtual representa uma potência dinâmica, capaz de gerar diferentes atualizações conforme as circunstâncias, relações e contextos envolvidos. Essa distinção permite compreender que fenômenos mediados pelas tecnologias digitais não devem ser classificados como menos reais por não apresentarem materialidade física imediata. Para Lévy (1996), a virtualização transforma modos de presença, comunicação e organização social, criando novas formas de existência que permanecem vinculadas ao campo do real, ainda que não estejam restritas à presença física ou ao espaço geográfico tradicional.

Essa perspectiva aparece também nos estudos sobre laboratórios virtuais e remotos em educação científica. Ma e Nickerson (2006) comparam laboratórios presenciais, simulados e remotos, mostrando que cada formato envolve diferentes tipos de interação, autenticidade, custo e acesso. Heradio et al. (2016) e Raman et al. (2022) ampliam essa discussão ao mostrar que o campo dos laboratórios virtuais e remotos possui densidade bibliométrica e trajetórias próprias. Assim, os simuladores virtuais na educação não podem ser analisados apenas como ferramentas isoladas, mas como parte de uma infraestrutura maior de mediação tecnológica do conhecimento.

Outro eixo importante é a mediação docente. A literatura não sustenta a ideia de que a tecnologia, por si mesma, determina a aprendizagem²². Palacios, Pascual e Moreno-Mediavilla (2024), no Ensino de Química, enfatizam a importância do desenho metodológico²³ para que as simulações virtuais favoreçam aprendizagem conceitual, competências científicas e atitudes. Lui, Not e Wong (2023), ao revisarem experiências de realidade virtual imersiva no Ensino de Ciências, indicam a necessidade de fundamentar o desenho de aprendizagem em teorias educacionais. Esses estudos convergem ao apontar que o recurso digital precisa estar integrado a objetivos, atividades, sequências didáticas, acompanhamento e avaliação.

Portanto, a apropriação educacional dos simuladores virtuais é marcada por uma tensão produtiva. De um lado, esses recursos ampliam possibilidades de acesso, visualização e experimentação. De outro, exigem planejamento, infraestrutura, formação docente e clareza teórica e metodológica. A literatura incluída não autoriza uma defesa tecnocêntrica, mas oferece base para compreender os simuladores

²² Segundo Lévy (1999), “uma técnica não é nem boa, nem má (isto depende dos contextos, dos usos e dos pontos de vista), tampouco neutra (já que é condicionante ou restritiva de possibilidades)” (p. 26). Dessa forma, a tecnologia deve ser compreendida como uma estrutura que influencia os caminhos possíveis, sem impor um único destino. Ela condiciona porque altera o espaço de possibilidades disponíveis aos indivíduos, mas não determina porque diferentes sociedades podem apropriar-se da mesma tecnologia de maneiras distintas, produzindo efeitos sociais diversos.

²³ O **desenho metodológico no ensino** refere-se à organização intencional dos elementos que estruturam a prática pedagógica, articulando objetivos de aprendizagem, conteúdos, estratégias didáticas, recursos e formas de avaliação. Trata-se do planejamento das ações educativas que orientam o processo de ensino e aprendizagem, definindo como os conhecimentos serão trabalhados e como os estudantes serão envolvidos na construção desses saberes. Conforme Zabala (1998), a prática educativa é composta por diferentes elementos que se relacionam de maneira integrada, sendo necessário organizá-los de forma coerente para favorecer a aprendizagem. Nesse sentido, o desenho metodológico constitui a estrutura que orienta as decisões pedagógicas do professor e estabelece o percurso pelo qual a experiência educativa será desenvolvida.

virtuais como recursos pedagogicamente potentes quando inseridos em práticas intencionais e criticamente orientadas.

2.1.4 Simuladores virtuais no Ensino de Ciências

O Ensino de Ciências ocupa posição estratégica na literatura sobre simuladores virtuais porque a aprendizagem científica envolve frequentemente a construção de modelos, a observação de fenômenos não diretamente acessíveis, a formulação de hipóteses, a manipulação de variáveis, a interpretação de dados e a realização de práticas experimentais. Em muitas escolas, entretanto, a experimentação enfrenta limitações materiais, como ausência de laboratórios equipados, falta de reagentes, riscos de segurança, tempo reduzido, turmas numerosas e dificuldades de manutenção.

Nesse contexto, laboratórios virtuais, simulações computacionais e ambientes remotos apresentam-se como recursos complementares capazes de ampliar as possibilidades de experiências investigativas no ensino de Ciências. Entretanto, é necessário evitar que a incorporação dessas tecnologias seja utilizada como justificativa para a substituição ou negligência da infraestrutura física necessária à aprendizagem científica. Embora esses recursos digitais possam potencializar processos de visualização, experimentação e exploração de fenômenos, eles não devem ser compreendidos como equivalentes ou substitutos dos laboratórios presenciais, uma vez que determinadas dimensões da prática científica dependem da interação direta com materiais, instrumentos, procedimentos experimentais e situações concretas de investigação.

Santos, Fernandes e Silva (2017) oferecem uma contribuição importante ao analisar laboratórios virtuais e remotos no Ensino de Ciências por meio de revisão sistemática e análise bibliométrica. O estudo examina 43 artigos das bases Scopus²⁴, Web of Science e ProQuest²⁵, comparando aplicações na educação básica e no

²⁴ A **Scopus** é uma base de dados bibliográfica multidisciplinar que reúne, indexa e permite a análise de publicações científicas produzidas em diferentes áreas do conhecimento. Desenvolvida e mantida pela editora **Elsevier**, é considerada uma das maiores bases de dados internacionais de resumos e citações da literatura científica revisada por pares.

²⁵ A **ProQuest** é uma plataforma de pesquisa acadêmica que reúne diversas bases de dados especializadas, oferecendo acesso a uma ampla coleção de documentos científicos, incluindo artigos

ensino superior. Essa revisão mostra que a literatura sobre laboratórios online no Ensino de Ciências não se reduz a uma disciplina específica, mas atravessa diferentes áreas, níveis e formatos. O estudo também revela dispersão temática, o que reforça a necessidade de delimitar melhor as subáreas e os níveis de ensino analisados.

Campos Mera e Benarroch Benarroch (2024) e Rosli e Ishak (2024) avançam nessa direção ao tratarem especificamente dos laboratórios virtuais no Ensino de Ciências. Esses estudos indicam que a integração dos laboratórios virtuais tende a ser analisada em relação a resultados de aprendizagem, práticas didáticas, possibilidades de experimentação e organização de ambientes educacionais. No corpus analisado, o Ensino de Ciências funciona como ponte entre a discussão educacional ampla e os usos disciplinares em Química, Física e Biologia. É nesse ponto que a revisão ganha maior relevância para uma dissertação na área, pois permite articular tecnologia, experimentação e aprendizagem científica.

A realidade virtual no Ensino de Ciências constitui outro eixo. Durukan, Artun e Temur (2020) identificam, em revisão descritiva, predominância de estudos experimentais, foco em aprendizagem e concentração de pesquisas em determinados contextos. Kavanagh et al. (2017), em revisão sistemática sobre realidade virtual na educação, e Pellas, Dengel e Christopoulos (2020), em revisão de escopo sobre realidade virtual imersiva em STEM, ajudam a compreender que a realidade virtual não deve ser confundida com qualquer simulação digital. Ela envolve questões específicas de imersão, experiência do usuário, motivação, presença e desenho instrucional. Lui, Not e Wong (2023) reforçam essa preocupação ao apontar a necessidade de fundamentar o uso da realidade virtual em teorias de aprendizagem.

O Ensino de Ciências também evidencia uma limitação recorrente da literatura: a concentração dos estudos em resultados de aprendizagem conceitual. Fadda, Salis e Vivanet (2022) mostram que, no contexto STEM do Ensino Médio, há menor atenção a habilidades práticas, investigação científica e raciocínio científico. Essa lacuna é relevante porque a educação científica não se reduz à aquisição de conceitos; envolve práticas epistêmicas, argumentação, modelagem, análise de evidências e

de periódicos, dissertações, teses, livros, relatórios, jornais e outros materiais acadêmicos. Diferentemente da Scopus e da Web of Science, que possuem forte característica de indexação bibliométrica de periódicos científicos, a ProQuest destaca-se pela abrangência de documentos acadêmicos e documentos produzidos e divulgados fora dos canais tradicionais de publicação científica comercial ou editorial, especialmente teses e dissertações.

compreensão da natureza da ciência. Se os simuladores virtuais forem usados apenas como visualizadores de conteúdo, seu potencial formativo será reduzido.

Assim, a apropriação dos simuladores virtuais no Ensino de Ciências deve ser compreendida como um campo em expansão, mas ainda em disputa. Os estudos indicam potencial para visualização, experimentação mediada, motivação e aprendizagem conceitual; ao mesmo tempo, apontam a necessidade de investigar mais profundamente habilidades científicas, mediação docente, integração curricular e efeitos de longo prazo. Essa tensão deve orientar a leitura das seções seguintes, dedicadas ao Ensino de Química, Física e Biologia.

2.1.5 Ensino de Química, Física e Biologia: laboratórios virtuais, PhET e visualização conceitual

No Ensino de Química, os simuladores virtuais e laboratórios virtuais ganham importância porque muitos conceitos químicos exigem articulação entre níveis macroscópico, submicroscópico e simbólico. Fenômenos como reações químicas, ligações, equilíbrio, estequiometria, estrutura molecular, concentração, pH e comportamento das partículas nem sempre são diretamente observáveis em laboratório escolar. Nesse cenário, simulações computacionais e laboratórios virtuais podem contribuir para tornar visíveis relações conceituais abstratas, desde que não sejam usados apenas como animações demonstrativas.

Chan et al. (2021), ao realizarem revisão sistemática sobre laboratórios químicos virtuais, analisam pesquisas, tecnologias e desenho instrucional. O estudo é central para esta seção porque desloca a discussão do simples uso da ferramenta para a forma como a ferramenta é pedagogicamente organizada. Laboratórios químicos virtuais podem reduzir custos, ampliar acesso, oferecer segurança e permitir repetição de procedimentos; no entanto, sua contribuição depende do modo como são integrados a atividades investigativas, ao apoio docente e à sequência de aprendizagem. A revisão também aponta a necessidade de investigar melhor habilidades práticas, tecnologias imersivas e formas de interação natural.

Palacios, Pascual e Moreno-Mediavilla (2024) reforçam essa leitura ao analisarem o desenho metodológico no uso de simulações virtuais em Química no

Ensino Secundário. O estudo revisou 31 trabalhos publicados entre 2011 e 2021 em Scopus e Web of Science e indica que as simulações virtuais favorecem aprendizagem conceitual, competências científicas e atitudes quando integradas a um desenho metodológico consistente. O ponto decisivo é a mediação: a simulação precisa fazer parte de uma sequência didática que oriente o estudante, promova investigação e relacione a interação virtual aos objetivos de aprendizagem.

No contexto brasileiro, Souza (2024) discute o uso do simulador PhET no Ensino de Química por meio de revisão sistemática. O estudo indica benefícios relacionados à compreensão de conceitos abstratos e ao engajamento discente, mas também aponta condições de sucesso, como formação docente e infraestrutura digital. Essa observação é importante porque o PhET aparece de modo recorrente no corpus, especialmente em Química e Física, mas não deve ser tratado como sinônimo de simulador virtual. Trata-se de uma plataforma específica, amplamente utilizada e pesquisada, cuja eficácia depende da forma como suas simulações são selecionadas, exploradas e articuladas ao conteúdo.

Carvalho, Marçal de Barros Filho e Lima (2023) aprofundam um recorte específico ao analisarem *softwares* de simulação computacional para o ensino de estequiometria. A revisão aponta que tais recursos podem favorecer aprendizagem significativa, motivação e visualização em um conteúdo conhecido por sua carga abstrata e relacional. O caso da estequiometria é exemplar: o estudante precisa articular proporções, quantidades, equações, massas, mols e reações químicas. Simulações computacionais podem ajudar a representar essas relações, mas não dispensam a problematização conceitual nem a mediação do professor.

A leitura do conjunto de estudos em Química permite afirmar que os simuladores virtuais são apropriados principalmente como recursos de visualização conceitual, experimentação segura e apoio à compreensão de fenômenos abstratos. A tensão principal está na passagem da visualização para a aprendizagem científica. Ver uma simulação não significa compreender o conceito. Interagir com um laboratório virtual não significa desenvolver habilidades experimentais de modo automático. Por isso, os estudos mais consistentes insistem na importância do desenho didático, da orientação docente, da integração metodológica e da avaliação de competências além do conteúdo.

O Ensino de Física apresenta o conjunto mais robusto de estudos específicos no corpus brasileiro localizado. Isso pode ser explicado pela forte relação da Física

escolar com modelagem, experimentação, representação gráfica, manipulação de variáveis e análise de fenômenos que muitas vezes dependem de condições controladas. Simulações computacionais e laboratórios virtuais permitem ao estudante alterar parâmetros, observar efeitos, repetir situações, comparar resultados e visualizar relações que, no laboratório físico, podem demandar equipamentos, tempo e condições experimentais mais difíceis de garantir.

Silva e Mercado (2020) analisam laboratórios de ensino de Física mediados por interfaces digitais por meio de revisão sistemática de literatura, com recorte de 2005 a 2015. O estudo mostra que esses laboratórios podem transcender limitações espaço-temporais dos laboratórios tradicionais, permitindo novas formas de experimentação e interação. A contribuição do artigo está em tratar os laboratórios mediados por interfaces digitais como parte de uma transformação das práticas laboratoriais, não apenas como substitutos de equipamentos físicos.

Timóteo et al. (2022) também tratam de práticas pedagógicas auxiliadas por laboratórios virtuais no processo de ensino-aprendizagem de Física. A revisão sistemática segue protocolo de Kitchenham e utiliza a ferramenta Parsifal, o que fortalece sua dimensão metodológica. O estudo é útil para discutir como práticas pedagógicas com laboratórios virtuais vêm sendo analisadas na literatura, embora a matriz indique necessidade de conferência do texto completo para extrair lacunas específicas com maior precisão. Ainda assim, sua presença no corpus reforça a consolidação do tema no Ensino de Física.

Silva, Romeu e Barroso (2022) examinam o uso de simulações computacionais em aulas de Física em revisão sistemática de literatura, com buscas no Portal CAPES e no Google Acadêmico, recorte entre 2015 e 2021, 197 trabalhos iniciais e 10 publicações finais. Esse dado é revelador: há grande volume inicial de registros, mas poucos estudos permanecem após triagem. Essa diferença entre recuperação ampla e inclusão final indica que muitos trabalhos usam o termo simulação sem atender plenamente a critérios metodológicos de revisão ou aderência ao Ensino de Física.

A dissertação de Pagel (2023) acrescenta uma contribuição importante ao relacionar laboratórios virtuais PhET ao ensino de Cinemática, assumindo a Teoria dos Campos Conceituais de Gérard Vergnaud como referencial teórico. O estudo é relevante não apenas pelo objeto, mas por explicitar um referencial educacional. Em comparação com muitos registros da matriz, nos quais o referencial teórico aparece

como informação não localizada, Pagel oferece um caso em que a análise de simuladores virtuais se conecta a uma teoria de aprendizagem e formação conceitual.

Medeiros Jr., Naia e Lopes (2024) ampliam a robustez da discussão ao realizarem revisão sistemática e meta-análise sobre simulações interativas do PhET nas práticas de ensino da Física. A presença de uma meta-análise no corpus é metodologicamente relevante, pois permite tratar o impacto das simulações de forma mais agregada. Darman et al. (2024), por sua vez, oferecem revisão sistemática específica sobre laboratórios virtuais na educação em Física, reforçando que a produção internacional recente continua investindo nesse recorte.

A síntese da literatura em Física indica que os simuladores virtuais e laboratórios virtuais são apropriados como recursos para experimentação mediada, visualização de fenômenos, manipulação de variáveis e apoio à compreensão conceitual. O PhET aparece com força, mas novamente precisa ser lido como plataforma, não como categoria geral. A tensão principal reside na mediação: a interação com a simulação precisa ser orientada por problemas, hipóteses, tarefas e discussões que transformem manipulação em aprendizagem. Sem isso, o estudante pode apenas explorar visualmente o recurso sem desenvolver compreensão física mais profunda.

O Ensino de Biologia aparece no corpus com menor volume de estudos específicos do que Química e Física. Essa constatação deve ser interpretada com cautela. Ela não autoriza afirmar que há ausência de pesquisas em Biologia, mas indica que, na busca ampliada realizada e na matriz exportada, foram localizados menos estudos de revisão diretamente voltados a esse componente curricular. Essa diferença pode decorrer tanto de uma produção efetivamente menor quanto da dispersão terminológica da área, na qual estudos podem aparecer sob termos como biotecnologia, genética, biologia celular, anatomia virtual, dissecação virtual, microscopia digital, visualização molecular ou ambientes virtuais de aprendizagem.

Byukusenge, Nsanganwimana e Tarmo (2022) constituem o principal estudo localizado especificamente sobre laboratórios virtuais no ensino e aprendizagem de Biologia. A revisão de literatura, com busca sistemática, analisou 26 artigos e identificou potencialidades relacionadas à compreensão conceitual, habilidades práticas, motivação e atitudes. O estudo mostra que laboratórios virtuais em Biologia podem ser relevantes para temas como biologia celular e molecular, microbiologia, genética, dissecação e biotecnologia. Esses conteúdos envolvem processos

complexos, escalas microscópicas, técnicas laboratoriais específicas e, em alguns casos, restrições éticas, materiais ou de segurança.

Mercado e Picardal (2023), ao revisarem simulações de laboratórios virtuais em Biotecnologia, ampliam a discussão ao incluir tecnologias 2D, 3D e realidade virtual. O estudo indica que simulações virtuais em biotecnologia podem, em determinados contextos, apresentar resultados iguais ou superiores a atividades práticas, especialmente quando combinadas a métodos tradicionais. O dado mais importante não é a superioridade eventual do virtual, mas a ideia de combinação. Em áreas como Biologia e Biotecnologia, a aprendizagem envolve tanto a compreensão conceitual quanto a familiarização com processos, técnicas e procedimentos; por isso, o virtual tende a ser mais promissor quando articula visualização, investigação e prática orientada.

O Ensino de Biologia evidencia uma dimensão particular da discussão sobre simuladores virtuais: a visualização de processos complexos. Enquanto em Física o foco pode estar na manipulação de variáveis e em Química na representação de fenômenos submicroscópicos, na Biologia os recursos virtuais podem favorecer a compreensão de processos dinâmicos, multiescalares e frequentemente invisíveis, como divisão celular, replicação de DNA, expressão gênica, funcionamento de sistemas fisiológicos, crescimento microbiano, processos biotecnológicos e relações ecológicas. A literatura localizada sugere potencial nessa direção, mas o corpus ainda é insuficiente para uma generalização forte.

A menor presença de estudos em Biologia torna essa área estratégica para futuras investigações. Há espaço para pesquisas que examinem como laboratórios virtuais e simulações podem apoiar a aprendizagem de genética, microbiologia, biologia celular, biotecnologia, anatomia, fisiologia e ecologia. Também é necessário investigar se esses recursos favorecem apenas visualização e motivação ou se contribuem para práticas científicas mais complexas, como análise de dados, raciocínio experimental, interpretação de evidências e tomada de decisão em contextos biológicos.

2.1.6 Referenciais teóricos e metodológicos assumidos pelas pesquisas

A análise da matriz revela uma assimetria importante: os estudos explicitam com maior frequência seus referenciais metodológicos do que seus referenciais teóricos educacionais. Em muitos registros, o campo 'referencial teórico' aparece como informação não localizada. Isso não significa que os estudos não tenham pressupostos teóricos, mas indica que a busca ampliada e os metadados disponíveis nem sempre permitem confirmar quais teorias foram assumidas. Por rigor, este capítulo não deve atribuir a um estudo uma teoria que não esteja explicitamente indicada em seu texto, resumo, registro ou metadados.

Entre os referenciais teóricos explicitamente localizados, destaca-se a dissertação de Pagel (2023), que mobiliza a Teoria dos Campos Conceituais de Gérard Vergnaud para analisar potencialidades pedagógicas de laboratórios virtuais PhET no ensino de Cinemática. Esse é um dado relevante porque permite articular o uso de simuladores ao processo de construção conceitual, e não apenas ao engajamento ou à visualização. A presença desse referencial reforça a necessidade de que pesquisas futuras sobre simuladores virtuais assumam teorias de aprendizagem capazes de explicar como os estudantes constroem, reorganizam e aplicam conceitos científicos.

Os referenciais metodológicos aparecem com mais nitidez. Timóteo et al. (2022) registram o uso do protocolo de Kitchenham e da ferramenta Parsifal em uma revisão sistemática sobre laboratórios virtuais em Física. Raman et al. (2022) utilizam abordagem histórica e bibliométrica para analisar três décadas de produção sobre laboratórios virtuais. Heradio et al. (2016) realizam análise bibliométrica sobre laboratórios virtuais e remotos. Fadda, Salis e Vivanet (2022) desenvolvem uma revisão sistemática de segunda ordem. Medeiros Jr., Naia e Lopes (2024) apresentam revisão sistemática e meta-análise. Pellas, Dengel e Christopoulos (2020) realizam revisão de escopo (*scoping review*) sobre realidade virtual imersiva em STEM. Esses exemplos mostram maturação metodológica do campo.

Além dos referenciais metodológicos, há categorias pedagógicas recorrentes, embora nem sempre explicitadas como teoria. A literatura trata de aprendizagem por

investigação²⁶, *scaffolding*²⁷, desenho instrucional²⁸, aprendizagem ativa²⁹, mediação docente³⁰, conceitual³¹, competências científicas³² e integração curricular³³. Chan et al. (2021) discutem tecnologias e desenho instrucional em laboratórios químicos virtuais; Palacios, Pascual e Moreno-Mediavilla (2024) enfatizam o desenho metodológico das simulações em Química; Lui, Not e Wong (2023) focalizam o desenho de aprendizagem baseado em teoria³⁴ na realidade virtual imersiva. Esses

²⁶ A **aprendizagem por investigação** (também denominada **ensino por investigação** ou *inquiry-based learning*, na literatura internacional) é uma abordagem pedagógica na qual os estudantes participam ativamente da construção do conhecimento por meio da formulação de perguntas, elaboração de hipóteses, investigação de evidências, análise de dados e construção de explicações fundamentadas. Diferentemente de uma abordagem tradicional, na qual o professor apresenta conceitos prontos e os estudantes reproduzem informações, a aprendizagem por investigação busca aproximar o processo educativo das práticas de produção do conhecimento científico.

²⁷ A **aprendizagem por scaffolding** (ou **aprendizagem por andaimagem**) refere-se a uma abordagem em que o estudante recebe suportes temporários, planejados e ajustáveis para realizar tarefas ou compreender conceitos que, inicialmente, estariam além de sua capacidade de realização independente. O conceito está associado principalmente aos estudos de Jerome Bruner e foi desenvolvido a partir das ideias de Lev Vygotsky sobre a Zona de Desenvolvimento Proximal (ZDP). A metáfora do "andaime" representa o suporte oferecido pelo professor, por colegas ou por ferramentas educacionais, que permite ao aprendiz avançar gradualmente até adquirir autonomia.

²⁸ A **aprendizagem baseada em desenho instrucional**, do inglês *instructional design*) refere-se a uma abordagem na qual o processo de ensino e aprendizagem é planejado de forma sistemática, considerando objetivos educacionais, características dos estudantes, estratégias pedagógicas, recursos didáticos e formas de avaliação. O foco central não está apenas no uso de uma tecnologia ou metodologia específica, mas na organização intencional dos elementos que compõem uma experiência de aprendizagem.

²⁹ A **aprendizagem ativa** é uma abordagem pedagógica na qual o estudante deixa de ocupar uma posição predominantemente receptiva e passa a participar de maneira mais **intencional, cognitiva e interativa** do processo de construção do conhecimento. O foco desloca-se da simples transmissão de informações para o envolvimento do estudante em atividades que exigem reflexão, tomada de decisão, resolução de problemas, análise, argumentação e aplicação do conhecimento.

³⁰ A **aprendizagem por mediação docente** refere-se a uma concepção de aprendizagem na qual o professor exerce um papel ativo como mediador entre o estudante, o conhecimento e os recursos disponíveis, organizando situações didáticas que favoreçam a construção de significados.

³¹ A **aprendizagem conceitual** consiste no processo de construção e reorganização dos conhecimentos dos estudantes, no qual conceitos científicos são progressivamente compreendidos, relacionados e aplicados em diferentes situações, possibilitando a elaboração de explicações coerentes sobre fenômenos e a superação de concepções inadequadas ou simplificadas.

³² A **aprendizagem por competências científicas** refere-se a uma abordagem educacional que busca desenvolver nos estudantes não apenas a aquisição de conceitos científicos, mas também a capacidade de mobilizar conhecimentos, habilidades, atitudes e valores para interpretar fenômenos, resolver problemas, tomar decisões e participar de práticas relacionadas à ciência.

³³ A **aprendizagem por integração curricular** refere-se a uma abordagem que busca superar a fragmentação tradicional dos conhecimentos escolares, promovendo relações entre diferentes áreas, disciplinas, conceitos e contextos para possibilitar uma compreensão mais ampla dos fenômenos estudados. Nessa perspectiva, os conteúdos deixam de ser trabalhados isoladamente e passam a ser articulados em torno de problemas, temas ou situações significativas.

³⁴ O **desenho de aprendizagem baseado em teoria** (do inglês *theory-based learning design* ou *theory-driven instructional design*) refere-se ao planejamento de experiências educacionais fundamentado explicitamente em teorias de aprendizagem, de modo que as escolhas metodológicas, os recursos didáticos, as atividades e as formas de avaliação sejam orientadas por pressupostos teóricos sobre como os estudantes aprendem. Diferentemente de um planejamento baseado apenas na escolha de uma ferramenta ou atividade, esse tipo de desenho parte de uma questão central: "**Quais**

estudos indicam que a eficácia dos simuladores virtuais depende menos da existência do recurso e mais da qualidade do projeto pedagógico.

A principal conclusão desta seção é que o campo ainda precisa fortalecer sua base teórica educacional. Muitas revisões descrevem resultados, tecnologias, áreas e efeitos, mas nem sempre explicitam com profundidade as teorias que orientam a aprendizagem. Para uma dissertação de mestrado, isso é relevante porque permite identificar uma lacuna: estudar simuladores virtuais não exige apenas mapear ferramentas, mas compreender os processos de mediação, construção conceitual, atividade investigativa e formação científica que esses recursos podem ou não favorecer.

2.1.7 Principais resultados recorrentes

Os resultados recorrentes da literatura consultada indicam que simuladores virtuais, laboratórios virtuais, laboratórios remotos e simulações computacionais são frequentemente associados à aprendizagem conceitual. Esse resultado aparece em diferentes áreas. No Ensino de Química, Palacios, Pascual e Moreno-Mediavilla (2024) indicam que simulações virtuais podem favorecer aprendizagem conceitual, competências científicas e atitudes quando integradas a desenho metodológico adequado. Carvalho, Marçal de Barros Filho e Lima (2023) apontam contribuições para aprendizagem significativa, motivação e visualização em estequiometria. No Ensino de Física, Medeiros Jr., Naia e Lopes (2024) sintetizam o impacto das simulações PhET, enquanto Silva, Romeu e Barroso (2022) mostram que as simulações computacionais são mobilizadas como apoio didático em aulas de Física. Na Biologia, Byukusenge, Nsanganwimana e Tarmo (2022) indicam contribuições para compreensão conceitual, habilidades práticas, motivação e atitudes.

Outro resultado recorrente é a visualização de fenômenos abstratos, invisíveis ou de difícil observação direta. Esse ponto atravessa todo o corpus. Em Química, a visualização ajuda a representar processos submicroscópicos, relações

estequiométricas e transformações químicas. Em Física, permite observar relações entre grandezas, manipular variáveis e repetir fenômenos sob diferentes condições. Em Biologia, auxilia na compreensão de processos celulares, moleculares, microbiológicos e biotecnológicos. A força dos simuladores virtuais está, portanto, em tornar operáveis e observáveis certos aspectos do conhecimento científico que, no espaço escolar, seriam de difícil acesso.

A flexibilidade de acesso também aparece com frequência. Laboratórios virtuais e remotos podem ser acessados fora do espaço físico tradicional, permitindo repetição, exploração individualizada e superação parcial de limitações materiais. Faulconer e Gruss (2018) discutem vantagens e desvantagens de experiências laboratoriais online, remotas e a distância. Santos, Fernandes e Silva (2017) analisam laboratórios virtuais e remotos no Ensino de Ciências. Raman et al. (2022) situam esse movimento em um crescimento histórico da produção sobre laboratórios virtuais. Esses estudos indicam que o acesso remoto e digital é uma das razões da expansão do campo, mas não deve ser confundido com garantia de aprendizagem.

A complementaridade com práticas presenciais constitui outro resultado forte. A literatura não sustenta de forma consistente a substituição plena do laboratório físico por recursos virtuais. Fadda, Salis e Vivanet (2022) indicam que laboratórios virtuais e remotos tendem a ser mais eficazes quando integrados a práticas tradicionais e acompanhados de mediação. Ma e Nickerson (2006) mostram que diferentes formatos laboratoriais possuem características próprias. Chan et al. (2021) e Mercado e Picardal (2023) também apontam que combinações entre métodos tradicionais e laboratórios virtuais podem produzir resultados mais consistentes.

Por fim, a mediação docente aparece como condição transversal. Estudos sobre realidade virtual, simulações em Química, PhET e laboratórios virtuais indicam que os resultados dependem da seleção do recurso, da tarefa proposta, da orientação oferecida, do *feedback*, do tempo de exploração, da relação com os conceitos científicos e da integração à sequência didática. A tecnologia é recurso, não método completo. Sua eficácia depende de como é transformada em atividade de ensino e aprendizagem.

2.1.8 Lacunas, tensões e limitações

As lacunas, tensões e limitações do corpus são tão importantes quanto seus resultados. A primeira lacuna refere-se à predominância da aprendizagem conceitual como principal variável analisada. Muitos estudos avaliam melhora de desempenho, compreensão de conteúdos ou motivação, mas investigam menos habilidades práticas, raciocínio científico, investigação experimental, argumentação, análise de dados e práticas epistêmicas. Fadda, Salis e Vivanet (2022) identificam essa limitação ao apontarem menor atenção a habilidades práticas, investigação científica e raciocínio científico em estudos sobre laboratórios virtuais e remotos no STEM.

A segunda lacuna diz respeito à formação docente. A literatura reconhece a importância da mediação, mas nem sempre examina como professores são formados para selecionar, adaptar, integrar e avaliar simuladores virtuais. Souza (2024) aponta formação docente e infraestrutura digital como condições de sucesso para o uso do PhET no Ensino de Química. Palacios, Pascual e Moreno-Mediavilla (2024) enfatizam o papel do desenho metodológico e do professor no uso de simulações em Química. Lui, Not e Wong (2023) chamam atenção para a necessidade de desenho de aprendizagem baseado em teoria na realidade virtual imersiva. Esses estudos convergem para uma questão: sem formação docente, a tecnologia pode ser usada de forma superficial.

A terceira tensão é conceitual. O corpus mostra uso frequente de termos próximos, mas não equivalentes. Simulador virtual, laboratório virtual, laboratório remoto, simulação computacional e realidade virtual não são a mesma coisa. Confundir esses termos produz problemas metodológicos, pois diferentes recursos envolvem graus distintos de interação, imersão, materialidade, autenticidade experimental e acesso a equipamentos reais. Ma e Nickerson (2006), Heradio et al. (2016), Faulconer e Gruss (2018), Potkonjak et al. (2016) e Raman et al. (2022) ajudam a evidenciar a necessidade de maior precisão conceitual.

A quarta limitação refere-se à desigualdade entre áreas. No corpus analisado, Física e Química aparecem com maior densidade de estudos específicos do que Biologia. Isso não permite afirmar ausência de produção em Biologia, mas indica que a busca localizada encontrou menos revisões diretamente voltadas a esse componente curricular. Byukusenge, Nsanganwimana e Tarmo (2022) e Mercado e

Picardal (2023) são estudos relevantes, mas ainda insuficientes para generalizações amplas.

A quinta limitação envolve infraestrutura e acesso. Simuladores virtuais pressupõem equipamentos, conectividade, dispositivos, domínio técnico e tempo de planejamento. Em contextos escolares marcados por desigualdades digitais, esses recursos podem ampliar oportunidades ou reforçar exclusões. A literatura reconhece benefícios de acesso, mas o acesso técnico não é apenas disponibilidade de link; envolve condições reais de uso, suporte institucional, formação docente e compatibilidade curricular.

A sexta tensão é o risco de tecnocentrismo. Parte do entusiasmo com simuladores virtuais pode levar à ideia de que a presença da tecnologia já garante inovação pedagógica. O corpus não sustenta essa conclusão. Os estudos mais consistentes indicam que a aprendizagem depende de mediação, desenho instrucional, integração curricular, objetivos claros e articulação com práticas científicas. O simulador pode favorecer visualização, mas também pode ser usado de modo passivo. Pode ampliar experimentação, mas também pode reduzir a experiência científica a uma sequência de cliques. Essa tensão deve orientar a leitura crítica do tema.

Embora a literatura reconheça a importância das representações químicas em ambientes digitais, observa-se uma predominância de estudos voltados à descrição dos recursos tecnológicos, às potencialidades educacionais gerais dos simuladores ou à identificação dos níveis representacionais presentes. Permanecem menos explorados os modos pelos quais esses ambientes organizam diferentes formas representacionais, estabelecem relações entre registros, promovem transformações dinâmicas e disponibilizam possibilidades interativas incorporadas ao próprio design do simulador.

2.1.9 Direcionamentos para novas pesquisas

Os direcionamentos para novas pesquisas derivam diretamente das lacunas identificadas. O primeiro é a necessidade de refinamento conceitual. Estudos futuros devem explicitar se investigam simuladores virtuais, laboratórios virtuais, laboratórios

remotos, simulações computacionais, realidade virtual imersiva ou plataformas específicas, como o PhET. Essa distinção deve aparecer já no problema de pesquisa, nos descritores, nos critérios de inclusão e na análise. Sem clareza conceitual, revisões futuras continuarão agregando objetos diferentes sob rótulos genéricos.

O segundo direcionamento é investigar a mediação docente. A literatura já indica que a eficácia dos simuladores virtuais depende do professor, mas ainda são necessários estudos sobre planejamento, seleção de recursos, construção de tarefas, feedback, avaliação e integração curricular. É preciso compreender como professores transformam simuladores em instrumentos pedagógicos e como evitam que eles sejam usados apenas como ilustração ou entretenimento. Estudos baseados em observação de sala de aula, formação continuada, pesquisa-intervenção e análise de sequências didáticas podem contribuir para esse avanço.

O terceiro direcionamento é ampliar as pesquisas sobre habilidades científicas. Estudos futuros precisam ir além da aprendizagem conceitual e investigar raciocínio científico, formulação de hipóteses, modelagem, análise de dados, interpretação de evidências, argumentação e práticas investigativas. Essa ampliação é particularmente importante no Ensino de Ciências, pois a educação científica não se limita a saber conceitos; envolve aprender modos de pensar, investigar e justificar conhecimentos.

O quarto direcionamento é aprofundar pesquisas em Ensino de Biologia. A busca ampliada localizou estudos relevantes, mas em menor número que em Química e Física. Novas revisões poderiam usar descritores específicos, como genética virtual, laboratório virtual de biologia celular, simulação de microbiologia, anatomia virtual, dissecação virtual, biotecnologia, ecologia computacional, fisiologia virtual e modelagem biológica. Essa estratégia pode revelar uma produção que não aparece quando se usa apenas o termo amplo 'simuladores virtuais'.

O quinto direcionamento é investigar efeitos de longo prazo. Muitos estudos medem resultados imediatos de aprendizagem, motivação ou desempenho, mas há menos evidências sobre permanência da aprendizagem, transferência de conhecimentos, desenvolvimento de autonomia, formação de habilidades científicas e impacto em trajetórias escolares. Pesquisas longitudinais poderiam oferecer respostas mais consistentes sobre o valor formativo desses recursos.

O sexto direcionamento é estudar modelos híbridos. A literatura sugere que combinações entre laboratório físico, laboratório virtual, laboratório remoto e simulação computacional podem produzir resultados mais promissores do que o uso

isolado de uma modalidade. Estudos comparativos robustos, com critérios claros, podem ajudar a compreender quais arranjos funcionam melhor para diferentes objetivos: aprendizagem conceitual, habilidades práticas, segurança, motivação, investigação científica, custo e acesso.

Por fim, é necessário relacionar os simuladores virtuais às condições concretas das escolas. A adoção desses recursos não depende apenas de qualidade técnica, mas de infraestrutura, formação docente, tempo de planejamento, currículo, avaliação, desigualdades digitais e políticas institucionais. A principal contribuição desta revisão é indicar que os simuladores virtuais constituem um campo promissor, mas ainda atravessado por tensões conceituais, metodológicas e pedagógicas. Sua relevância educacional não está na tecnologia em si, mas na forma como ela é integrada a práticas de ensino capazes de promover aprendizagem científica significativa, crítica e investigativa.

Embora a literatura investigue amplamente os efeitos educacionais associados aos simuladores virtuais, esta pesquisa desloca o foco analítico para a compreensão desses ambientes como sistemas representacionais multimodais, investigando como diferentes formas de representação química são organizadas, articuladas e transformadas no interior do ambiente digital, sem, contudo, investigar empiricamente processos cognitivos dos usuários ou resultados de aprendizagem decorrentes do uso desses recursos.

2.2 Justificativa

A justificativa desta pesquisa é organizada em três dimensões analíticas complementares — científica, profissional-formativa e educacional-social — que, em conjunto, sustentam a pertinência, relevância e necessidade da investigação. Essa organização decorre do entendimento de que pesquisas no campo da Educação em Ciências, especialmente no âmbito do Mestrado Profissional em Química em Rede Nacional (PROFQUI), se fundamentam na articulação entre a produção de conhecimento científico, a transformação da prática docente e os impactos educacionais e sociais decorrentes da investigação.

2.2.1 Justificativa científica

A presente pesquisa insere-se no campo da Educação em Ciências, com ênfase no Ensino de Química, tendo como objeto os simuladores virtuais da plataforma PhET *Interactive Simulations* e sua organização representacional do conhecimento químico. Sua justificativa científica fundamenta-se na articulação entre o referencial teórico dos níveis de representação do conhecimento químico proposto por Johnstone e a crescente utilização de tecnologias digitais de simulação no ensino de Química e Ciências.

O modelo de Johnstone constitui o eixo teórico estruturante desta investigação ao compreender o conhecimento químico como organizado em três níveis interdependentes — macroscópico, submicroscópico e simbólico — cuja articulação constitui condição representacional potencialmente favorável à compreensão conceitual em Química (Johnstone, 1991, 1993, 2000). Estudos subsequentes reforçam que a dificuldade de aprendizagem em Química está diretamente associada à fragmentação entre esses níveis e à dificuldade dos estudantes em transitar entre fenômenos observáveis, modelos particulados e linguagens simbólicas (Mortimer, Machado e Romanelli, 2000; Gabel, 1993; Treagust; Chittleborough; Mamiala, 2003).

Paralelamente a essa base teórica, a literatura sobre simuladores virtuais, laboratórios virtuais, simulações computacionais e realidade virtual tem evidenciado a expansão e consolidação desses recursos no Ensino de Ciências. Revisões bibliométricas e sistemáticas indicam crescimento expressivo da produção científica sobre laboratórios virtuais e remotos, com destaque para sua aplicação em contextos educacionais diversos (Rutten; Van Joolingen; Van Der Veen, 2012; Heradio et al., 2016; Raman et al., 2022). Esses estudos apontam que tais ambientes digitais são amplamente utilizados para favorecer a visualização de fenômenos abstratos, a manipulação de variáveis e o acesso a experiências experimentais mediadas.

No entanto, a literatura também evidencia limitações importantes. Estudos como os de Ma e Nickerson (2006) e Faulconer e Gruss (2018) destacam que a comparação entre laboratórios presenciais, virtuais e remotos não pode ser reduzida a uma lógica de substituição, uma vez que cada modalidade apresenta características específicas de interação, autenticidade experimental e mediação. Além

disso, revisões como as de Chan et al. (2021) e Palacios, Pascual e Moreno-Mediavilla (2024) indicam que a eficácia dos simuladores virtuais depende diretamente do desenho instrucional, da mediação docente e da integração curricular, e não apenas da presença da tecnologia.

No contexto do Ensino de Ciências, estudos como os de Santos, Fernandes e Silva (2017), Campos Mera e Benarroch Benarroch (2024) e Rosli e Ishak (2024) mostram que os laboratórios virtuais vêm sendo analisados principalmente em termos de resultados de aprendizagem e organização didática, enquanto sua estrutura representacional interna ainda recebe menor atenção analítica. No campo específico da Física e da Química, investigações como as de Silva, Romeu e Barroso (2022) e Medeiros Jr., Naia e Lopes (2024) reforçam a predominância de análises voltadas à eficácia pedagógica e ao uso de plataformas como o PhET, com menor ênfase na estruturação interna das representações químicas.

É nesse ponto que se insere a relevância científica desta pesquisa. Conforme sistematizado na **Seção 2.1 desta dissertação**, observa-se que, embora haja ampla produção sobre simuladores virtuais no ensino, ainda são limitadas as investigações que os tratam como sistemas estruturados de representação do conhecimento químico. Em geral, os estudos reconhecem a presença de múltiplas formas de representação, mas não analisam de forma sistemática como essas representações são organizadas em torno de um mesmo conhecimento químico.

Essa lacuna torna-se ainda mais evidente quando se considera que o referencial de Johnstone, embora amplamente utilizado na literatura em Ensino de Química, ainda não é operacionalizado de forma sistemática para análise interna de simuladores virtuais. Ou seja, há uma dissociação entre a força teórica do modelo e sua aplicação analítica em ambientes digitais interativos.

Além disso, a literatura tende a tratar de forma agregada diferentes tecnologias educacionais — simuladores virtuais, laboratórios virtuais, simulações computacionais e realidade virtual — sem distinções analíticas rigorosas entre suas estruturas representacionais (Rutten; Van Joolingen; Van Der Veen, 2012; Heradio et al., 2016; Raman et al., 2022). Essa generalização limita a compreensão das especificidades de cada recurso e de sua organização interna do conhecimento químico.

Diante desse cenário, esta pesquisa se justifica cientificamente por propor um avanço conceitual e metodológico ao analisar os simuladores virtuais da

plataforma PhET como sistemas estruturados de representação do conhecimento químico. Essa abordagem permite examinar, de forma integrada, a presença e organização dos níveis macroscópico, submicroscópico e simbólico, bem como suas relações, predominâncias, restrições e complementações no interior das simulações.

Assim, a contribuição científica da pesquisa reside no deslocamento do foco da literatura — predominantemente centrado em eficácia pedagógica e resultados de aprendizagem — para uma análise estrutural da organização representacional do conhecimento químico em simuladores virtuais, articulando o referencial de Johnstone com o estudo de ambientes digitais interativos no Ensino de Química.

2.2.2 Justificativa profissional e formativa no contexto do PROFQUI

No contexto do Mestrado Profissional em Química em Rede Nacional (PROFQUI), esta pesquisa justifica-se por sua contribuição à formação do professor pesquisador e ao fortalecimento da prática docente reflexiva. Ao analisar simuladores virtuais como sistemas estruturados de representação do conhecimento químico, o estudo desloca o professor de uma posição de usuário de tecnologias para uma posição de analista crítico de recursos didáticos digitais.

Essa mudança permite qualificar a seleção de simuladores virtuais para o ensino; orientar a mediação pedagógica de forma mais consciente; e fundamentar decisões didáticas baseadas em critérios representacionais e conceituais. Além disso, a pesquisa contribui para a articulação entre investigação acadêmica e prática docente, característica central do PROFQUI, ao oferecer um sistema analítico aplicável à análise e planejamento de atividades didáticas com simuladores virtuais.

2.2.3 Justificativa educacional e social

Do ponto de vista educacional, esta pesquisa contribui para a qualificação do uso de simuladores virtuais no Ensino de Química, especialmente em contextos nos quais o ensino experimental enfrenta limitações estruturais. Ao analisar

como esses ambientes organizam representações químicas, o estudo fornece subsídios para práticas pedagógicas mais consistentes, intencionais e alinhadas aos objetivos de aprendizagem científica.

Para o campo do Ensino de Química, a pesquisa oferece critérios para análise das condições representacionais disponibilizadas por simuladores virtuais. Para professores e redes de ensino, oferece critérios analíticos que podem orientar a seleção e uso de simuladores virtuais, contribuindo para práticas pedagógicas mais fundamentadas.

Do ponto de vista social, a pesquisa também se relaciona ao processo de democratização do acesso a tecnologias educacionais, destacando que não basta disponibilizar simuladores, mas compreender sua estrutura didática e representacional.

2.3 Problemática

A problematização desta pesquisa emerge da relação entre a complexidade representacional própria do conhecimento químico, a expansão dos ambientes digitais interativos no Ensino de Química e a necessidade de compreender como esses recursos estruturam e disponibilizam diferentes formas de representação científica.

A Química caracteriza-se por um elevado grau de abstração conceitual, uma vez que sua compreensão envolve relações entre fenômenos observáveis, modelos explicativos de entidades não diretamente perceptíveis e linguagens simbólicas utilizadas para representar sistemas e transformações químicas. Nesse sentido, as contribuições de Johnstone (1991, 1993, 2000) evidenciam que o conhecimento químico se organiza a partir da articulação entre os níveis macroscópico, submicroscópico e simbólico, cuja integração constitui um elemento central para a compreensão conceitual da disciplina.

Entretanto, essa articulação não ocorre de maneira automática. A presença isolada de diferentes representações não garante que elas estejam conceitualmente relacionadas ou organizadas de modo a favorecer a compreensão

dos fenômenos químicos. Assim, compreender a representação do conhecimento químico exige ultrapassar uma análise centrada apenas na identificação dos níveis presentes, considerando também as relações estabelecidas entre eles, suas formas de organização e as condições nas quais essas representações são disponibilizadas.

Nesse contexto, os simuladores virtuais de Química (SVQ) apresentam-se como ambientes digitais particularmente relevantes para essa discussão, pois integram diferentes recursos visuais, simbólicos, dinâmicos e interativos em uma mesma interface. Esses ambientes podem disponibilizar simultaneamente fenômenos observáveis, modelos particulados, equações, gráficos, valores quantitativos, animações e possibilidades de manipulação de variáveis, constituindo sistemas multimodais de representação do conhecimento químico.

Contudo, a simples presença de múltiplas representações em um simulador não permite inferir a existência de uma organização representacional coerente. Diferentes simuladores podem apresentar os mesmos níveis de representação, mas estruturá-los de maneiras distintas, estabelecendo diferentes níveis de diversidade interna, correspondência conceitual, dinâmica representacional, modulação e potencial interativo. Dessa forma, torna-se necessário investigar não apenas quais representações estão presentes nos ambientes virtuais, mas como essas representações são organizadas e quais relações estabelecem dentro do sistema representacional do simulador.

A literatura sobre simuladores virtuais no Ensino de Ciências demonstra um crescimento significativo das pesquisas relacionadas às potencialidades desses recursos para visualização, experimentação mediada, interação e compreensão conceitual. Entretanto, grande parte dos estudos concentra-se na análise de resultados de aprendizagem, motivação ou utilização pedagógica desses recursos, enquanto a estrutura interna das representações químicas presentes nos simuladores ainda permanece pouco explorada.

Essa lacuna torna-se particularmente relevante no Ensino de Química, pois os simuladores virtuais não apenas apresentam informações, mas constroem formas específicas de representação dos conceitos químicos. As escolhas realizadas no desenvolvimento desses ambientes — como quais elementos são destacados, quais aspectos são simplificados, quais relações são explicitadas, quais transformações são representadas e quais possibilidades de interação são

disponibilizadas — influenciam a maneira como o conhecimento químico é organizado no ambiente digital.

Nesse sentido, analisar um simulador virtual implica compreender também os processos de modelagem representacional envolvidos em sua construção. Toda representação digital do conhecimento químico envolve escolhas de seleção, redução, complementação e organização de elementos, produzindo determinadas formas de apresentação do fenômeno químico. Assim, aspectos como restrições representacionais, complementações visuais, organização temporal das representações e possibilidades interativas tornam-se elementos fundamentais para compreender a estrutura desses ambientes.

Diante dessa perspectiva, identifica-se uma necessidade investigativa: desenvolver uma abordagem capaz de analisar os simuladores virtuais de Química como sistemas representacionais complexos, considerando simultaneamente o contexto visual e funcional da interface, a composição dos níveis representacionais, a diversidade das formas apresentadas, as relações conceituais estabelecidas, as dinâmicas representacionais, as modulações e as possibilidades interativas disponibilizadas.

Diante desse cenário, a questão central que orienta esta investigação pode ser sintetizada da seguinte forma:

Como as três simulações funcionais do conjunto temático Balanceamento de Equações Químicas organizam, em um registro audiovisual e multimodal, diferentes níveis e formas de representação do conhecimento químico, correspondências conceituais, transformações, relações temporais, modulações e possibilidades interativas, incluindo a participação funcional do canal sonoro, e quais possibilidades, condições e limitações didático-representacionais emergem de sua organização individual e integrada?

Essa questão compreende Intro, Equações e Jogo como simulações funcionalmente independentes, embora relacionadas pela origem comum e pelo mesmo tema químico. A comparação preserva a autonomia empírica de cada módulo e busca reconhecer permanências, reconfigurações e complementaridades no conjunto, sem transferir evidências de uma simulação para outra.

2.4 Objetivo geral e objetivos específicos

A definição dos objetivos desta pesquisa decorre da necessidade de compreender como os simuladores virtuais de Química (SVQ) organizam e disponibilizam representações do conhecimento químico em ambientes digitais interativos. Considerando que esses recursos constituem sistemas representacionais complexos, nos quais diferentes formas de representação podem coexistir, estabelecer relações conceituais, sofrer transformações temporais, ser moduladas e disponibilizar diferentes possibilidades de interação, torna-se necessário investigar sua estrutura representacional de maneira sistemática e integrada.

Nesse sentido, o estudo tem como objetivo geral:

Desenvolver e aplicar um modelo analítico para compreender como três simulações funcionalmente independentes do conjunto Balanceamento de Equações Químicas organizam, articulam, transformam e disponibilizam representações audiovisuais e multimodais do conhecimento químico, tanto individualmente quanto em sua configuração integrada.

A partir desse objetivo geral, desdobram-se os seguintes objetivos específicos:

a) Caracterizar a Arquitetura Imagético-Contextual das três simulações, considerando os elementos visuais, sonoros, funcionais e interativos que constituem o ambiente de significação das representações químicas.

b) Analisar a Multiplicidade Representacional e a Variedade de Formas Representacionais Intranível dos simuladores, identificando a presença, a ausência, a coocorrência e as formas de disponibilização dos níveis macroscópico, submicroscópico e simbólico, bem como a diversidade de formas representacionais mobilizadas no interior de cada nível.

c) Investigar a Correspondência Conceitual estabelecida entre diferentes representações químicas presentes nos simuladores virtuais.

d) Analisar a Dinâmica Representacional, a Relação Temporal e a Modulação Representacional das representações químicas disponibilizadas pelos simuladores virtuais.

e) Analisar o Potencial Interativo-Representacional dos simuladores virtuais, considerando as possibilidades manipulativas, exploratórias e construtivas incorporadas ao ambiente digital.

f) Construir sínteses interpretativas da organização representacional de cada simulação e do conjunto temático por meio da Configuração Representacional Dominante (CRD) e do Potencial Didático-Representacional (PDR), emergentes da articulação entre as dimensões analíticas investigadas.

3 REFERENCIAL TEÓRICO

3.1 Os níveis de representação do conhecimento químico e suas implicações para o ensino de Química

A aprendizagem da Química envolve um processo complexo de construção de significados, uma vez que essa ciência utiliza diferentes formas de representação para explicar fenômenos que apresentam características observáveis e não observáveis. Diferentemente de outras áreas do conhecimento nas quais o objeto de estudo pode ser frequentemente acessado pela experiência direta, a Química exige que os estudantes desenvolvam modelos explicativos capazes de representar entidades e processos que não podem ser visualizados diretamente, como átomos, moléculas, íons e suas interações.

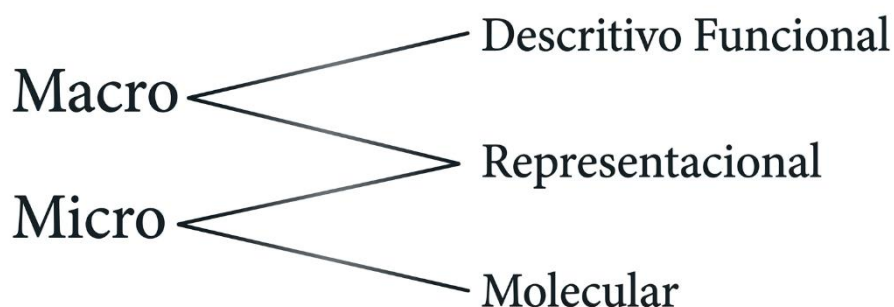
Essa característica confere à Química um elevado grau de abstração, tornando necessário compreender como os estudantes estabelecem relações entre fenômenos observáveis, modelos científicos e linguagens simbólicas próprias da disciplina. As dificuldades encontradas pelos estudantes muitas vezes não estão relacionadas apenas ao desconhecimento de conceitos específicos, mas à dificuldade de transitar entre diferentes formas de representação do conhecimento químico.

Nesse contexto, as contribuições de Alex H. Johnstone constituem um importante referencial para compreender como os conhecimentos químicos podem ser organizados e representados. A partir de seus estudos, desenvolveu-se uma perspectiva amplamente utilizada na Educação Química, segundo a qual a compreensão dos conceitos químicos depende da capacidade dos estudantes de estabelecer relações entre diferentes níveis de representação.

3.1.1 A complexidade da aprendizagem química e a proposta inicial de Johnstone

Os estudos desenvolvidos por Johnstone (1982) propuseram uma estrutura teórica para compreender as diferentes formas pelas quais o conhecimento químico pode ser representado. Inicialmente, o autor organizou essas formas em três níveis denominados **descritivo e funcional**, **atômico e molecular** e **representacional**, conforme apresentados na Figura 1.

Figura 1 – Primeiro modelo para representação dos níveis de conhecimento químico



Fonte: Johnstone (1982, p. 378)

O primeiro nível, denominado **descritivo e funcional**, corresponde aos aspectos observáveis dos fenômenos químicos, envolvendo características perceptíveis e mensuráveis das substâncias e das transformações da matéria. Nesse nível estão incluídas propriedades como cor, estado físico, densidade, temperatura, formação de precipitados, liberação de gases e demais fenômenos que podem ser identificados diretamente por meio da observação ou da experimentação.

O segundo nível, denominado **atômico e molecular**, refere-se às explicações utilizadas para interpretar os fenômenos observados no nível macroscópico. Nesse domínio, são empregados modelos relacionados a átomos, moléculas, íons, ligações químicas e interações entre partículas, possibilitando construir explicações sobre comportamentos da matéria que não são acessíveis diretamente aos sentidos.

O terceiro nível, denominado **representacional**, envolve a linguagem simbólica utilizada pela Química para comunicar seus conhecimentos. Esse nível

contempla fórmulas químicas, equações, símbolos, representações matemáticas e demais sistemas utilizados para expressar conceitos, propriedades e transformações químicas.

Posteriormente, esses níveis passaram a ser amplamente difundidos na literatura como **macroscópico, submicroscópico e simbólico**, nomenclaturas que passaram a representar, respectivamente, os fenômenos observáveis, os modelos explicativos relacionados às partículas e as formas simbólicas de representação do conhecimento químico.

Para Johnstone (1982), a dificuldade de aprendizagem da Química está relacionada, em grande parte, à necessidade de compreender simultaneamente essas diferentes dimensões. O estudante precisa interpretar um fenômeno observável, compreender o modelo utilizado para explicá-lo e ainda relacioná-lo à linguagem simbólica empregada pela ciência.

Segundo o autor, muitos estudantes apresentam dificuldades porque o ensino frequentemente privilegia apenas um desses níveis, principalmente o simbólico, sem estabelecer conexões adequadas com os fenômenos e os modelos explicativos. Dessa forma, fórmulas, equações e símbolos podem ser interpretados como informações isoladas, sem que o estudante compreenda os significados químicos que representam.

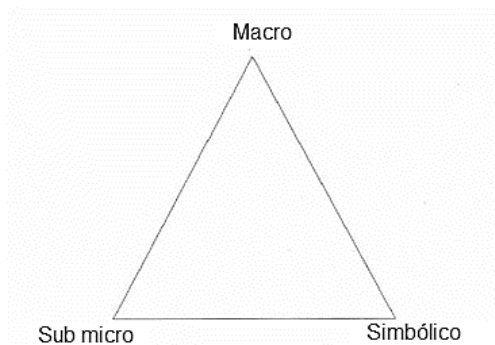
Assim, a aprendizagem química não depende apenas da aquisição de conceitos individuais, mas da capacidade de estabelecer relações coerentes entre diferentes formas de representação. O conhecimento químico torna-se mais significativo quando o estudante consegue compreender que os símbolos e modelos utilizados pela Química são ferramentas construídas para explicar fenômenos e não representações diretas da realidade.

3.1.2 A consolidação do modelo triangular e a articulação entre os níveis de representação

Embora a proposta inicial de Johnstone (1982) tenha contribuído significativamente para compreender os desafios envolvidos na aprendizagem da

Química, o próprio autor identificou a necessidade de reorganizar o modelo inicialmente apresentado. Em trabalhos posteriores, Johnstone (1993) propôs uma representação triangular dos níveis de conhecimento químico, na qual cada dimensão passou a ocupar um dos vértices do triângulo, conforme apresentado na Figura 2.

Figura 2 – Modelo de Johnstone para os níveis de representação



Fonte: Elaboração a partir de Johnstone (1993, p. 703).

Essa organização evidenciou que os níveis de representação não devem ser compreendidos como categorias isoladas, mas como dimensões inter-relacionadas do conhecimento químico. O modelo triangular passou a representar a ideia de que a compreensão dos conceitos químicos ocorre por meio da movimentação entre diferentes níveis, estabelecendo relações entre fenômenos, modelos explicativos e representações simbólicas.

A partir dessa reformulação, Johnstone passou a utilizar as denominações **macro**, **submicro** e **simbólico**, destacando que:

- o nível **macroscópico** está relacionado aos fenômenos tangíveis e observáveis do mundo químico;
- o nível **submicroscópico** envolve modelos particulados utilizados para explicar o comportamento da matéria;
- o nível **simbólico** corresponde às linguagens formais utilizadas para representar conceitos e transformações químicas.

Segundo Johnstone (2000), a compreensão da Química exige que o estudante consiga transitar entre esses níveis, pois os fenômenos observados no mundo macroscópico somente podem ser explicados adequadamente quando relacionados aos modelos submicroscópicos e expressos por meio das representações simbólicas próprias da disciplina.

Nesse sentido, o autor destaca:

Johnstone (2000) sustenta que a compreensão química requer a passagem ao domínio submicroscópico, no qual o comportamento das substâncias é interpretado por entidades invisíveis e moleculares e expresso por linguagens e notações representacionais.

Entretanto, apesar da importância dessa articulação, Johnstone (1993, 2000) chama atenção para um aspecto fundamental: embora professores e especialistas transitem naturalmente entre os diferentes níveis de representação, essa movimentação pode representar uma dificuldade significativa para estudantes iniciantes.

O domínio simultâneo dos três níveis pode gerar elevada demanda cognitiva, especialmente quando os estudantes ainda não possuem conhecimentos prévios consolidados capazes de estabelecer relações entre as diferentes representações. Por essa razão, Johnstone (2000) sugere que o ensino da Química deve considerar uma progressão gradual, iniciando a abordagem por um dos vértices do triângulo, avançando posteriormente para as relações entre os níveis e, finalmente, possibilitando uma compreensão integrada do conhecimento químico.

Essa perspectiva evidencia que o desafio do ensino de Química não está apenas em apresentar os diferentes níveis de representação, mas em auxiliar os estudantes na construção das conexões necessárias entre eles.

3.1.3 Cognição, memória de trabalho e sobrecarga cognitiva na aprendizagem química

A compreensão dos diferentes níveis de representação do conhecimento químico não envolve apenas aspectos relacionados à organização conceitual da Química, mas também processos cognitivos envolvidos na construção desse conhecimento. Nesse sentido, Johnstone (2000) aprofundou suas discussões ao relacionar as dificuldades apresentadas pelos estudantes com aspectos relacionados ao funcionamento da memória humana, especialmente no que se refere à capacidade limitada da memória de trabalho.

A memória de trabalho corresponde ao sistema cognitivo responsável pelo armazenamento temporário e pelo processamento das informações necessárias para a realização de determinadas tarefas. Entretanto, essa capacidade é limitada, de modo que uma quantidade excessiva de informações novas apresentadas simultaneamente pode comprometer a aprendizagem, uma vez que o estudante possui menos recursos cognitivos disponíveis para organizar, interpretar e estabelecer relações entre essas informações.

No ensino de Química, essa limitação torna-se particularmente relevante devido à necessidade constante de articulação entre diferentes níveis de representação. Enquanto especialistas conseguem transitar entre fenômenos observáveis, modelos particulados e representações simbólicas de maneira quase automática, estudantes iniciantes ainda estão desenvolvendo essas conexões conceituais. Dessa forma, a apresentação simultânea de múltiplas representações sem uma organização adequada pode gerar sobrecarga cognitiva e dificultar a construção de significados.

Segundo Johnstone (2000), para reduzir essa sobrecarga, torna-se fundamental que os estudantes possuam conhecimentos prévios consolidados em sua memória de longo prazo, permitindo estabelecer relações entre novos conceitos e estruturas cognitivas já existentes. Quando o estudante possui uma base conceitual organizada, torna-se mais capaz de interpretar novas informações e estabelecer conexões entre diferentes formas de representação química.

Nesse sentido, o autor defende que o ensino de Química deve considerar uma progressão conceitual, partindo inicialmente dos aspectos macroscópicos, relacionados aos fenômenos observáveis, e posteriormente incorporando os modelos submicroscópicos e as representações simbólicas. Essa organização possibilita que o estudante construa gradualmente relações entre aquilo que observa, os modelos científicos utilizados para explicar os fenômenos e as linguagens formais da Química.

Essa perspectiva possui implicações importantes para o uso de recursos tecnológicos no ensino de Química, especialmente os simuladores virtuais. Embora esses ambientes apresentem potencial para favorecer a visualização de fenômenos abstratos e possibilitem a integração entre diferentes níveis representacionais, a apresentação simultânea de múltiplas informações também pode representar um desafio cognitivo. Assim, a contribuição desses recursos para a aprendizagem

depende da forma como as representações são organizadas, apresentadas e mediadas pedagogicamente.

Portanto, a utilização de simuladores virtuais não deve ser analisada apenas pela quantidade de elementos visuais ou interativos disponibilizados, mas pela maneira como esses recursos favorecem a construção de relações conceituais entre os diferentes níveis de representação do conhecimento químico.

Embora esses aspectos sejam relevantes para compreender desafios do ensino de Química, nesta pesquisa eles são utilizados apenas como fundamentação da importância das representações químicas, não constituindo objeto empírico de investigação. Assim, esses conceitos são mobilizados exclusivamente para justificar a relevância da organização representacional em Química, não sendo utilizados como critérios interpretativos dos simuladores analisados nesta pesquisa.

3.1.4 Ampliações e ressignificações do modelo de Johnstone na Educação Química

As contribuições de Johnstone (1982, 1993, 2000) exerceram significativa influência no campo da Educação Química, tornando-se um importante referencial para pesquisas relacionadas à aprendizagem de conceitos científicos. Entretanto, ao longo das últimas décadas, diferentes pesquisadores passaram a discutir, ampliar e reinterpretar esse modelo, considerando aspectos epistemológicos, cognitivos e pedagógicos envolvidos na construção do conhecimento químico.

Essas contribuições posteriores não representam necessariamente substituições ao modelo original, mas diferentes perspectivas de compreensão sobre como os estudantes estabelecem relações entre fenômenos, modelos científicos e representações químicas.

3.1.4.1 As contribuições de Gabel e a importância da natureza particulada da matéria

As pesquisas desenvolvidas por Gabel (1993) reforçaram a importância de uma abordagem do ensino de Química que contemplasse os diferentes níveis de representação do conhecimento químico. A autora destacou que uma das principais dificuldades dos estudantes está relacionada à compreensão da natureza particulada da matéria e à capacidade de estabelecer relações entre fenômenos observáveis e explicações baseadas em modelos microscópicos.

Segundo Gabel (1993), muitos estudantes apresentam dificuldades porque conseguem observar e descrever fenômenos no nível macroscópico, mas não conseguem relacioná-los aos modelos submicroscópicos utilizados pela Química. Dessa forma, a aprendizagem conceitual exige mais do que a apresentação de informações: requer oportunidades para que os estudantes construam relações entre diferentes formas de representação.

Nesse contexto, a articulação entre os níveis macroscópico, submicroscópico e simbólico torna-se essencial para favorecer uma compreensão mais integrada dos conceitos químicos, permitindo que os estudantes interpretem fenômenos observáveis a partir de modelos científicos e utilizem adequadamente a linguagem simbólica da disciplina.

3.1.4.2 As contribuições de Treagust e a relação entre modelos e representação química

Treagust, Chittleborough e Mamiala (2003) também destacaram a importância da articulação entre diferentes níveis representacionais para a aprendizagem da Química. Os autores enfatizaram que a compreensão dos conceitos científicos está diretamente relacionada à capacidade dos estudantes de construir, interpretar e utilizar modelos explicativos.

Para esses pesquisadores, os modelos científicos desempenham um papel central no ensino de Química, pois permitem representar aspectos da realidade que não podem ser observados diretamente. Entretanto, para que esses modelos contribuam efetivamente para a aprendizagem, os estudantes precisam compreender suas funções explicativas e suas relações com os fenômenos observáveis.

Dessa forma, a aprendizagem química envolve não apenas reconhecer diferentes representações, mas compreender como elas se relacionam e como cada uma contribui para explicar determinado fenômeno.

3.1.4.3 A contribuição de Mortimer, Machado e Romanelli e a perspectiva fenomenológica, teórica e representacional

No contexto brasileiro, Mortimer, Machado e Romanelli (2000) incorporaram as contribuições de Johnstone ao propor uma organização do conhecimento químico baseada nas dimensões fenomenológica, teórica e representacional.

Embora essa proposta dialogue diretamente com o modelo dos três níveis de Johnstone, os autores enfatizam uma perspectiva diferenciada, destacando que a compreensão química envolve uma relação dinâmica entre:

- os fenômenos observados;
- os modelos explicativos construídos pela ciência;
- as formas simbólicas utilizadas para comunicar esses conhecimentos.

A dimensão **fenomenológica** corresponde aos fenômenos observáveis e às situações concretas que podem ser percebidas pelos estudantes. A dimensão **teórica** envolve os modelos explicativos desenvolvidos pela ciência para interpretar esses fenômenos. Já a dimensão **representacional** refere-se às linguagens utilizadas para expressar essas explicações, incluindo símbolos, fórmulas, equações e representações matemáticas.

Essa interpretação amplia a proposta de Johnstone ao enfatizar que a aprendizagem química não consiste simplesmente em movimentar-se entre níveis distintos, mas em compreender as relações estabelecidas entre fenômenos, modelos e linguagens científicas.

3.1.4.4 A contribuição de Talanquer sobre representação química

Embora o modelo proposto por Johnstone tenha se consolidado como um importante referencial para compreender a aprendizagem química, sua interpretação não permaneceu restrita à formulação inicial apresentada pelo autor. Diferentes pesquisadores passaram a discutir os limites, possibilidades e implicações pedagógicas dessa estrutura representacional, considerando que a aprendizagem da Química envolve processos cognitivos e epistemológicos mais complexos do que uma simples movimentação entre três níveis distintos.

Nesse contexto, Talanquer (2011) analisou diferentes perspectivas relacionadas à tríade química proposta por Johnstone, destacando que os níveis macroscópico, submicroscópico e simbólico foram interpretados de diferentes maneiras ao longo do desenvolvimento da área de Educação Química. Para o autor, essas variações não representam fragilidades do modelo original, mas evidenciam sua relevância como instrumento teórico para compreender os desafios envolvidos na construção do conhecimento químico.

Segundo Talanquer (2011), o ensino de Química envolve processos complexos de raciocínio, modelagem e construção de significados, nos quais os estudantes precisam compreender não apenas as representações utilizadas pela ciência, mas também os processos pelos quais essas representações são construídas, interpretadas e utilizadas para explicar fenômenos.

Dessa forma, o modelo de Johnstone não deve ser compreendido como uma estrutura rígida ou como uma sequência linear de aprendizagem, mas como uma ferramenta conceitual que permite analisar as diferentes formas pelas quais os conhecimentos químicos são apresentados e compreendidos. Essa perspectiva amplia a discussão ao considerar que a aprendizagem química envolve aspectos relacionados à construção de modelos mentais, interpretação de evidências e desenvolvimento de explicações científicas.

Assim, as contribuições de Johnstone, Mortimer, Machado e Romanelli e Talanquer podem ser compreendidas como diferentes perspectivas sobre um mesmo problema central: a necessidade de compreender como os estudantes estabelecem relações entre fenômenos observáveis, modelos explicativos e representações simbólicas.

3.1.4.5 Pesquisas contemporâneas sobre os níveis de representação do conhecimento químico

As discussões relacionadas aos níveis de representação do conhecimento químico permanecem presentes em pesquisas contemporâneas da área de Educação Química, demonstrando a atualidade das contribuições propostas por Johnstone.

Hamerská et al. (2024) destacam a importância do desenvolvimento de estratégias pedagógicas que auxiliem os estudantes na transição entre os diferentes níveis de representação. Segundo os autores, recursos como experimentação e atividades demonstrativo-investigativas podem contribuir para explicitar as relações entre fenômenos observáveis, modelos explicativos e representações simbólicas, favorecendo uma compreensão mais integrada dos conceitos químicos.

Gilbert e Treagust (2009) investigaram a utilização dos níveis de representação do conhecimento químico na construção de modelos explicativos relacionados às interações intermoleculares. O estudo evidenciou a importância de possibilitar aos estudantes a articulação entre diferentes formas de representação para compreender conceitos que apresentam elevado grau de abstração.

Treagust, Chittleborough e Mamiala (2003) também exploraram os níveis de representação química por meio da elaboração de situações-problema envolvendo ligações químicas. Os resultados destacaram que atividades estruturadas a partir de problemas contextualizados podem favorecer a mobilização de diferentes representações e auxiliar os estudantes na construção de explicações científicas.

De maneira semelhante, Talanquer (2011) investigou o desenvolvimento dos níveis de representação do conhecimento químico em uma sequência didática sobre equilíbrio químico fundamentada na estratégia da sala de aula invertida. A pesquisa evidenciou a importância de organizar situações de aprendizagem que possibilitem aos estudantes estabelecer relações entre diferentes formas de representação conceitual.

Palacios, Pascual e Moreno-Mediavilla (2024), por meio de uma revisão integrativa da literatura fundamentada no Triângulo de Johnstone, analisou modelos

híbridos aplicados ao ensino de Química e Ciências. Os resultados indicaram que as contribuições de Johnstone continuam exercendo influência significativa nas pesquisas relacionadas ao ensino e aprendizagem da Química, sendo utilizadas como base para diferentes propostas metodológicas e investigações educacionais.

Estudos mais recentes, como o desenvolvido por Hamerská et al. (2024), reforçam que a articulação entre os níveis macroscópico, submicroscópico e simbólico é fundamental para a compreensão conceitual dos conteúdos químicos. Os autores destacam que a fragmentação dessas representações pode comprometer a aprendizagem, uma vez que os estudantes podem compreender parcialmente um fenômeno sem estabelecer relações adequadas entre suas diferentes formas de representação.

Talanquer (2011), ao discutirem ampliações do modelo representacional tradicional, propõem novas possibilidades de articulação entre os níveis de representação química e aspectos humanos e contextuais envolvidos no ensino de Química. Para os autores, compreender o conhecimento químico envolve considerar não apenas estruturas representacionais, mas também os processos pelos quais os estudantes atribuem significado aos conceitos científicos.

De forma semelhante, Ainsworth (2006) investigou como práticas de sensemaking podem favorecer a integração entre os níveis macroscópico, submicroscópico e simbólico, destacando a importância da construção de conexões significativas entre diferentes representações durante o processo de aprendizagem.

As pesquisas apresentadas evidenciam que o modelo proposto por Johnstone permanece como um importante referencial teórico no campo da Educação Química, sendo constantemente retomado, ampliado e ressignificado por diferentes pesquisadores. A permanência dessas discussões demonstra que a compreensão dos conceitos químicos continua diretamente relacionada à capacidade dos estudantes de estabelecer relações entre diferentes formas de representação.

3.1.5 O modelo de Johnstone como fundamento teórico para análise de sistemas representacionais digitais

Nesta pesquisa, o modelo de Johnstone (1982, 1993) é assumido como fundamento teórico para compreender a natureza representacional do conhecimento químico, especialmente pela distinção entre níveis macroscópico, submicroscópico e simbólico. Entretanto, considerando as características multimodais dos simuladores virtuais, esses níveis não constituem categorias suficientes para compreender integralmente a organização representacional desses ambientes digitais. Assim, o modelo analítico desenvolvido incorpora dimensões adicionais relacionadas às formas de articulação, transformação, modulação, temporalidade e interação das representações.

Embora o modelo proposto por Johnstone (1982, 1993) tenha recebido diferentes interpretações e ampliações ao longo das últimas décadas, essa escolha não representa uma desconsideração das contribuições posteriores desenvolvidas por diferentes pesquisadores, mas uma delimitação teórico-metodológica relacionada às características específicas do objeto investigado.

As reformulações propostas por Mortimer, Machado e Romanelli (2000), por exemplo, ampliaram a discussão ao considerar as dimensões fenomenológica, teórica e representacional do conhecimento químico, enfatizando a relação entre fenômenos, modelos explicativos e linguagem científica no contexto da construção do conhecimento. Essa perspectiva apresenta grande relevância para investigações relacionadas aos processos de ensino, ao discurso científico em sala de aula e à elaboração curricular.

De maneira semelhante, Talanquer (2011) problematizou a interpretação tradicional dos três níveis de representação, destacando que a aprendizagem química envolve processos complexos de raciocínio, modelagem e construção de significados que ultrapassam uma compreensão simplificada da movimentação entre diferentes níveis representacionais. Suas contribuições evidenciam que as representações químicas estão associadas a aspectos cognitivos, epistemológicos e contextuais envolvidos na aprendizagem.

Entretanto, considerando o objetivo desta pesquisa, que consiste em analisar simuladores virtuais aplicados ao ensino de Química, a estrutura proposta por Johnstone apresenta maior adequação como fundamentação teórica para construção de categorias analíticas. Diferentemente de uma investigação centrada nos processos discursivos em sala de aula, nas concepções epistemológicas dos estudantes ou nos processos cognitivos envolvidos na aprendizagem, esta pesquisa busca compreender

como os simuladores virtuais apresentam, organizam e articulam diferentes formas de representação do conhecimento químico.

Essa escolha justifica-se pelas próprias características dos simuladores virtuais enquanto recursos tecnológicos. Esses ambientes digitais são construídos a partir de representações visuais, simbólicas e interativas dos fenômenos químicos, frequentemente permitindo ao usuário observar:

- fenômenos e transformações perceptíveis no sistema simulado, relacionados ao nível macroscópico;
- modelos de partículas, átomos, moléculas, íons e interações microscópicas, associados ao nível submicroscópico;
- fórmulas, equações, gráficos, valores quantitativos e outras linguagens formais próprias da Química, correspondentes ao nível simbólico.

Além disso, os simuladores virtuais possuem como característica particular a possibilidade de alternância dinâmica entre essas representações. Um mesmo fenômeno pode ser apresentado em diferentes escalas e linguagens, permitindo investigar não apenas quais níveis estão presentes, mas também como essas representações se relacionam e se complementam dentro do ambiente digital.

Nesse sentido, o modelo de Johnstone apresenta uma vantagem metodológica para esta pesquisa: permite construir categorias de análise diretamente relacionadas aos elementos constitutivos dos simuladores virtuais. Enquanto outras sistematizações ampliam a compreensão dos processos de aprendizagem química considerando dimensões pedagógicas, discursivas e epistemológicas, o modelo original de Johnstone oferece uma estrutura mais objetiva para identificar e caracterizar as formas de representação presentes nesses recursos.

Portanto, a adoção do modelo de Johnstone nesta investigação não significa assumir que os níveis macroscópico, submicroscópico e simbólico representam dimensões isoladas ou suficientes para explicar integralmente a aprendizagem química. Ao contrário, reconhece-se a complexidade do processo educativo e as contribuições das ampliações posteriores. Contudo, considerando que o foco da pesquisa está na análise das representações químicas mobilizadas por simuladores virtuais, a estrutura proposta por Johnstone constitui um referencial analítico coerente com as características do objeto investigado.

Assim, o modelo de Johnstone constitui um ponto de partida teórico para identificação dos registros representacionais químicos, enquanto as dimensões

adicionais propostas nesta pesquisa permitem investigar aspectos próprios dos ambientes digitais, como dinâmica, temporalidade, modulação e interação.

3.2 Múltiplas representações, multimodalidade e ambientes digitais interativos

A análise das representações do conhecimento químico em simuladores virtuais exige considerar características que ultrapassam a identificação dos níveis macroscópico, submicroscópico e simbólico. Embora o modelo de Johnstone constitua uma base teórica fundamental para reconhecer a natureza das representações químicas presentes nesses ambientes, os simuladores virtuais organizam tais representações por meio de diferentes formas visuais, verbais, simbólicas, espaciais, temporais e interativas.

Esses ambientes não apresentam apenas registros representacionais dispostos de maneira estática. Ao contrário, possibilitam alterações de estados, manipulação de variáveis, atualização de valores, movimentação de objetos, aparecimento de indicadores, emissão de feedbacks e transformação de configurações representacionais ao longo do tempo. Dessa forma, compreender os simuladores virtuais como sistemas representacionais digitais requer articular três campos teóricos complementares: os estudos sobre múltiplas representações, a perspectiva da multimodalidade e as discussões sobre visualizações dinâmicas e ambientes interativos.

Essa ampliação teórica permite diferenciar questões que, embora relacionadas, não são equivalentes. Nesta pesquisa, a Multiplicidade Representacional (MR) refere-se especialmente à presença, ausência, coocorrência e disponibilização dos níveis macroscópico, submicroscópico e simbólico na organização representacional dos simuladores. A multimodalidade refere-se à articulação de diferentes modos semióticos na produção de significados. Já a dinâmica e a interatividade correspondem às possibilidades de transformação, atualização e ação incorporadas ao funcionamento do ambiente digital.

No contexto desta pesquisa, essas perspectivas não são utilizadas para avaliar diretamente os efeitos dos simuladores sobre estudantes ou professores. Sua função consiste em fornecer fundamentos para compreender como os próprios ambientes

digitais selecionam, organizam, relacionam, transformam, restringem e complementam representações do conhecimento químico.

3.2.1 Múltiplas representações no Ensino de Ciências e de Química

O conhecimento científico é apresentado e comunicado por meio de diferentes formas de representação, como textos, equações, fórmulas, diagramas, modelos, gráficos, tabelas, imagens e animações. Cada uma dessas formas apresenta determinadas possibilidades e limitações, uma vez que destaca alguns aspectos do objeto representado e, simultaneamente, reduz, simplifica ou omite outros.

Uma representação não corresponde ao objeto ou fenômeno em sua totalidade. Ela constitui uma construção elaborada para selecionar e organizar determinados aspectos considerados relevantes para uma finalidade específica. No campo da Química, essa característica torna-se particularmente importante porque muitos de seus objetos de conhecimento não são diretamente acessíveis à percepção. Átomos, moléculas, íons, interações e processos submicroscópicos precisam ser apresentados por meio de modelos e linguagens representacionais construídas pela comunidade científica.

Nesse contexto, a utilização de múltiplas representações não deve ser compreendida apenas como a presença simultânea de diferentes imagens ou linguagens. É necessário investigar quais informações são disponibilizadas por cada representação, quais funções elas desempenham e que relações conceituais são estabelecidas entre elas. Uma equação química, por exemplo, pode representar simbolicamente reagentes, produtos e relações estequiométricas, mas não explicita necessariamente a organização espacial das partículas, os mecanismos envolvidos ou as propriedades macroscópicas associadas à transformação.

Ainsworth (1999) propõe que os ambientes constituídos por múltiplas representações externas podem cumprir três funções principais: complementar, restringir e favorecer a construção de relações. A função de complementação ocorre quando diferentes representações apresentam informações distintas ou disponibilizam formas diferentes de acesso a um mesmo conhecimento. Uma

representação pode evidenciar aspectos quantitativos, enquanto outra pode explicitar relações espaciais, estruturais ou processuais.

A função de restrição ocorre quando uma representação reduz as possibilidades de interpretação de outra. Nesse caso, uma forma representacional contribui para delimitar o significado de outra, impedindo ou dificultando interpretações incompatíveis com o conhecimento representado. Uma equação química acompanhada de modelos moleculares, por exemplo, pode restringir a interpretação dos coeficientes estequiométricos como índices pertencentes às fórmulas químicas, desde que a correspondência entre as duas formas esteja claramente organizada.

A terceira função refere-se à construção de relações entre representações. Nesse movimento, a coexistência de diferentes registros possibilita estabelecer conexões entre aspectos que não estariam igualmente evidentes em uma única forma representacional. Entretanto, essa construção não decorre automaticamente da presença de múltiplas representações. É necessário que o sistema apresente condições para que as correspondências, convergências e diferenças entre elas possam ser identificadas (Ainsworth, 1999).

Posteriormente, Ainsworth (2006) sistematizou essas discussões no modelo DeFT — *Design, Functions and Tasks* —, segundo o qual a análise de ambientes multirrepresentacionais deve considerar seu desenho, as funções desempenhadas pelas representações e as relações exigidas entre elas. Essa perspectiva evidencia que a simples inclusão de várias formas de representação não garante uma organização integrada. O modo como as representações são distribuídas, sequenciadas, sinalizadas e relacionadas interfere nas possibilidades interpretativas incorporadas ao ambiente.

A noção de especialização funcional também é relevante para compreender esses sistemas. Diferentes representações podem ser utilizadas porque cada uma é especialmente adequada para explicitar determinada propriedade do conhecimento. Gráficos podem destacar relações entre variáveis; equações podem sintetizar relações quantitativas; modelos moleculares podem explicitar organização espacial e composição; textos podem nomear, orientar ou contextualizar os elementos apresentados. Assim, a variedade representacional pode decorrer não apenas da repetição de uma mesma informação, mas da distribuição de funções entre registros distintos.

No Ensino de Química, Gilbert e Treagust (2009) ressaltam que a compreensão dos conceitos químicos envolve relações entre representações macroscópicas, submicroscópicas e simbólicas. Entretanto, dentro de cada um desses níveis também podem coexistir diferentes formas representacionais. O nível simbólico, por exemplo, pode incluir fórmulas, equações, valores numéricos, expressões matemáticas e gráficos. O nível submicroscópico pode ser representado por esferas, estruturas moleculares, modelos tridimensionais, esquemas de partículas ou animações.

Essa variedade interna demonstra que a análise dos níveis de Johnstone não é suficiente, isoladamente, para descrever toda a organização representacional de um simulador. Dois ambientes podem apresentar o nível simbólico, mas utilizar formas simbólicas diferentes e atribuir a elas funções distintas. Da mesma maneira, dois simuladores podem representar partículas, mas diferir quanto ao tipo de modelo, à movimentação, à escala, às cores, à disposição espacial e às relações com outras representações.

As relações entre registros também precisam ser examinadas conceitualmente. A presença simultânea de uma equação química e de um modelo molecular não significa necessariamente que haja correspondência entre eles. Essa correspondência depende de fatores como identificação das mesmas entidades, conservação das quantidades representadas, sincronização das alterações e coerência entre as transformações apresentadas.

Schnotz e Bannert (2003) observam que diferentes formas externas de representação possuem estruturas próprias e podem orientar a construção de relações de maneiras distintas. As representações pictóricas, verbais e simbólicas não são intercambiáveis de forma imediata, pois apresentam informações segundo organizações particulares. Por isso, a análise de um sistema multirrepresentacional deve considerar não apenas a presença de seus componentes, mas também as possibilidades de mapeamento estabelecidas entre eles.

Nesta pesquisa, os estudos sobre múltiplas representações fundamentam diretamente a Multiplicidade Representacional (MR), a Variedade de Formas Representacionais Intranível (VFRI), a Correspondência Conceitual (CC) e a Modulação Representacional (MD), além de contribuírem transversalmente para a construção do Potencial Didático-Representacional (PDR). A MR examina a presença, a ausência, a coocorrência e os modos de disponibilização dos níveis macroscópico,

submicroscópico e simbólico. A VFRI identifica a diversidade de formas mobilizadas no interior de cada nível. A CC investiga se as representações estabelecem relações conceitualmente sustentadas, enquanto a MD analisa as escolhas de destaque, restrição, simplificação e complementação. O PDR, por sua vez, integra posteriormente as contribuições das sete dimensões primárias, sem constituir uma dimensão adicional nem pressupor aprendizagem ou eficácia pedagógica.

3.2.2 Multimodalidade e produção de significados em ambientes digitais

A existência de múltiplas representações não se confunde integralmente com a multimodalidade. Enquanto a primeira diz respeito à coexistência de diferentes formas de representar determinado conhecimento, a segunda está relacionada ao uso articulado de diferentes modos semióticos na produção e na comunicação de significados.

Na perspectiva da semiótica social, um modo corresponde a um recurso social e culturalmente organizado para produzir significados. Escrita, imagem, fala, som, cor, movimento, disposição espacial e gesto podem funcionar como modos semióticos, cada um apresentando potencialidades específicas de expressão e comunicação (Kress, 2010).

Os modos não são compreendidos como recipientes neutros de um conteúdo previamente estabelecido. Cada modo organiza o significado de maneira particular. A escrita tende a favorecer determinadas formas de sequência e explicitação verbal; a imagem permite apresentar relações espaciais e visuais; o movimento pode evidenciar transformação, direção ou continuidade; a disposição espacial pode estabelecer aproximações, separações, hierarquias ou correspondências; o som pode funcionar como alerta, confirmação ou marcação de um evento.

Kress (2010) argumenta que a produção de significados em textos contemporâneos ocorre frequentemente pela articulação entre diversos modos. Dessa forma, o significado de um objeto multimodal não se encontra integralmente

em um único elemento, mas emerge das relações estabelecidas entre os diferentes recursos semióticos que compõem sua organização.

Jewitt (2016) reforça que a análise multimodal precisa considerar tanto os modos empregados quanto sua configuração conjunta. Isso implica investigar quais modos estão presentes, como são distribuídos, quais assumem maior destaque, que funções desempenham e de que maneira se relacionam na construção do conjunto comunicacional.

Essa perspectiva mostra-se particularmente adequada para analisar simuladores virtuais. Esses ambientes podem combinar textos orientadores, símbolos químicos, modelos visuais, cores, números, gráficos, movimentos, animações, sons, botões e respostas interativas em uma mesma interface. A análise isolada de cada elemento não permite compreender integralmente o funcionamento representacional do sistema, pois os significados são produzidos também por sua disposição espacial, simultaneidade, sequência e coordenação.

Em um simulador de balanceamento de equações químicas, por exemplo, o significado não é comunicado apenas pelas fórmulas químicas. Ele pode ser construído pela relação entre coeficientes numéricos, modelos de moléculas, indicadores de igualdade, movimentos de uma balança, cores, mensagens textuais e feedbacks visuais e textuais. Cada elemento exerce determinada função, mas a organização representacional do ambiente depende de como esses componentes atuam de maneira articulada.

A multimodalidade também possibilita compreender que diferentes elementos presentes na interface não correspondem necessariamente a representações químicas propriamente ditas. Botões, menus, divisórias, cores de fundo, áreas de seleção e elementos gráficos podem não representar diretamente um fenômeno químico, mas organizar o contexto no qual as representações são apresentadas e relacionadas.

Essa distinção fundamenta a Arquitetura Imagético-Contextual proposta nesta pesquisa. A AIC não busca classificar todos os elementos da interface como macroscópicos, submicroscópicos ou simbólicos. Seu objetivo consiste em analisar como a composição visual, espacial, funcional e interativa estabelece o contexto de significação no qual as representações químicas são disponibilizadas.

A organização espacial, por exemplo, pode aproximar duas representações consideradas correspondentes ou separá-las em áreas distintas.

Cores podem identificar entidades equivalentes ou diferenciar grupos. Linhas e setas podem indicar direção, relação ou transformação. A simultaneidade entre som e movimento pode demarcar a ocorrência de um evento. Dessa maneira, características aparentemente periféricas da interface podem participar da organização das relações representacionais.

A análise multimodal exige ainda diferenciar integração de mera acumulação. Um ambiente pode conter texto, imagem, som e animação sem que esses modos estabeleçam relações coerentes entre si. A presença de diversos modos não garante que eles sejam complementares ou que contribuam para uma organização representacional integrada. Em alguns casos, elementos adicionais podem ser redundantes; em outros, podem competir pela atenção, apresentar informações desconectadas ou produzir ambiguidades.

Por essa razão, a multimodalidade não deve ser tratada, nesta pesquisa, como uma qualidade automaticamente positiva. Ela constitui uma característica estrutural do ambiente que precisa ser analisada em relação à função desempenhada pelos diferentes modos e às relações estabelecidas entre eles.

A multimodalidade sustenta diretamente a análise da Dinâmica Representacional e da Relação Temporal. O movimento constitui um modo relevante nos ambientes digitais, pois pode mostrar alterações, deslocamentos e transformações. Entretanto, sua função somente pode ser compreendida quando relacionada a outros modos, como símbolos, textos, imagens e sons. Da mesma forma, a temporalidade organiza quando e em que sequência esses elementos aparecem, desaparecem ou se modificam.

A complementação representacional, incluída na dimensão Modulação Representacional, também encontra fundamento nessa perspectiva. Textos, legendas, indicadores, escalas, sons e sinais gráficos podem complementar uma representação química sem constituírem, isoladamente, um novo nível de representação. Esses recursos podem nomear, orientar, comparar, confirmar ou delimitar aspectos do sistema apresentado.

A operacionalização adotada nesta pesquisa é audiovisual e multimodal. Além de escrita, símbolos, diagramas, imagens, espacialidade e movimento, o canal sonoro é considerado quando houver emissão audível e rastreável no vídeo. O som não constitui uma nova dimensão analítica: funciona como variável descritiva transversal às unidades de registro e às dimensões já definidas. Sua unidade substantiva é a

categoria de ação ou evento do simulador, e não cada impulso acústico repetido. Cliques equivalentes que, sob condição comparável, geram a mesma resposta visual e sonora são desconsiderados da contagem e mantidos apenas como confirmação de estabilidade; uma variante só é criada quando muda a função, o estado do sistema ou a resposta produzida. Para cada categoria, registram-se timecodes representativos, fonte provável ou verificada, natureza verbal ou não verbal, descrição ou transcrição, audibilidade, estabilidade nas repetições e relação com a ação, a imagem e a resposta do sistema. Duração, intensidade e agrupamento podem auxiliar a distinguir sinais, mas não são convertidos em indicadores de importância. A voz do pesquisador, ruídos ambientes e sons externos são distinguidos do áudio interno antes de qualquer atribuição funcional.

Assim, a abordagem multimodal amplia o modelo de Johnstone ao possibilitar a análise das condições semióticas e contextuais nas quais os níveis químicos são organizados. Enquanto Johnstone permite identificar a natureza química das representações, a multimodalidade permite compreender como diferentes recursos visuais, verbais, espaciais, cinéticos e interativos participam de sua apresentação e articulação.

3.2.3 Simuladores como sistemas representacionais digitais, dinâmicos e interativos

As representações presentes em materiais impressos são geralmente examinadas em estados relativamente estáveis. Diagramas, fórmulas, gráficos e imagens permanecem disponíveis sem alterações determinadas pelo próprio suporte. Nos simuladores virtuais, por outro lado, as representações podem assumir comportamento dinâmico, modificando-se ao longo do tempo ou em resposta a operações previstas pelo ambiente.

A representação dinâmica não deve ser definida somente pela presença de movimento. Uma animação decorativa, a movimentação de um botão ou uma transição visual entre telas podem não implicar transformação do conhecimento químico representado. Para que haja dinâmica representacional, a alteração

observada deve modificar estados, propriedades, relações, quantidades ou configurações vinculadas ao objeto químico apresentado.

Lowe (2003) diferencia as informações fornecidas por gráficos dinâmicos daquelas apresentadas por representações estáticas. As animações podem tornar explícitas mudanças temporais que, em imagens fixas, precisariam ser inferidas a partir de uma sequência ou de sinais gráficos. Entretanto, o movimento não é intrinsecamente superior à representação estática, uma vez que elementos visualmente salientes podem se destacar sem corresponder necessariamente aos aspectos conceitualmente mais relevantes.

Essa consideração é importante para a presente pesquisa, pois impede que toda animação seja automaticamente interpretada como evidência de elevado potencial representacional. É necessário investigar o que se transforma, como a transformação ocorre, quais elementos permanecem estáveis e que relações conceituais são explicitadas pela mudança.

Nos simuladores, a dinâmica pode envolver diferentes tipos de alteração. Valores quantitativos podem ser atualizados, moléculas podem ser acrescentadas ou removidas, equações podem ser modificadas, partículas podem mudar de posição, gráficos podem ser redesenhados e indicadores podem responder a uma nova configuração. Essas alterações podem ocorrer de forma contínua ou discreta, simultânea ou sequencial, automática ou dependente de uma ação.

A transformação de estados constitui uma característica central desses ambientes. Cada configuração apresentada pelo simulador pode ser compreendida como um estado representacional, constituído por determinado conjunto de elementos, valores e relações. Uma ação prevista pelo sistema pode produzir a passagem para outro estado, fazendo com que algumas representações sejam alteradas e outras permaneçam constantes.

Nesse processo, a resposta interativa corresponde à atualização produzida pelo ambiente em decorrência de uma operação. A ação realizada durante a exploração funcional não é analisada como comportamento ou estratégia do pesquisador. Ela funciona metodologicamente como meio para revelar quais alterações estão incorporadas ao sistema e quais relações entre ação e resposta foram programadas no design do simulador.

A temporalidade, portanto, não constitui somente uma característica técnica do registro audiovisual funcional. Ela participa da própria organização

representacional. Determinadas relações podem ser apresentadas simultaneamente, permitindo comparação imediata; outras podem surgir em sequência, fazendo com que um evento anteceda ou desencadeie outro. Também podem ocorrer sincronizações entre movimentos, alterações simbólicas, indicadores visuais e feedbacks textuais.

A relação temporal entre as representações pode apresentar diferentes configurações. Uma modificação no coeficiente de uma equação pode produzir simultaneamente a alteração do número de moléculas e de um indicador de balanceamento. Em outro simulador, a ação pode gerar primeiro uma transformação visual e, posteriormente, a atualização de valores ou textos. Essas diferenças constituem propriedades do sistema representacional e podem influenciar o modo como as relações químicas são disponibilizadas, sem que seja necessário inferir como um usuário específico as compreende.

A interatividade acrescenta outra dimensão aos ambientes digitais. Diferentemente de uma animação linear, que apresenta uma sequência previamente definida sem possibilidade de alteração, o simulador permite que certas ações modifiquem condições, variáveis ou representações. A interatividade implica, portanto, a existência de possibilidades de ação incorporadas ao sistema e de respostas previstas pelo ambiente.

O conceito de *affordance* pode contribuir para essa discussão, desde que utilizado com cautela. Em sentido amplo, o termo refere-se às possibilidades de ação oferecidas por determinado ambiente ou objeto. No contexto desta pesquisa, interessa principalmente a dimensão incorporada ao design: aquilo que o simulador disponibiliza para ser alterado, explorado, combinado ou construído.

A análise dessas possibilidades não equivale à investigação de como cada usuário percebe ou utiliza o ambiente. Um simulador pode disponibilizar determinado controle mesmo que ele não seja acionado em todas as situações. Da mesma forma, a existência de uma possibilidade interativa não permite afirmar que ela produzirá aprendizagem. O foco analítico permanece nas condições de manipulação e transformação previstas no próprio sistema.

A interatividade pode apresentar diferentes graus e funções. Em alguns casos, permite apenas selecionar entre opções previamente estabelecidas. Em outros, possibilita modificar valores dentro de intervalos definidos, comparar estados, testar combinações ou construir novas configurações representacionais. Essas

diferenças fundamentam a distinção entre potencial manipulativo, exploratório e construtivo adotada nesta investigação.

O potencial manipulativo refere-se à possibilidade de alterar parâmetros, valores ou componentes representacionais. O potencial exploratório diz respeito às condições oferecidas para observar consequências, comparar configurações e investigar relações. O potencial construtivo corresponde à possibilidade de produzir ou reorganizar representações, ainda que dentro dos limites programados pelo ambiente.

É importante reconhecer que toda interatividade é condicionada. O usuário não pode realizar qualquer ação, mas apenas aquelas previstas pelo sistema. Os controles, intervalos, respostas, sequências e combinações possíveis são definidos pelo design. Dessa forma, as possibilidades interativas também revelam escolhas representacionais: aquilo que pode ser manipulado recebe determinada centralidade, enquanto aspectos não disponibilizados permanecem estáveis, implícitos ou ausentes.

Essa característica relaciona interatividade e modulação. Ao definir quais variáveis podem ser alteradas, o simulador seleciona determinados aspectos do conhecimento químico como relevantes para a exploração. Ao limitar intervalos, impedir configurações ou emitir feedbacks, também estabelece restrições. Ao acrescentar indicadores, mensagens, escalas ou respostas visuais, produz complementações.

Os ambientes digitais devem, portanto, ser compreendidos como sistemas nos quais representação, dinâmica, temporalidade e interatividade estão articuladas. Uma alteração não ocorre isoladamente, mas pode desencadear atualizações em diferentes registros. A equação, o modelo visual, o gráfico e o indicador podem responder conjuntamente a uma mesma operação, formando uma rede de correspondências dinâmicas.

Essa perspectiva fundamenta a Dinâmica Representacional, destinada a investigar as transformações das representações; a Relação Temporal, voltada à simultaneidade, sequência e sincronização; e o Potencial Interativo-Representacional, relacionado às possibilidades manipulativas, exploratórias e construtivas incorporadas ao ambiente.

Também sustenta a Configuração Representacional Dominante, pois as transformações e possibilidades interativas podem revelar qual lógica organiza

predominantemente o simulador. Um ambiente pode apresentar diversas representações, mas concentrar suas ações e atualizações em torno de equações, modelos de partículas, gráficos ou fenômenos macroscópicos.

Por fim, essa fundamentação contribui para a construção do Potencial Didático-Representacional. Esse potencial não corresponde à aprendizagem efetivamente produzida nem à eficácia pedagógica do recurso. Refere-se às possibilidades representacionais, relacionais e exploratórias; condições de realização; e limitações representacionais.

Assim, considerar os simuladores como sistemas representacionais digitais, dinâmicos e interativos permite compreender que sua especificidade não se encontra somente na quantidade de elementos apresentados, mas na maneira como esses elementos são organizados, transformados, sincronizados, restringidos e disponibilizados à ação.

As perspectivas discutidas nesta seção ampliam o fundamento teórico da pesquisa ao evidenciar que a análise de simuladores virtuais de Química não pode se restringir à identificação dos níveis macroscópico, submicroscópico e simbólico.

Embora esses níveis permaneçam essenciais para caracterizar a natureza das representações químicas, os ambientes digitais também exigem a investigação da variedade de formas intranível, das correspondências conceituais, das configurações multimodais, das transformações representacionais, das relações temporais, das restrições, das complementações e das possibilidades interativas incorporadas ao sistema.

A articulação entre o modelo de Johnstone, os estudos sobre múltiplas representações, a abordagem multimodal e as discussões sobre visualizações dinâmicas oferece, portanto, o fundamento teórico necessário para o modelo analítico apresentado no capítulo metodológico.

4 METODOLOGIA

A presente pesquisa insere-se no campo da Educação em Ciências, particularmente no Ensino de Química, adotando uma abordagem qualitativa de natureza documental e analítica, com tratamento quantitativo descritivo complementar. A investigação busca compreender os modos pelos quais simuladores virtuais de Química estruturam, organizam e disponibilizam representações do conhecimento químico, considerando esses ambientes digitais como sistemas multimodais de produção de significado.

Nesse sentido, o percurso metodológico foi estruturado em três movimentos articulados: (i) caracterização da natureza da pesquisa e constituição do corpus documental; (ii) desenvolvimento e aplicação de um modelo analítico voltado à investigação da organização representacional do conhecimento químico nos simuladores virtuais; e (iii) organização, codificação, tratamento e interpretação dos dados produzidos a partir da análise dos simuladores.

A pesquisa adotou como fundamento metodológico a análise de conteúdo proposta por Bardin (2016), compreendida como um conjunto sistemático de procedimentos destinado à análise das comunicações, possibilitando a descrição, categorização e interpretação de elementos presentes em diferentes materiais comunicacionais. A escolha dessa abordagem justifica-se pela necessidade de estabelecer procedimentos rigorosos de organização e interpretação de um corpus constituído por objetos digitais multimodais, nos quais diferentes sistemas de representação participam da construção de significados.

Embora historicamente associada à análise de textos escritos, a análise de conteúdo não se restringe à linguagem verbal, podendo ser aplicada a diferentes formas de comunicação desde que sejam estabelecidas unidades analíticas, critérios de categorização e procedimentos sistemáticos de interpretação (Bardin, 2016). Essa característica torna-se particularmente relevante nesta investigação, uma vez que os simuladores virtuais de Química analisados articulam diferentes modos comunicativos, incluindo linguagem verbal, representações simbólicas, imagens, modelos visuais, movimentos, animações e possibilidades interativas.

A natureza multimodal dos simuladores virtuais exige considerar que a produção de significado nesses ambientes não ocorre exclusivamente pela linguagem escrita ou simbólica, mas pela articulação entre diferentes modos semióticos. Segundo Kress (2010), os processos contemporâneos de comunicação envolvem múltiplos modos de representação, nos quais elementos visuais, espaciais, gestuais e verbais atuam conjuntamente na construção de significados. Nesse sentido, os simuladores virtuais podem ser compreendidos como ambientes digitais multimodais, nos quais diferentes recursos representacionais são organizados para comunicar fenômenos e conceitos científicos.

Essa compreensão aproxima-se dos estudos da multimodalidade desenvolvidos por Jewitt (2016), segundo os quais a análise de objetos comunicacionais complexos deve considerar não apenas os elementos isolados, mas também as relações estabelecidas entre diferentes modos de significação. Assim, nesta pesquisa, a análise de conteúdo foi aplicada considerando os simuladores virtuais como documentos digitais multimodais, nos quais os elementos visuais, simbólicos, dinâmicos e interativos constituem unidades comunicacionais passíveis de análise.

A abordagem adotada caracteriza-se como predominantemente qualitativa, uma vez que busca interpretar como os simuladores virtuais organizam representações do conhecimento químico e quais relações são estabelecidas entre essas representações. Procedimentos quantitativos de caráter descritivo são empregados somente para delimitar o repertório de formas, categorias, módulos e estados ou para documentar coberturas comparáveis. No canal sonoro, o interesse recai sobre a presença e a função do som em categorias de ação ou evento; o número de cliques e de emissões repetidas não constitui medida analítica.

A dimensão quantitativa, nesse contexto, não possui finalidade estatística inferencial, mas constitui recurso complementar para sistematizar categorias e coberturas do corpus quando as bases são equivalentes. A dimensão qualitativa permanece como eixo central, porque a interpretação depende das relações entre representações, ações e respostas do sistema. As repetições deliberadas no vídeo são tratadas como controle de estabilidade: cliques equivalentes que geram a mesma resposta permanecem uma única unidade categorial, ainda que tenham sido acionados várias vezes.

Conforme destaca Minayo (2014), pesquisas qualitativas em educação e ciências humanas buscam compreender fenômenos considerando seus significados, relações e contextos de produção. Dessa forma, a presente investigação não pretende avaliar diretamente processos de aprendizagem dos estudantes ou a eficácia pedagógica dos simuladores, mas compreender as características representacionais desses ambientes e as potencialidades emergentes de sua organização.

4.1 Natureza e abordagem da pesquisa

A presente investigação insere-se no campo da Educação em Ciências, particularmente no Ensino de Química, e caracteriza-se como uma pesquisa de abordagem predominantemente qualitativa, de natureza documental, com finalidade analítica e interpretativa. Seu propósito consiste em compreender como simuladores virtuais de Química estruturam, organizam, articulam e disponibilizam representações do conhecimento químico em ambientes digitais multimodais e interativos.

A abordagem qualitativa mostra-se adequada aos objetivos da pesquisa porque a análise não se limita à identificação ou à quantificação dos elementos presentes nos simuladores, mas busca interpretar as funções desempenhadas por esses elementos e as relações estabelecidas entre diferentes formas de representação. Desse modo, a investigação concentra-se na organização representacional dos ambientes digitais, considerando seus componentes visuais, simbólicos, verbais, dinâmicos, temporais e interativos, bem como as formas pelas quais esses componentes participam da produção de significados químicos.

Conforme Minayo (2014), a pesquisa qualitativa ocupa-se de fenômenos que envolvem significados, relações e processos que não podem ser plenamente compreendidos por meio de procedimentos exclusivamente quantitativos. Nessa perspectiva, o caráter interpretativo da presente investigação decorre da necessidade de examinar não apenas a presença de determinadas representações, mas também sua disposição na interface, suas articulações conceituais, suas transformações ao longo do tempo e suas relações com as possibilidades de interação incorporadas aos simuladores.

Quanto à sua natureza documental, a pesquisa fundamenta-se na análise sistemática de documentos digitais multimodais. De acordo com Gil (2022), a pesquisa documental utiliza materiais que ainda não receberam tratamento analítico ou que podem ser reinterpretados de acordo com os objetivos da investigação. Os simuladores virtuais são compreendidos, neste estudo, como sistemas digitais passíveis de análise documental, uma vez que materializam determinadas formas de selecionar, organizar, relacionar e comunicar conhecimentos químicos. Diferentemente de documentos estáticos, entretanto, esses ambientes apresentam conteúdos que podem ser atualizados, transformados ou articulados mediante a exploração de suas funcionalidades, exigindo procedimentos de registro capazes de preservar sua dimensão dinâmica e interativa.

O tratamento do material empírico fundamenta-se nos princípios da análise de conteúdo de Bardin (2016), entendida como um conjunto sistemático de procedimentos de organização, descrição, categorização e interpretação das comunicações. Embora tradicionalmente associada a materiais verbais, a análise de conteúdo pode ser aplicada a diferentes formas de comunicação, desde que sejam estabelecidos critérios explícitos para a delimitação do material, a definição das unidades de análise, a construção das categorias e a interpretação das evidências. Nesta pesquisa, esses princípios são mobilizados e adaptados à análise de documentos digitais multimodais, nos quais diferentes modos de significação atuam de forma simultânea e articulada.

A perspectiva multimodal complementa essa orientação metodológica ao reconhecer que a produção de significado não ocorre exclusivamente por meio da linguagem verbal. Conforme Kress (2010) e Jewitt, Bezemer e O'Halloran (2016), diferentes modos semióticos — como imagens, textos, sons, movimentos, disposições espaciais e recursos interativos — podem atuar conjuntamente na constituição de uma mensagem. Dessa forma, a análise considera tanto os componentes isoladamente observáveis quanto as relações estabelecidas entre eles no interior do sistema representacional de cada simulador.

Embora predominantemente qualitativa, a pesquisa incorpora procedimentos quantitativos de caráter exclusivamente descritivo e complementar para sistematizar repertórios, categorias, estados e coberturas comparáveis. Não se pretende realizar inferências estatísticas nem atribuir valores de eficácia aos simuladores. Especificamente para o áudio, contabiliza-se a diversidade e a distribuição das

categorias de ação ou evento em que o som está presente, ausente ou funcionalmente diferenciado; não se totalizam cliques repetidos como evidências independentes nem se usa frequência acústica como medida de qualidade.

A pesquisa não envolve a observação de estudantes, professores ou outros usuários, tampouco pretende avaliar diretamente aprendizagem, desempenho, motivação, usabilidade ou eficácia pedagógica. As ações realizadas durante a exploração dos simuladores são compreendidas exclusivamente como procedimentos metodológicos empregados para revelar propriedades, respostas e possibilidades representacionais previamente incorporadas ao sistema. Consequentemente, as interpretações produzidas referem-se à organização representacional dos simuladores e às condições potencialmente oferecidas por seu design, não aos efeitos que esses recursos produziram em situações concretas de ensino e aprendizagem.

4.2 Constituição e delimitação do corpus

A constituição do corpus correspondeu ao processo de localização, avaliação e seleção dos objetos submetidos à análise. Conforme Bardin (2016), essa delimitação deve assegurar pertinência, homogeneidade analítica e compatibilidade com os objetivos da investigação.

A consulta à categoria Química da plataforma PhET foi realizada em 1º de junho de 2026, na versão em português do Brasil. O levantamento inicial identificou trinta e três recursos e subsidiou uma seleção preliminar mais ampla. No decorrer da pesquisa, o corpus foi redimensionado para viabilizar uma análise intensiva, combinatória e comparativa, compatível com o tempo disponível e com a profundidade exigida pelo modelo analítico.

O corpus final é composto por três módulos do conjunto Balanceamento de Equações Químicas — Intro, Equações e Jogo. Eles compartilham endereço, identidade visual, convenções de interface e domínio temático, mas apresentam repertórios, regras de progressão e funções representacionais próprias. Por esse motivo, são tratados como simulações funcionalmente independentes e codificados como SVQ-A, SVQ-B e SVQ-C. O objeto foi consultado na versão pública em português do Brasil (PhET Interactive Simulations, [s. d.]).

O recorte foi intencional: a origem comum controla parte da variação contextual, enquanto as diferenças entre exploração introdutória, repertório ampliado de equações e desafios gamificados permitem examinar como um mesmo conhecimento químico é reconfigurado pelo desenho funcional.

Foram considerados como critérios de inclusão: disponibilidade pública e funcionamento no período de coleta; relação direta com conservação de átomos e balanceamento de equações; presença de representações simbólicas e/ou submicroscópicas; possibilidade de variação controlada de coeficientes; respostas visuais observáveis; e diferenciação funcional suficiente para sustentar análise individual e intercasos.

Foram excluídos do corpus final os demais simuladores inicialmente mapeados, não por ausência de qualidade ou pertinência educacional, mas por não integrarem o conjunto temático escolhido para a análise intensiva. O redimensionamento substitui amplitude amostral por profundidade analítica e não autoriza generalização estatística para a plataforma PhET ou para os simuladores virtuais de Química em geral.

Quadro 1 – Delimitação das três simulações funcionais que compõem o corpus da pesquisa

Código	Simulação funcional	Delimitação analítica principal
SVQ-A	Intro	Exploração introdutória de três reações, com variação de coeficientes e comparação entre formas auxiliares.
SVQ-B	Equações	Repertório ampliado de síntese, decomposição e combustão, com distinção visual entre balanceamento e simplificação.
SVQ-C	Jogo	Sequência de desafios com tentativas, pontuação, feedback audiovisual e regra de progressão pela menor proporção inteira.

Fonte: Elaboração própria (2026).

Como sintetiza o Quadro 1, a codificação individual preserva a autonomia dos três casos e explicita que Intro, Equações e Jogo constituem unidades funcionais distintas, embora pertençam ao mesmo conjunto temático. A comparação transversal é realizada somente após a conclusão de 5.1.1, 5.1.2 e 5.1.3, na Seção 5.2. O endereço do conjunto e sua identificação geral são apresentados no Anexo A.

Assim, a unidade de análise é cada simulação funcional; a unidade de integração é o conjunto temático Balanceamento de Equações Químicas. Essa

distinção evita tanto a fusão indevida dos módulos quanto a perda das relações que decorrem de sua origem comum.

4.3 Exploração audiovisual-funcional, corpus audiovisual e organização do material analítico

O material analítico primário é constituído por três vídeos produzidos por gravação de tela durante a exploração humana e deliberada da versão pública, em português do Brasil, do conjunto Balanceamento de Equações Químicas: SVQ-A/Intro, SVQ-B/Equações e SVQ-C/Jogo. Cada vídeo corresponde a uma simulação funcional e permanece uma unidade de análise independente.

A gravação não buscou reproduzir um percurso pedagógico de usuário. O operador acionou os campos e comandos necessários para tornar observáveis as respostas programadas pelo sistema. Houve repetições deliberadas de cliques sobre um mesmo tipo de controle para explicitar o efeito em tela e a ocorrência sonora correspondente. Essas repetições serviram à verificação da estabilidade da associação ação–resposta e foram colapsadas na codificação; não constituíram novas evidências substantivas. A ordem em que os campos foram acessados também não foi tratada como dado, preferência ou progressão. O tempo foi utilizado apenas para localizar os eventos no vídeo e reconstruir a microsequência estado anterior → ação → resposta audiovisual → estado resultante.

Na produção do vídeo SVQ-A, foi aberto o módulo Intro e foram acionados os controles de coeficientes, as escolhas de reação, as formas auxiliares de visualização e as funções de reinicialização ou navegação necessárias para revelar estados não balanceados e balanceados.

Na produção do vídeo SVQ-B, foi aberto o módulo Equações. O operador percorreu as classes Síntese, Decomposição e Combustão, selecionou equações, variou coeficientes, alternou as opções de visualização e registrou estados não balanceados, balanceados, simplificados e reinicializados.

Na produção do vídeo SVQ-C, foi aberto o módulo Jogo. O operador percorreu seleção de nível, ajuste de coeficientes, submissão, erro, nova tentativa ou explicação, acerto, avanço, pontuação, encerramento e retorno, de modo a registrar as principais classes de ação e resposta observáveis no percurso gamificado.

Nos três vídeos, foi preservado o áudio emitido pelo próprio simulador e não foi registrada fala do operador. Assim, a ação humana aparece apenas como condição técnica de exploração da interface, não como comportamento de participante. A fonte sonora declarada foi conferida pela relação entre os comandos, as mudanças visuais e as emissões audíveis; nenhuma resposta foi atribuída ao design somente com base em um impulso acústico isolado.

O corpus audiovisual é composto por três vídeos. O SVQ-A/Intro tem duração de 00:10:45,146, resolução de 1376×776 pixels, vídeo H.264 a aproximadamente 30 quadros por segundo e áudio AAC-LC estéreo, 48 kHz e 128 kb/s. O SVQ-B/Equações tem duração de 00:25:26,125, resolução de 1920×1080 pixels, vídeo H.264 a 24 quadros por segundo e áudio AAC-LC estéreo, 48 kHz e 128 kb/s. O SVQ-C/Jogo tem duração de 00:16:53,360, resolução de 1376×776 pixels, vídeo H.264 a aproximadamente 30 quadros por segundo e áudio AAC-LC estéreo, 48 kHz e 128 kb/s. A inspeção confirmou legibilidade visual, continuidade do áudio interno e correspondência de cada vídeo ao módulo indicado.

A cobertura combinatória foi organizada em duas escalas. Na primeira, enumeraram-se reações, intervalos de coeficientes e classes de estados acessíveis. Na segunda, estados funcionalmente equivalentes foram agrupados e combinados com cobertura dirigida das visualizações, ocultações e feedbacks. O procedimento evita confundir exaustividade analítica com repetição mecânica de configurações que produzem a mesma resposta visual.

Nos módulos Intro e Equações, cujo espaço de coeficientes é finito, a análise distingue estados não balanceados, balanceamentos mínimos e múltiplos proporcionais acessíveis. No Jogo, cujo banco de desafios é aleatorizado, a cobertura é amostral e orientada à saturação; não se afirma exaustão do repertório.

Cada linha das matrizes temporais inclui código da evidência, vídeo, timecode, estado inicial, comando, resposta audiovisual, elementos representacionais, dimensões analíticas mobilizadas e estatuto da evidência. Para o canal sonoro, a matriz é organizada por categoria de ação ou evento e acrescenta fonte, tipo, descrição ou transcrição, audibilidade, relação com a resposta visual, função inferida e limite da inferência. Quando há repetição deliberada, registram-se timecodes representativos suficientes para verificar a estabilidade; todos os cliques equivalentes que geram a mesma resposta são excluídos da contagem. Somente uma mudança de função, de estado ou de resposta justifica uma variante categorial. Os timecodes

operam como localizadores e não como variáveis de resultado; evidências não consecutivas podem compor a mesma categoria. As evidências são classificadas como verificadas, calculadas, amostrais ou inconclusivas, conforme a base disponível.

O áudio integra a unidade de análise como variável multimodal transversal, sem constituir uma oitava dimensão ou alterar as categorias do modelo. Uma ocorrência sonora pode ser tratada como elemento contextual ou multimodal, evento representacional ou resposta do sistema, conforme a função demonstrada no segmento. Sua presença, por si só, não autoriza classificação química, correspondência conceitual ou contribuição didática; cada atribuição deve permanecer vinculada à evidência e às regras decisórias do Capítulo 4.

A fonte sonora é registrada como áudio interno do simulador, fala do pesquisador, som ambiente ou externo, ou fonte indeterminada. Somente o áudio interno confirmado pode fundamentar afirmações sobre o design do simulador. A fala do pesquisador pode auxiliar a reconstrução documental da ação, mas não é considerada resposta do sistema nem evidência de aprendizagem, compreensão ou estratégia cognitiva. Sons ambientes, trilhas externas e interferências são mantidos no controle técnico e excluídos das inferências sobre o objeto.

A relação audiovisual é descrita quanto à ordem e à coordenação: ocorrência anterior, simultânea ou posterior à ação ou à mudança visual; sincrônica, assincrônica ou inconclusiva; e função observável de confirmação, erro, alerta, orientação, complementação, redundância, contraste ou ausência de relação demonstrável. Eventos verbais são transcritos literalmente quando inteligíveis; sons não verbais são descritos sem onomatopeias interpretativas e associados ao respectivo intervalo.

A condição técnica do áudio também integra a auditabilidade. Antes da codificação, verificam-se presença e continuidade da faixa, canais, volume relativo, trechos mudos, cortes, compressão e inteligibilidade. A ausência de emissão sonora só pode ser afirmada quando a faixa estiver íntegra, o áudio do sistema não estiver silenciado e a ação comparável tiver sido reproduzida ou observada em condições equivalentes; caso contrário, o estatuto é inconclusivo ou pendente.

Os três vídeos do corpus audiovisual foram auditados antes da consolidação dos resultados. Cada evidência recebeu o timecode do vídeo correspondente, associado a capturas de tela e, quando houve som, a descrições funcionais. Os localizadores foram conferidos no respectivo vídeo e utilizados somente para rastreabilidade.

A relação entre comando e resposta é preservada por sequências do tipo estado inicial → ação → atualização audiovisual → estado resultante. Movimentos de cursor, transições decorativas e sons sem função demonstrável são mantidos como contexto do registro, mas somente constituem unidades analíticas quando necessários para reconstruir o percurso funcional ou quando se articulam a uma categoria já definida.

A organização do material estabelece uma cadeia rastreável entre o vídeo SVQ-A/SVQ-B/SVQ-C, o módulo, a reação ou rodada, o timecode, o comando executado, a resposta audiovisual e a interpretação. Essa cadeia permite revisar decisões e delimitar com precisão o que foi observado, ouvido, calculado, amostrado ou mantido como pendência empírica.

4.4 Unidades de contexto e classificação das unidades de registro

A definição das unidades de análise foi orientada pelos princípios da análise de conteúdo, segundo os quais a organização do material empírico requer a delimitação das unidades de contexto e das unidades de registro utilizadas na codificação (Bardin, 2016). Essa delimitação foi adaptada à natureza dinâmica, multimodal e interativa dos simuladores, nos quais as ocorrências relevantes podem manifestar-se como elementos estáticos, transformações temporais, recursos contextuais, ações realizadas na interface ou respostas apresentadas pelo sistema.

Nesta pesquisa, cada simulador virtual de Química, considerado em sua totalidade e documentado no respectivo vídeo SVQ-A, SVQ-B ou SVQ-C, constitui uma unidade de contexto. A análise de imagem, fórmula, movimento, controle, mensagem ou som é realizada em articulação com o conteúdo químico, a tela ou módulo, as condições de interação e as demais representações presentes no mesmo evento audiovisual.

O registro audiovisual funcional correspondente a cada simulador preserva essa unidade de contexto em sua dimensão temporal e operacional. Ele permite reconhecer o estado inicial da interface, acompanhar as ações de exploração, observar as alterações produzidas e recuperar as relações entre os elementos que aparecem simultânea ou sucessivamente. As capturas de tela, por sua vez, documentam estados específicos dessa unidade de contexto, sem substituí-la.

As unidades de registro correspondem às ocorrências específicas identificadas nos registros audiovisuais funcionais e submetidas à codificação. Não se limitam a palavras, imagens ou sons isolados: compreendem manifestações visuais, verbais, simbólicas, sonoras, espaciais, temporais e interativas que contribuam para a organização e a comunicação do conhecimento químico ou para a compreensão do funcionamento representacional do simulador.

Para sistematizar sua identificação, as unidades de registro foram classificadas em cinco tipos: unidade representacional química, evento representacional, elemento contextual ou multimodal, ação de exploração e resposta do sistema.

4.4.1 Unidade representacional química

A unidade representacional química corresponde a uma manifestação identificável que apresenta, expressa ou modeliza um objeto, conceito, fenômeno, propriedade, relação ou processo pertinente ao conhecimento químico. Pode assumir forma visual, verbal, sonora, gráfica, matemática ou simbólica, desde que participe diretamente da construção do conteúdo químico disponibilizado pelo simulador; sinais auditivos meramente operacionais permanecem como elementos contextuais ou respostas do sistema.

Incluem-se nessa classificação, por exemplo, símbolos de elementos, fórmulas químicas, equações, estruturas moleculares, partículas, átomos, íons, representações de ligações, modelos moleculares, gráficos, escalas, valores de grandezas, indicadores de concentração, representações de estados físicos e imagens macroscópicas de substâncias ou sistemas materiais.

Uma mesma unidade representacional química pode combinar diferentes modos semióticos. A representação de uma molécula, por exemplo, pode reunir simultaneamente cores, formas geométricas, disposição espacial, movimento, símbolos e legendas. Nesses casos, a unidade foi delimitada pelo objeto ou pela relação química representada, enquanto seus diferentes modos de expressão foram descritos de acordo com as dimensões e categorias do modelo analítico.

A delimitação não dependeu exclusivamente da forma visual do elemento, mas de sua função no contexto do simulador. Assim, elementos graficamente semelhantes

puderam receber classificações distintas quando desempenhavam funções diferentes. Uma cor utilizada para distinguir elementos químicos, cargas ou regiões de uma molécula integra a unidade representacional química; a mesma cor, quando empregada apenas na organização visual da interface, pode constituir um elemento contextual.

4.4.2 Evento representacional

O evento representacional corresponde a uma ocorrência que se desenvolve ao longo do tempo e modifica, articula ou transforma uma ou mais unidades representacionais químicas. Diferentemente da unidade representacional observada em determinado estado da interface, o evento exige o acompanhamento de uma sequência temporal para ser reconhecido e interpretado.

Foram considerados eventos representacionais, por exemplo, a aproximação ou o afastamento de partículas, a formação ou ruptura de estruturas, a mudança de estado físico, a alteração da geometria de uma molécula, o deslocamento de espécies químicas, a variação de um gráfico, a mudança de cor de uma solução, a reorganização de coeficientes em uma equação ou a transição entre estados representacionais.

O evento pode ocorrer automaticamente, decorrer de uma ação de exploração ou resultar da combinação de diferentes condições estabelecidas na interface. Sua delimitação compreende o intervalo necessário para reconhecer a transformação, incluindo, quando pertinente, o estado anterior, o desenvolvimento da mudança e o estado resultante.

Quando uma transformação era acompanhada por alterações simultâneas em diferentes formas de representação — por exemplo, mudança na visualização de partículas, no valor numérico e no gráfico —, o conjunto foi tratado como um evento representacional articulado. As manifestações particulares puderam ser registradas separadamente para fins de codificação, sem perder sua vinculação ao mesmo acontecimento temporal.

4.4.3 Elemento contextual ou multimodal

O elemento contextual ou multimodal corresponde a um componente que auxilia a interpretação, a orientação, a navegação ou a articulação das representações, ainda que não constitua, isoladamente, uma representação química. Sua relevância decorre da função desempenhada na organização da interface e na produção de condições para a compreensão das ocorrências observadas.

Essa classificação inclui títulos, legendas, instruções, rótulos, caixas de texto, setas, destaques, cores funcionais, sinais visuais de confirmação ou erro, marcações espaciais, abas, campos de seleção e outros recursos que contextualizem ou relacionem as representações apresentadas. Também abrange elementos que estabeleçam correspondências entre diferentes modos semióticos, como uma legenda que associa determinada cor a uma espécie química ou um destaque textual que acompanha uma alteração visual.

A classificação de um componente como contextual ou multimodal não significa que ele seja secundário ou irrelevante. Em determinadas ocorrências, esses elementos podem ser decisivos para indicar relações, diferenciar estados, orientar a leitura ou tornar explícito o significado de uma representação. Por essa razão, sua análise considerou tanto sua presença quanto a maneira pela qual se articulava às unidades representacionais químicas e aos eventos representacionais.

Elementos exclusivamente operacionais, como botões, seletores e barras de controle, foram registrados como elementos contextuais quando sua forma, disposição ou rotulagem contribuía para a organização multimodal da interface. O ato de utilizá-los, entretanto, foi classificado separadamente como ação de exploração.

4.4.4 Ação de exploração

A ação de exploração corresponde à intervenção metodológica realizada durante a navegação pelo simulador para revelar uma funcionalidade, alterar uma condição ou tornar observável determinada ocorrência. Entre essas ações estão

clicar, selecionar, arrastar, inserir, remover, aproximar, afastar, modificar valores, ativar ou desativar opções, alternar telas, reiniciar configurações e acionar controles.

Essas ações não foram analisadas como comportamentos de usuário nem como evidências de aprendizagem, habilidade ou estratégia cognitiva. Sua função foi exclusivamente metodológica: produzir condições para observar as possibilidades representacionais e funcionais incorporadas ao simulador. Consequentemente, a ação de exploração foi registrada principalmente para estabelecer o antecedente operacional de uma transformação ou resposta do sistema.

A mesma ação física pode exercer funções distintas conforme o contexto. O deslocamento de uma barra, por exemplo, pode alterar a temperatura, a concentração, o volume ou outra variável. Por essa razão, as ações foram descritas considerando o controle acionado, a variável modificada e a finalidade da exploração, e não apenas o gesto realizado.

Sempre que pertinente, registrou-se o estado anterior à ação, a própria ação e o estado posterior. Essa organização permitiu identificar relações entre intervenção e consequência sem pressupor, contudo, que toda alteração observada decorresse exclusivamente de uma única ação, sobretudo nos casos em que o simulador apresentava processos contínuos ou múltiplas variáveis interdependentes.

4.4.5 Resposta do sistema

A resposta do sistema corresponde à consequência observável ou audível produzida pelo simulador após uma ação de exploração ou uma alteração das condições internas da simulação. Pode manifestar-se por mudanças visuais, sonoras, simbólicas, numéricas, verbais, espaciais ou dinâmicas. A atribuição de uma resposta sonora ao sistema exige que sua fonte seja distinguível da narração e de interferências do registro.

São exemplos de respostas do sistema: alteração de valores, reorganização de partículas, modificação de cores, atualização de gráficos, aparecimento ou desaparecimento de elementos, emissão de sons, apresentação de mensagens, bloqueio de ações, indicação de acerto ou erro e transição para outro estado da simulação.

A resposta do sistema distingue-se do evento representacional por sua função analítica. Enquanto o evento representacional designa uma transformação temporal dotada de conteúdo representacional, a resposta do sistema identifica a consequência funcional de uma ação ou condição. Uma mesma ocorrência pode, portanto, ser classificada simultaneamente como resposta do sistema e evento representacional quando a consequência funcional também expressa uma transformação relevante do conhecimento químico.

Por exemplo, ao elevar a temperatura por meio de um controle, o aumento da movimentação das partículas pode ser registrado como resposta do sistema porque decorre da alteração realizada e, simultaneamente, como evento representacional porque representa dinamicamente uma relação entre temperatura e agitação das partículas. A dupla classificação não constitui redundância, pois cada código descreve uma função analítica distinta da mesma ocorrência.

4.4.6 Relações entre as unidades de registro

As cinco classes não foram concebidas como conjuntos necessariamente excludentes. Nos simuladores multimodais e interativos, uma mesma ocorrência pode desempenhar mais de uma função, dependendo do aspecto examinado. Por essa razão, admitiu-se a codificação múltipla quando sustentada pelas evidências do registro audiovisual funcional e pela definição operacional das categorias.

O Quadro 2 sintetiza a função de cada tipo de unidade de registro.

Quadro 2 – Classificação das unidades de registro

Tipo de unidade	Definição operacional	Exemplos	Função na análise
Unidade representacional química	Manifestação que representa diretamente um objeto, conceito, propriedade, relação ou processo químico	Átomo, molécula, fórmula, equação, partícula, gráfico ou escala	Identificar como o conhecimento químico é materializado
Evento representacional	Transformação representacional que se desenvolve no tempo	Movimento de partículas, mudança de estado, alteração de gráfico ou reorganização molecular	Examinar processos, transições e articulações temporais
Elemento contextual ou multimodal	Componente que orienta, contextualiza ou relaciona as representações	Legenda, rótulo, instrução, seta, cor funcional, fala, sinal sonoro ou mensagem textual	Analisar recursos que apoiam e organizam a produção de significado
Ação de exploração	Intervenção metodológica realizada para revelar estados e funcionalidades	Clicar, selecionar, arrastar, modificar valores ou alternar telas	Identificar a condição operacional que antecede uma ocorrência
Resposta do sistema	Consequência observável produzida pelo simulador	Mudança visual ou sonora, atualização numérica, mensagem, confirmação, erro ou bloqueio	Relacionar as ações e condições às alterações apresentadas pelo sistema

Fonte: Elaboração própria (2026).

As relações entre essas unidades podem ser organizadas, para fins analíticos, pela sequência **estado inicial–ação–resposta–estado resultante**. Essa sequência não foi imposta a todas as ocorrências, pois alguns elementos permanecem estáveis e determinados eventos ocorrem automaticamente. Quando aplicável, entretanto, ela permitiu reconstruir o encadeamento funcional pelo qual uma ação de exploração produziu uma resposta do sistema e tornou visível uma unidade ou um evento representacional.

A delimitação de cada ocorrência considerou critérios espaciais, temporais e funcionais. O critério espacial foi empregado quando a unidade podia ser reconhecida em uma área específica da interface; o temporal, quando sua compreensão dependia de um instante ou intervalo do vídeo; e o funcional, quando sua identificação decorria do papel desempenhado na relação entre ação, representação e resposta. Uma unidade foi considerada encerrada quando ocorreu

mudança significativa de estado, de função, de configuração ou de condição representacional.

Na planilha ou instrumento de codificação, cada ocorrência foi vinculada ao código do simulador, à tela ou ao módulo correspondente e à marcação temporal do registro audiovisual funcional. Quando necessário, também foram anotados a ação que antecedeu a ocorrência, a resposta apresentada pelo sistema, as unidades representacionais envolvidas, os elementos contextuais associados e a captura de tela selecionada como evidência.

Essa sistematização permitiu preservar a singularidade das ocorrências sem perder sua relação com a totalidade do simulador. A unidade de contexto assegurou a interpretação contextualizada, enquanto as unidades de registro possibilitaram segmentar, classificar e comparar os componentes estáticos, dinâmicos, multimodais e funcionais identificados no corpus. Sobre essa base, foram aplicadas as dimensões e categorias que compõem o modelo analítico da pesquisa.

4.5 Eixo contextual preliminar: Arquitetura Imagético-Contextual (AIC)

Antes da aplicação das dimensões primárias do modelo analítico, cada simulador foi examinado por meio do eixo contextual preliminar denominado Arquitetura Imagético-Contextual (AIC). Esse eixo caracteriza a organização visual, sonora, espacial, funcional, multimodal e interativa do ambiente em que as representações químicas são disponibilizadas. Embora a denominação AIC seja preservada por coerência conceitual e documental, sua operacionalização considera o canal sonoro como parte do contexto multimodal quando sustentado pelo registro.

A AIC não constitui uma das dimensões primárias do modelo, pois não incide diretamente sobre propriedades representacionais específicas, como a presença e a coocorrência de níveis representacionais, a variedade de formas, as correspondências conceituais, as transformações dinâmicas, as relações temporais, as modulações ou as possibilidades de manipulação. Sua função é anterior e contextual: reconhecer as condições estruturais sob as quais essas propriedades se manifestam e fornecer uma visão geral do simulador antes da análise das ocorrências particulares.

A adoção desse eixo decorre do entendimento de que as representações não aparecem de maneira isolada. Elas estão inseridas em uma interface composta por áreas de visualização, controles, menus, abas, instruções, legendas, indicadores e outros componentes que interferem na forma como o conteúdo químico é apresentado, relacionado e disponibilizado para exploração. Dessa maneira, a compreensão da organização representacional requer inicialmente a identificação do ambiente no qual as unidades e os eventos representacionais se manifestam.

A aplicação da AIC tomou cada simulador, considerado em sua totalidade, como unidade de contexto. Sua caracterização foi realizada com base no registro audiovisual funcional e, quando necessário, complementada pelas capturas de tela extraídas dos registros. Foram observados tanto os elementos presentes no estado inicial da interface quanto aqueles que se tornaram acessíveis durante a exploração de telas, abas, módulos e funcionalidades.

A análise por meio da AIC contemplou os seguintes aspectos:

- a) a estrutura geral da interface;
- b) a divisão do simulador em telas, abas, módulos ou etapas;
- c) a distribuição espacial das áreas de visualização, informação, controle e manipulação;
- d) os mecanismos de navegação entre diferentes partes do simulador;
- e) a localização e a organização dos controles interativos;
- f) a presença de títulos, instruções, rótulos, legendas, escalas e indicadores;
- g) a utilização de cores, formas, sons, destaques e outros recursos multimodais;
- h) a disposição relativa das diferentes representações químicas;
- i) as condições iniciais de visualização e exploração;
- j) a relação funcional entre os controles disponíveis e as áreas representacionais afetadas.

Esses aspectos foram examinados de maneira integrada, considerando que a mesma característica da interface pode desempenhar simultaneamente funções espaciais, informacionais, operacionais e representacionais. Uma legenda, por exemplo, pode orientar a interpretação de cores utilizadas na representação de espécies químicas; uma barra deslizante pode modificar determinada variável e, ao mesmo tempo, indicar visualmente o intervalo de valores disponível; uma aba pode organizar diferentes representações ou separar etapas de exploração.

A caracterização da AIC foi orientada pelas seguintes questões:

- a) como o ambiente visual e funcional do simulador está organizado?;
- b) quais áreas, telas ou módulos compõem sua estrutura?;
- c) onde e de que maneira as representações químicas são disponibilizadas?;
- d) como os controles se relacionam espacial e funcionalmente com as representações?;
- e) quais elementos verbais, visuais e interativos orientam a exploração?;
- f) como a organização da interface aproxima, separa ou articula diferentes formas representacionais?;
- g) quais condições estruturais precisam ser consideradas para interpretar as ocorrências identificadas?

A AIC não foi empregada para avaliar a qualidade estética da interface nem para classificar os simuladores como visualmente melhores ou piores. Aspectos como cores, distribuição espacial, composição gráfica e organização dos controles foram considerados somente quando apresentavam função contextual, representacional, multimodal ou operacional relevante para os objetivos da investigação.

Do mesmo modo, a caracterização desse eixo não correspondeu a uma análise de usabilidade, acessibilidade ou experiência do usuário. Embora determinados componentes possam influenciar a navegação, não foram investigados o desempenho dos usuários, a facilidade de utilização, a aprendizagem, a satisfação ou a eficiência pedagógica dos recursos. O interesse esteve concentrado na maneira como a arquitetura da interface estrutura as condições de apresentação, articulação e exploração das representações químicas.

A análise também não pressupôs que uma organização mais complexa ou uma quantidade maior de componentes resultasse em maior qualidade representacional. A presença de telas, controles, textos, sons ou elementos gráficos foi descrita de acordo com sua função no contexto de cada simulador. Assim, buscou-se evitar tanto julgamentos baseados na quantidade de recursos quanto inferências não sustentadas pelo material empírico.

Para sistematizar essa caracterização, as informações relativas à AIC foram registradas de acordo com os componentes apresentados no Quadro 3.

Os componentes apresentados no quadro não foram empregados como categorias fechadas ou mutuamente excludentes. Sua função foi orientar uma descrição sistemática e comparável da arquitetura de cada simulador. Quando um

elemento desempenhava mais de uma função, sua caracterização considerou as diferentes relações estabelecidas no contexto da interface.

A AIC foi aplicada uma vez à totalidade de cada simulador, antes da codificação analítica das unidades e dos eventos representacionais. Seu resultado consistiu em uma descrição contextual geral, utilizada para identificar a estrutura do recurso, localizar as ocorrências no registro audiovisual funcional e interpretar adequadamente as relações entre representações, controles, ações de exploração e respostas do sistema.

Esse procedimento preliminar também permitiu evitar a análise descontextualizada de elementos particulares. Uma fórmula, imagem, animação, gráfico ou valor numérico, por exemplo, foi interpretado considerando a área da interface em que aparecia, os elementos que o acompanhavam, os controles relacionados e as condições necessárias para sua manifestação. A AIC forneceu, assim, a base contextual para a aplicação posterior das dimensões primárias.

Quadro 3 – Componentes de caracterização do eixo contextual preliminar AIC

Componente	Descrição operacional	Exemplos de ocorrências
Estrutura da interface	Organização geral do ambiente do simulador	Tela única, múltiplas telas, abas, módulos ou etapas
Organização espacial	Distribuição dos componentes na interface	Áreas de visualização, informação, controle e manipulação
Navegação	Formas de acesso e deslocamento entre partes do recurso	Abas, menus, setas, botões de avanço e retorno
Controles interativos	Elementos que permitem alterar condições ou estados	Botões, seletores, barras deslizantes, caixas de marcação e campos numéricos
Recursos informacionais	Elementos que orientam ou contextualizam a exploração	Títulos, instruções, legendas, rótulos, mensagens e indicadores
Recursos multimodais	Modos utilizados na composição do ambiente	Imagens, textos, símbolos, cores, sons, movimentos e destaques
Disposição representacional	Organização espacial das representações químicas	Representações aproximadas, separadas, sobrepostas ou distribuídas em diferentes áreas
Relação controle–representação	Correspondência funcional entre uma ação disponível e a área afetada	Controle de temperatura associado à movimentação de partículas ou à atualização de um gráfico

Fonte: Elaboração própria (2026).

Concluída essa caracterização, foram aplicadas às unidades e aos eventos identificados as sete dimensões primárias do modelo analítico: **Multiplicidade Representacional (MR)**, **Variedade de Formas Representacionais Intranível (VFRI)**, **Correspondência Conceitual (CC)**, **Dinâmica Representacional (DR)**, **Relação Temporal (RT)**, **Modulação Representacional (MD)** e **Potencial Interativo-Representacional (PIR)**. Diferentemente da AIC, essas dimensões incidem diretamente sobre as propriedades, relações e comportamentos das representações químicas manifestadas nos simuladores.

4.6 Dimensões primárias do modelo analítico

Após a caracterização de cada simulador por meio da Arquitetura Imagético-Contextual (AIC), foram aplicadas sete dimensões primárias: **Multiplicidade Representacional (MR), Variedade de Formas Representacionais Intranível (VFRI), Correspondência Conceitual (CC), Dinâmica Representacional (DR), Relação Temporal (RT), Modulação Representacional (MD) e Potencial Interativo-Representacional (PIR).**

Essas dimensões constituem o núcleo do modelo desenvolvido nesta pesquisa. Suas denominações e delimitações operacionais são autorais, mas não foram formuladas independentemente da literatura científica. Elas resultam da articulação entre quatro conjuntos de contribuições discutidos no referencial teórico:

- a) os estudos sobre os níveis de representação do conhecimento químico, especialmente Johnstone (1982, 1993, 2000, 2006), Gabel (1993), Mortimer, Machado e Romanelli (2000), Treagust, Chittleborough e Mamiala, Talanquer (2011) e Gilbert e Treagust (2009);
- b) os estudos sobre múltiplas representações externas, particularmente Ainsworth (1999, 2006) e Schnotz e Bannert (2003);
- c) a perspectiva multimodal de Kress (2010) e Jewitt (2016);
- d) as discussões sobre representações dinâmicas em ambientes digitais, especialmente Lowe (2003).

O modelo de Johnstone fornece o fundamento para reconhecer a natureza das representações químicas, distinguindo os domínios macroscópico, submicroscópico e simbólico. Os estudos sobre múltiplas representações permitem avançar da identificação desses níveis para a análise das diferentes formas empregadas, das funções que desempenham e das relações estabelecidas entre elas. A multimodalidade contribui para compreender a atuação conjunta de escrita, imagem, fala, som, símbolo, cor, movimento e disposição espacial. Por fim, as discussões sobre representações dinâmicas e ambientes interativos possibilitam examinar transformações, sequências temporais e respostas audiovisuais produzidas pelo sistema.

As dimensões não reproduzem categorias apresentadas de maneira pronta por um único autor. Correspondem a uma sistematização teórico-metodológica

própria, construída para responder às particularidades dos simuladores virtuais de Química. A contribuição autoral encontra-se, portanto, na seleção, denominação, delimitação e articulação operacional das dimensões; sua sustentação conceitual provém das contribuições teóricas anteriormente apresentadas.

As dimensões são complementares e não constituem etapas sucessivas, níveis hierárquicos ou categorias mutuamente excludentes. Uma mesma ocorrência pode ser examinada por mais de uma dimensão, desde que cada atribuição corresponda a uma propriedade analiticamente distinta e esteja sustentada pelo material empírico.

4.6.1 Multiplicidade Representacional (MR)

A Multiplicidade Representacional (MR) constituiu a primeira dimensão analítica primária do modelo e destinou-se a identificar quais níveis de representação do conhecimento químico estavam presentes nos simuladores e de que maneira eram disponibilizados de forma isolada, simultânea ou articulada durante a exploração funcional. Foram considerados os níveis macroscópico, submicroscópico e simbólico, conforme a tradição teórica adotada nesta pesquisa.

O nível macroscópico compreendeu fenômenos, propriedades e transformações químicas representados em uma escala observável ou experienciável, como mudanças de cor, formação de precipitados, variações de volume, alterações de temperatura, liberação de gases, movimentos de objetos e configurações visuais que remetiam a materiais e procedimentos de laboratório.

O nível submicroscópico abrangeu representações de entidades e processos não diretamente observáveis, como átomos, moléculas, íons, partículas, ligações, interações intermoleculares e mecanismos de reorganização da matéria. Sua identificação exigiu que a representação remetesse explicitamente a entidades ou processos situados abaixo da escala diretamente observável, não sendo suficiente a presença genérica de círculos, esferas ou formas geométricas sem função química reconhecível.

O nível simbólico compreendeu os sistemas convencionais empregados para representar quantitativamente ou formalmente o conhecimento químico,

incluindo fórmulas, símbolos dos elementos, equações químicas, expressões matemáticas, gráficos, tabelas, valores numéricos, unidades de medida, notações, escalas e outras inscrições especializadas.

A MR não foi utilizada apenas para contabilizar quantos níveis estavam presentes no simulador. Sua aplicação também examinou se esses níveis eram apresentados separadamente, disponibilizados de maneira simultânea ou relacionados por meio de correspondências observáveis durante a interação. Entretanto, a qualidade conceitual dessas relações não foi julgada nesta dimensão, pois essa análise pertenceu especificamente à Correspondência Conceitual (CC).

A unidade de análise da MR corresponde à ocorrência audiovisual-funcional na qual seja possível identificar, com base em evidências observáveis ou audíveis e rastreáveis, a manifestação de pelo menos um nível representacional. Uma mesma ocorrência pode ser enquadrada em categoria composta da MR quando apresenta simultaneamente dois ou três níveis. Nesses casos, registram-se os níveis envolvidos e o modo de apresentação observado. Um som somente integra a MR quando seu conteúdo químico e sua fonte no simulador forem demonstrados; sinais operacionais permanecem contextuais.

Para a sistematização da dimensão, foram adotadas as seguintes categorias organizadas no Quadro 4.

Quadro 4 – Definição operacional das categorias

Categoria	Definição operacional
MR-M	Presença exclusiva do nível macroscópico na ocorrência analisada
MR-SM	Presença exclusiva do nível submicroscópico
MR-S	Presença exclusiva do nível simbólico
MR-M/SM	Coocorrência dos níveis macroscópico e submicroscópico
MR-M/S	Coocorrência dos níveis macroscópico e simbólico
MR-SM/S	Coocorrência dos níveis submicroscópico e simbólico
MR-M/SM/S	Coocorrência dos três níveis representacionais
MR-I	Ocorrência inconclusiva, quando a evidência audiovisual funcional não permite identificar com segurança o nível representacional

Fonte: Elaboração própria (2026).

A classificação como coocorrência exige que dois ou mais níveis estejam funcionalmente disponíveis na mesma ocorrência ou em um mesmo encadeamento audiovisual-funcional contínuo. A simples presença de níveis distintos em módulos

separados, telas diferentes ou momentos distantes do registro não é considerada coocorrência naquela unidade de análise. Nesses casos, os níveis são registrados separadamente e posteriormente considerados na síntese geral do simulador.

A articulação entre níveis foi registrada somente quando existiam indícios observáveis de conexão funcional, espacial ou temporal entre eles. Essa articulação poderia ocorrer, por exemplo, quando a alteração de uma variável simbólica provocava uma mudança simultânea em uma representação submicroscópica ou macroscópica; quando diferentes níveis eram exibidos lado a lado; ou quando uma ação do usuário produzia respostas correspondentes em mais de uma representação.

Para evitar sobreposição entre dimensões, foram estabelecidas as seguintes regras de decisão:

- a) a MR identificou **quais níveis representacionais estavam presentes e como eram disponibilizados conjuntamente**;
- b) a VFRI examinou **quais formas representacionais eram mobilizadas no interior de cada nível**;
- c) a CC analisou **se havia correspondência conceitual explícita, funcionalmente observável e coerente entre representações**;
- d) a DR examinou **as transformações ocorridas nas representações ao longo da interação**;
- e) a presença simultânea de dois ou mais níveis não foi considerada, por si só, evidência de correspondência conceitual;
- f) a diversidade de formas dentro de um único nível não foi classificada como multiplicidade entre níveis;
- g) os níveis foram codificados somente quando sustentados por evidência audiovisual funcional observável, evitando inferências baseadas exclusivamente na finalidade presumida do simulador;
- h) casos ambíguos foram registrados como inconclusivos e retomados no contexto integral do vídeo antes da codificação definitiva.

A distinção entre MR e VFRI foi especialmente importante para a consistência do modelo. A MR analisou a multiplicidade **entre os níveis** macroscópico, submicroscópico e simbólico, enquanto a VFRI examinou a diversidade de formas representacionais **no interior de cada nível**. Desse modo, um simulador poderia apresentar elevada variedade de gráficos, tabelas e expressões matemáticas,

todos pertencentes ao nível simbólico, sem necessariamente possuir elevada multiplicidade entre níveis. De modo inverso, poderia apresentar os três níveis representacionais por meio de poucas formas em cada um deles.

As questões orientadoras da MR foram:

- Quais níveis de representação do conhecimento químico estão presentes na ocorrência?
- Os níveis aparecem isoladamente ou em coocorrência?
- Quando coexistem, são apresentados na mesma tela, em telas alternadas ou em um encadeamento funcional contínuo?
- A ação do usuário produz respostas observáveis em mais de um nível?
- A coexistência dos níveis é recorrente, eventual ou restrita a determinados módulos?
- Há níveis ausentes, pouco desenvolvidos ou acessíveis apenas sob condições específicas de interação?

O registro da MR incluiu o código da evidência, o simulador e o módulo analisado, o registro audiovisual funcional, as marcações temporais inicial e final, os níveis identificados, o modo de apresentação, a ação antecedente, a resposta observável do sistema, a justificativa da codificação e, quando pertinente, a captura de tela associada.

Na síntese de cada simulador, foram descritos os níveis representacionais identificados, as combinações recorrentes, as ocorrências excepcionais, os módulos em que cada nível se manifestava e as condições necessárias para sua visualização. Essa síntese permaneceu qualitativa e fundamentada na cadeia de evidências, não sendo convertida em uma escala numérica de desempenho.

A presença de maior quantidade de níveis não foi interpretada automaticamente como indicativo de maior qualidade representacional ou maior potencial didático. A multiplicidade somente adquiriu significado analítico mais amplo quando examinada em articulação com as demais dimensões, sobretudo a VFRI, a CC, a DR, a RT, a MD e a PIR. Assim, a MR forneceu uma base empírica para as sínteses transversais da Configuração Representacional Dominante (CRD) e do Potencial Didático-Representacional (PDR), sem antecipar isoladamente qualquer julgamento sobre a eficácia pedagógica do simulador.

4.6.2 Variedade de Formas Representacionais Intranível (VFRI)

A Variedade de Formas Representacionais Intranível (VFRI)

identifica e caracteriza as diferentes formas utilizadas para expressar o conhecimento químico no interior de um mesmo nível representacional.

Seu ponto de partida encontra-se na distinção entre os níveis macroscópico, submicroscópico e simbólico proposta por Johnstone (1982, 1993). Essa distinção permite reconhecer a natureza química das representações, mas não descreve integralmente a diversidade de formas que pode existir dentro de cada nível. Como discutido no referencial teórico, um mesmo nível pode ser materializado por diferentes registros.

Gilbert e Treagust (2009) ressaltam que, no interior dos níveis representacionais da Química, podem coexistir diferentes formas. O nível simbólico pode envolver fórmulas, equações, valores, gráficos e expressões matemáticas; o submicroscópico pode ser apresentado por modelos de partículas, estruturas moleculares, esquemas, animações ou modelos tridimensionais. Assim, dois simuladores podem mobilizar o mesmo nível químico, mas fazê-lo por formas distintas e com diferentes funções representacionais.

Ainsworth (1999, 2006) contribui para essa dimensão ao demonstrar que diferentes representações podem especializar-se na apresentação de determinadas informações. Uma forma pode evidenciar relações quantitativas, enquanto outra torna mais visíveis aspectos espaciais, estruturais ou processuais. A existência de várias formas, portanto, não deve ser interpretada apenas como acumulação quantitativa, mas examinada segundo as funções que cada representação desempenha.

As contribuições de Kress (2010) e Jewitt (2016) também permitem compreender que escrita, imagem, fala, som, símbolo, cor, movimento e disposição espacial possuem potencialidades distintas para produzir significados. Essa perspectiva auxilia na identificação dos recursos modais que participam da materialização de cada forma representacional, sem transformar todo som de interface em forma química intranível.

Com base nessas contribuições, a VFRI constitui uma elaboração operacional desta pesquisa destinada a responder à seguinte questão: **de quais**

formas o conhecimento químico é expresso no interior de cada nível representacional?

Sua aplicação envolve:

- a) identificar o nível macroscópico, submicroscópico ou simbólico ao qual a ocorrência se vincula;
- b) reconhecer as formas específicas mobilizadas nesse nível;
- c) examinar as propriedades evidenciadas por cada forma;
- d) verificar se as formas são complementares, alternativas ou redundantes;
- e) observar se coexistem, sucedem-se ou podem ser alternadas;
- f) identificar se sua manifestação depende de alguma ação de exploração.

A variedade não foi interpretada automaticamente como indicador de qualidade. Foram consideradas a função de cada forma e sua contribuição específica para a organização representacional do simulador.

4.6.3 Correspondência Conceitual (CC)

A **Correspondência Conceitual (CC)** examina as relações de significado estabelecidas entre representações que se referem a um mesmo objeto, fenômeno, propriedade, variável, estado ou processo químico.

Essa dimensão fundamenta-se inicialmente na compreensão de que os níveis de representação não devem ser tratados isoladamente. Johnstone (1993, 2000) evidencia a necessidade de relacionar fenômenos macroscópicos, modelos submicroscópicos e linguagens simbólicas. Gabel (1993) destaca especificamente as dificuldades de estabelecer relações entre fenômenos observáveis e explicações particuladas. Mortimer, Machado e Romanelli (2000), por sua vez, enfatizam a relação entre as dimensões fenomenológica, teórica e representacional do conhecimento químico.

Treagust, Chittleborough e Mamiala e Talanquer (2011) reforçam que a compreensão dos modelos científicos exige reconhecer suas funções explicativas e suas relações com os fenômenos e as linguagens utilizadas para representá-los. Essas contribuições sustentam a necessidade de analisar não apenas a presença das representações, mas as relações conceituais estabelecidas entre elas.

No campo das múltiplas representações, Ainsworth (1999, 2006) demonstra que a construção de relações é uma das funções centrais dos sistemas multirrepresentacionais. Entretanto, tais relações não decorrem automaticamente da simples coexistência de diferentes registros. É necessário que o sistema ofereça condições para reconhecer correspondências, convergências e diferenças.

Schnotz e Bannert (2003) acrescentam que representações pictóricas, verbais e simbólicas possuem estruturas próprias e não são imediatamente intercambiáveis. A análise precisa considerar os mapeamentos estabelecidos entre essas estruturas.

A denominação **Correspondência Conceitual** e sua transformação em dimensão operacional são autorais. A dimensão sistematiza essas contribuições para responder à questão: **quais relações conceituais são estabelecidas entre as representações?**

Foram examinadas correspondências entre:

- a) fenômeno macroscópico e modelo submicroscópico;
- b) modelo submicroscópico e linguagem simbólica;
- c) fenômeno macroscópico e representação simbólica;
- d) modelos, fórmulas, equações, gráficos, valores e escalas;
- e) cores, formas, rótulos e entidades químicas;
- f) ações realizadas e alterações produzidas pelo sistema.

Uma correspondência foi considerada explícita quando indicada por legendas, rótulos, códigos cromáticos, setas, destaques ou textos. Foi considerada implícita quando reconhecível pela proximidade, simultaneidade, sincronização ou resposta conjunta a uma ação.

A presença de duas representações na mesma tela não foi suficiente para caracterizar uma correspondência. Foi necessária evidência de que ambas se referiam ao mesmo conteúdo químico ou a aspectos relacionados de um mesmo processo.

4.6.4 Dinâmica Representacional (DR)

A **Dinâmica Representacional (DR)** examina as transformações experimentadas pelas representações ao longo do tempo, abrangendo mudanças de estado, posição, quantidade, valor, composição, forma ou configuração.

Sua sustentação teórica encontra-se nas discussões sobre representações dinâmicas e na compreensão multimodal do movimento. Lowe (2003) diferencia as informações disponibilizadas por gráficos dinâmicos daquelas apresentadas em representações estáticas. As animações podem tornar visíveis transformações temporais que, em imagens fixas, precisariam ser inferidas. O autor também adverte que o movimento não é intrinsecamente superior à representação estática, pois elementos visualmente salientes não correspondem necessariamente aos aspectos conceitualmente mais relevantes.

Na perspectiva multimodal, Kress (2010) compreende o movimento como um modo capaz de comunicar transformação, direção e continuidade. Jewitt (2016) ressalta que a função de um modo precisa ser examinada em relação à configuração multimodal da qual participa. Assim, o movimento somente possui relevância analítica quando contribui para a produção de um significado representacional.

Com base nessas contribuições, a DR diferencia movimento visual de transformação representacional. Uma animação, deslocamento ou efeito gráfico somente foi classificado nessa dimensão quando alterava ou comunicava estados, propriedades, relações, quantidades ou configurações vinculadas ao conhecimento químico.

A denominação e a delimitação operacional da DR são autorais e respondem à questão: **o que se transforma e qual significado químico essa transformação comunica?**

Foram examinadas transformações como:

- a) deslocamento ou reorganização de partículas;
- b) alteração da velocidade ou do padrão de movimento;
- c) formação ou ruptura de estruturas;
- d) aparecimento ou desaparecimento de entidades;
- e) mudança de cor, forma, tamanho ou quantidade;
- f) atualização de valores, gráficos, escalas ou tabelas;
- g) modificação de fórmulas e equações;
- h) alterações coordenadas de diferentes representações.

As ocorrências foram ainda caracterizadas como automáticas ou desencadeadas por uma ação; contínuas ou discretas; progressivas ou instantâneas; reversíveis ou irreversíveis no percurso observado.

4.6.5 Relação Temporal (RT)

A dimensão **Relação Temporal (RT)** examina como duas ou mais ocorrências representacionais, ações de exploração ou respostas do sistema se organizam e se relacionam no tempo. Enquanto a Dinâmica Representacional (DR) focaliza aquilo que se transforma e o significado químico comunicado pela transformação, a RT analisa quando as ocorrências se manifestam, em que ordem aparecem e em que medida apresentam coordenação temporal.

A dimensão relaciona-se às contribuições de Kress (2010), para quem os diferentes modos semióticos possuem formas próprias de organização do significado, incluindo possibilidades de sequência e continuidade, e de Jewitt (2016), que destaca a necessidade de examinar a configuração conjunta dos modos. Nos ambientes digitais, essa configuração envolve não apenas a disposição espacial de textos, imagens, símbolos, movimentos, sons e indicadores, mas também o momento e a ordem em que esses elementos aparecem, permanecem disponíveis ou se modificam.

Lowe (2003) também oferece fundamento para essa dimensão ao demonstrar que as representações dinâmicas tornam explícitas mudanças que se desenvolvem temporalmente. Entretanto, a organização da RT nos eixos e nas categorias apresentados nesta pesquisa constitui uma sistematização autoral elaborada para a análise audiovisual-funcional dos simuladores virtuais de Química.

A RT responde à seguinte questão geral: **como as ocorrências representacionais, as ações de exploração e as respostas do sistema se organizam e se coordenam temporalmente?**

Para preservar a correspondência entre as categorias e evitar a sobreposição de propriedades temporais distintas, a RT foi organizada em dois eixos analíticos complementares: **organização temporal** e **coordenação temporal**.

4.6.5.1 Organização temporal

O eixo da organização temporal examina se as ocorrências coexistem em determinado intervalo ou se manifestam sucessivamente. Foram consideradas duas categorias:

Simultaneidade: ocorre quando duas ou mais representações, transformações, informações, ações ou respostas coexistem ou permanecem disponíveis em um mesmo intervalo temporal. A simultaneidade não foi presumida apenas porque duas representações ocupavam a mesma tela. Foi necessário verificar se ambas permaneciam efetivamente disponíveis durante o intervalo analisado. Uma representação estática e outra dinâmica, por exemplo, poderiam ser consideradas simultâneas quando permanecessem conjuntamente acessíveis enquanto uma delas se transformava.

Sequencialidade: ocorre quando duas ou mais representações, transformações, ações ou respostas se manifestam sucessivamente, segundo uma ordem temporal identificável. A sequencialidade foi empregada para examinar ocorrências cuja organização dependia da passagem de um estado para outro. Nesses casos, observou-se se a ordem era predefinida ou modificável e se permaneciam referências suficientes para relacionar os estados sucessivos.

A sucessão entre ocorrências não foi tomada automaticamente como evidência de relação conceitual. Para caracterizar uma sequência relevante à RT, foi necessário identificar uma ordem temporal reconhecível entre eventos vinculados ao percurso da simulação.

4.6.5.2 Coordenação temporal

O eixo da coordenação temporal examina se ocorrências funcional ou conceitualmente relacionadas se desenvolvem de maneira temporalmente coordenada. Foram consideradas duas categorias:

- **Sincronicidade:** ocorre quando duas ou mais ocorrências relacionadas se manifestam ou se modificam de maneira temporalmente coordenada. A

sincronicidade pode ser identificada, por exemplo, quando a alteração de uma variável é acompanhada pela atualização coordenada de um valor numérico, de um gráfico e de uma representação particulada. Sua caracterização exige uma correspondência temporal observável, e não apenas a presença conjunta das representações.

- **Assincronicidade:** ocorre quando duas ou mais ocorrências relacionadas não se manifestam ou não se modificam de maneira temporalmente coordenada. Elas podem aparecer em momentos distintos, ser atualizadas em ritmos diferentes ou responder separadamente às condições estabelecidas durante a exploração. A assincronicidade não foi interpretada automaticamente como falha, inadequação ou deficiência do simulador. Sua ocorrência foi descrita considerando a função exercida na simulação, a estrutura do sistema e a possibilidade de reconhecer as relações entre as representações envolvidas.

4.6.5.3 Relação entre os dois eixos (simultaneidade e sequencialidade)

Os eixos de organização e coordenação temporal analisam propriedades diferentes e não foram tratados como mutuamente excludentes. A mesma ocorrência pôde ser caracterizada em ambos.

A **simultaneidade** e a **sequencialidade** respondem à questão de como as ocorrências se distribuem no tempo: coexistem ou se sucedem. A **sincronicidade** e a **assincronicidade**, por sua vez, indicam como ocorrências relacionadas se coordenam temporalmente.

Desse modo, duas representações poderiam permanecer simultaneamente disponíveis, mas apresentar atualizações assíncronas. Por exemplo, um gráfico e uma representação de partículas poderiam coexistir na interface, embora suas modificações ocorressem em momentos ou ritmos distintos.

Também seria possível identificar uma sequência temporalmente coordenada, como no encadeamento:

estado inicial → ação de exploração → resposta do sistema → estado resultante.

Nesse caso, as ocorrências não seriam simultâneas, mas poderiam apresentar sincronidade funcional, desde que integrassem uma resposta temporalmente coordenada e reconhecível.

A classificação temporal foi aplicada apenas quando havia duas ou mais ocorrências passíveis de comparação. A simples existência de movimento, animação ou mudança não foi suficiente para mobilizar a RT, pois esses elementos poderiam ser examinados exclusivamente pela DR quando não envolvessem uma relação temporal entre diferentes ocorrências.

A RT foi orientada pelas seguintes questões:

- a) as ocorrências manifestam-se simultânea ou sequencialmente?;
- b) existe uma ordem temporal identificável entre as ocorrências?;
- c) essa ordem é obrigatória, predefinida ou modificável durante a exploração?;
- d) ocorrências funcional ou conceitualmente relacionadas desenvolvem-se de maneira sincrônica ou assincrônica?;
- e) representações simultaneamente disponíveis também se modificam de maneira coordenada?;
- f) diferentes representações são atualizadas no mesmo momento ou em ritmos distintos?;
- g) determinada representação permanece disponível enquanto outra se transforma?;
- h) as ações de exploração e as respostas do sistema apresentam coordenação temporal reconhecível?;
- i) a organização temporal permite relacionar os estados iniciais, intermediários e resultantes?;
- j) a repetição, a pausa, a interrupção ou a reversão modificam a observação das relações temporais?

A aplicação da RT permaneceu circunscrita às relações temporalmente observáveis no percurso de exploração registrado. Não foram atribuídas intenções pedagógicas ao sistema nem inferidos efeitos sobre a aprendizagem. A simultaneidade, a sequencialidade, a sincronidade e a assincronicidade foram utilizadas como categorias descritivo-analíticas das relações temporais incorporadas às representações e às respostas funcionais dos simuladores.

4.6.6 Modulação Representacional (MD)

A **Modulação Representacional (MD)** examina as escolhas por meio das quais o simulador destaca, seleciona, simplifica, restringe, omite ou complementa aspectos do objeto, fenômeno ou processo químico representado.

A dimensão encontra fundamento direto nos estudos de Ainsworth (1999, 2006). A autora demonstra que sistemas multirrepresentacionais podem cumprir funções de complementação e restrição. A complementação ocorre quando diferentes representações oferecem informações distintas ou diferentes formas de acesso a um mesmo conhecimento. A restrição ocorre quando uma representação delimita as possibilidades de interpretação de outra.

A noção de especialização funcional discutida por Ainsworth também contribui para compreender que cada representação seleciona determinados aspectos do conteúdo. Nenhuma forma representacional apresenta o fenômeno em sua totalidade; cada uma evidencia certas propriedades e deixa outras em segundo plano.

Schnotz e Bannert (2003) sustentam que diferentes formas externas possuem estruturas próprias, organizando as informações de maneiras particulares. Kress (2010) e Jewitt (2016) acrescentam que os modos semióticos apresentam potencialidades distintas e que sua configuração conjunta envolve escolhas de destaque, distribuição e função.

A denominação Modulação Representacional é autoral. Ela reúne essas contribuições em uma dimensão destinada a responder: **o que a representação evidencia, restringe, omite ou complementa?**

A análise compreendeu dois movimentos relacionados:

- a) **restrições representacionais**, como simplificações, escalas não proporcionais, padronizações, redução de variáveis, limitação de condições e trajetórias predefinidas;
- b) **complementações representacionais**, como legendas, rótulos, textos, escalas, indicadores, setas, códigos de cores, gráficos, tabelas, sons e feedbacks.

Uma simplificação não foi considerada automaticamente erro ou deficiência. Foi examinada como escolha modelizadora, considerando a finalidade da representação e os recursos utilizados para orientar sua interpretação.

4.6.7 Potencial Interativo-Representacional (PIR)

O **Potencial Interativo-Representacional (PIR)** examina as possibilidades funcionalmente disponibilizadas pelo simulador para manipular, selecionar, modificar, comparar, construir ou reorganizar representações.

Essa dimensão relaciona-se à concepção dos simuladores como sistemas nos quais ações previstas no design podem produzir alterações representacionais. Ainsworth (2006), por meio do modelo DeFT, demonstra que a análise de ambientes multirrepresentacionais precisa considerar o desenho do sistema, as funções atribuídas às representações e as relações exigidas entre elas. Essa contribuição permite compreender que as possibilidades de ação não são externas à organização representacional, mas dependem de como o ambiente foi estruturado.

A discussão de Lowe (2003) sobre representações dinâmicas auxilia a compreender as alterações de estado que podem ser produzidas ou observadas nos ambientes digitais. As contribuições da multimodalidade também permitem examinar como controles, imagens, símbolos, movimentos, indicadores e feedbacks atuam conjuntamente na resposta do sistema.

Entretanto, deve-se explicitar que a denominação **Potencial Interativo-Representacional** e sua subdivisão em possibilidades manipulativas, exploratórias e construtivas constituem uma proposição operacional desta pesquisa. Na versão atual do referencial teórico, não foi identificada uma fonte específica à qual essa tripartição possa ser atribuída literalmente.

O PIR responde à questão: **o que o simulador permite realizar com suas representações?**

Foram consideradas possibilidades como:

- a) modificar valores e variáveis;
- b) selecionar ou alternar formas de visualização;

- c) inserir, retirar ou substituir elementos;
- d) deslocar ou reorganizar entidades;
- e) comparar configurações;
- f) construir estruturas;
- g) exibir ou ocultar informações;
- h) repetir, reiniciar, interromper ou reverter eventos.

O termo “potencial” não indica aprendizagem, eficácia pedagógica ou comportamento do usuário. Refere-se às possibilidades incorporadas ao sistema e tornadas observáveis por meio da exploração funcional.

4.6.8 Articulação e aplicação das dimensões

As sete dimensões foram construídas como perspectivas complementares sobre os sistemas representacionais examinados. Sua articulação pode ser sintetizada no Quadro 5 a seguir.

Quadro 5 – Fundamentação e estatuto das dimensões primárias

Dimensão	Contribuições teóricas mobilizadas	Operacionalização autoral
MR	Johnstone	Identificação da presença, ausência, coocorrência e dos modos de disponibilização dos diferentes níveis representacionais.
VFRI	Johnstone; Gilbert e Treagust; Ainsworth; Kress; Jewitt	Identificação da variedade de formas no interior de cada nível
CC	Johnstone; Gabel; Mortimer, Machado e Romanelli; Treagust, Chittleborough e Mamiala; Talanquer; Ainsworth; Schnotz e Bannert	Classificação das correspondências conceituais explícitas e implícitas
DR	Lowe; Kress; Jewitt	Delimitação das transformações representacionais observáveis
RT	Kress; Jewitt; Lowe	Organização temporal em simultaneidade e sequencialidade; coordenação temporal em sincronicidade e assincronicidade
MD	Ainsworth; Schnotz e Bannert; Kress; Jewitt	Integração analítica de restrições e complementações

Dimensão	Contribuições teóricas mobilizadas	Operacionalização autoral
PIR	Ainsworth; Lowe; perspectiva multimodal	Possibilidades manipulativas, exploratórias e construtivas do sistema

Fonte: Elaboração própria (2026), com base nos autores indicados.

O Quadro 5 diferencia o fundamento teórico da contribuição metodológica desta investigação. Os autores mencionados fornecem conceitos relacionados aos níveis químicos, às múltiplas representações, às funções de complementação e restrição, aos mapeamentos entre registros, aos modos semióticos e às representações dinâmicas. A pesquisa, por sua vez, transforma essas contribuições em sete dimensões operacionais ajustadas à análise audiovisual-funcional dos simuladores.

A aplicação das dimensões ocorreu conforme a natureza das unidades e dos eventos observados. A MR incidiu sobre a presença, a ausência, a coocorrência e os modos de disponibilização dos níveis de representação do conhecimento químico; a VFRI sobre as formas empregadas no interior dos níveis representacionais; a CC, sobre as relações de significado; a DR, sobre as transformações; a RT, sobre a organização temporal; a MD, sobre as escolhas, restrições e complementações; e o PIR, sobre as possibilidades de intervenção e as respostas representacionais produzidas pelo sistema.

A codificação múltipla foi admitida quando uma mesma ocorrência apresentava propriedades pertinentes a mais de uma dimensão. Considere-se, por exemplo, a alteração da temperatura de um sistema: a presença conjunta dos níveis macroscópico, submicroscópico e simbólico pode ser examinada pela MR; as formas mobilizadas no interior desses níveis, pela VFRI; a relação entre temperatura e movimento das partículas, pela CC; a mudança do padrão de movimento, pela DR; a atualização coordenada das representações, pela RT; as convenções e simplificações empregadas, pela MD; e a possibilidade de alterar a variável, pelo PIR.

A presença ou ausência de determinada dimensão foi registrada somente quando sustentada pelo material empírico. A inexistência de uma ocorrência não foi interpretada automaticamente como deficiência, pois os simuladores apresentam diferentes finalidades, conteúdos e estruturas funcionais.

A articulação proposta permite analisar os simuladores como sistemas representacionais químicos, multimodais, dinâmicos e interativos. O caráter autoral do

modelo reside na organização dessas contribuições em dimensões sistemáticas e operacionalizáveis; sua consistência teórica decorre do diálogo estabelecido com a literatura científica apresentada no referencial.

O modelo analítico proposto é apresentado de forma esquemática na Figura 3 e uma síntese operacional de cada componente do modelo é apresentada no Quadro 6.

Figura 3 – Figura esquemática do modelo analítico de representação do conhecimento químico em simuladores virtuais de Química



Fonte: Elaboração própria (2026).

Quadro 6 – Síntese operacional das sete dimensões analíticas primárias do modelo de representação do conhecimento químico em simuladores virtuais de Química

Elemento analítico	Questão orientadora da análise	Evidências observáveis
Multiplicidade Representacional (MR)	Quais níveis de representação do conhecimento químico estão presentes e como são disponibilizados isoladamente, em coocorrência ou articulados?	Presença ou ausência de representações macroscópicas, submicroscópicas e simbólicas; coocorrência e modos de disponibilização dos níveis.
Variedade de Formas Representacionais Intranível (VFRI)	Quais formas representacionais coexistem dentro de cada nível identificado?	Diferentes modos visuais, verbais, sonoros, simbólicos ou gráficos de representar um mesmo nível, quando houver conteúdo químico demonstrável
Correspondência Conceitual (CC)	As diferentes representações presentes estabelecem relações referentes ao mesmo conhecimento químico?	Relações entre fenômeno, modelo e linguagem simbólica
Dinâmica Representacional (DR)	Como as representações químicas se modificam ao longo do tempo ou em função da interação?	Movimento, transformação, atualização de estados e ocorrências sonoras representacionalmente pertinentes
Relação Temporal (RT)	Como as ocorrências se organizam e se coordenam temporalmente?	Organização temporal em simultaneidade e sequencialidade; coordenação temporal visual, sonora e audiovisual em sincronicidade e assincronicidade
Modulação Representacional (MD)	Quais escolhas de simplificação, restrição e complementação são incorporadas às representações químicas?	Reduções, omissões, simplificações, elementos auxiliares, informações complementares e recursos de apoio
Potencial Interativo-Representacional (PIR)	Quais possibilidades de ação sobre as representações são disponibilizadas ao usuário?	Manipulação, exploração e construção representacional

Fonte: Elaboração própria (2026).

4.7 Procedimentos de codificação e análise

A codificação e a análise são realizadas com base nos três vídeos SVQ-A/SVQ-B/SVQ-C e nos registros produzidos durante a exploração funcional, abrangendo o

inventário documental, os estados visuais, as ocorrências sonoras, os timecodes e as anotações contextuais. O procedimento assegura a correspondência entre o material empírico, as unidades de análise e as sete dimensões do modelo: Multiplicidade Representacional (MR), Variedade de Formas Representacionais Intranível (VFRI), Correspondência Conceitual (CC), Dinâmica Representacional (DR), Relação Temporal (RT), Modulação Representacional (MD) e Potencial Interativo-Representacional (PIR). O áudio é descritor transversal dessas dimensões, não uma categoria autônoma.

A análise apresentou caráter predominantemente qualitativo e descritivo. O apoio quantitativo foi restrito ao inventário de formas, categorias, estados, módulos e coberturas comparáveis; não substituiu a interpretação das evidências nem foi utilizado como medida isolada de qualidade. Para o som, a unidade foi a categoria de ação ou evento, de modo que repetições de um mesmo clique serviram à confirmação da estabilidade da resposta audiovisual e não ao cálculo de frequência de sinais.

A organização do processo de codificação aproxima-se dos princípios da análise de conteúdo, especialmente quanto à definição de unidades, categorias e regras de classificação (Bardin, 2016; Krippendorff, 2018). Contudo, as categorias não foram produzidas exclusivamente por indução a partir do corpus. As sete dimensões primárias foram previamente definidas pelo modelo analítico desenvolvido nesta pesquisa, com base no referencial teórico, enquanto as manifestações específicas encontradas nos simuladores foram descritas e sistematizadas durante o contato com o material empírico.

4.7.1 Inventário documental do corpus

O primeiro procedimento consistiu na elaboração de um **inventário documental**, destinado a identificar, organizar e individualizar os simuladores que compuseram o corpus. Cada recurso recebeu um código de identificação, utilizado em todas as etapas subsequentes da pesquisa.

O inventário reuniu, conforme a disponibilidade das informações:

- a) código do simulador;
- b) título do recurso;

- c) plataforma ou repositório de origem;
- d) endereço eletrônico;
- e) área e conteúdo químico abordado;
- f) versão, idioma e data de acesso;
- g) estrutura interna em telas, abas, módulos ou etapas;
- h) controles e funcionalidades disponíveis;
- i) registros audiovisuais funcionais e capturas de tela produzidos;
- j) observações técnicas e contextuais relevantes.

A individualização dos documentos permitiu relacionar cada evidência ao simulador, à tela, ao módulo e ao percurso de exploração em que foi produzida. Também evitou que registros oriundos de diferentes recursos ou momentos de exploração fossem analisados como se pertencessem a um mesmo contexto.

Alterações observadas entre acessos, indisponibilidade de funcionalidades, problemas de carregamento ou limitações técnicas foram registradas no inventário. Essas informações foram tratadas como condições contextuais de produção do corpus e não foram automaticamente interpretadas como propriedades permanentes do simulador.

4.7.2 Constituição do quadro de evidências audiovisuais funcionais

Após a organização do inventário, foi elaborado um quadro de evidências audiovisuais funcionais (Quadro 7), utilizado como instrumento central de codificação. O quadro reuniu, em uma mesma estrutura, a identificação do material, a localização temporal da evidência, sua descrição e as dimensões analíticas mobilizadas. A posição temporal foi tratada exclusivamente como endereço de rastreabilidade, sem atribuir precedência, peso ou importância à ordem em que os campos foram acessados durante a gravação.

Cada linha do Quadro 7 correspondeu a uma categoria de registro ou a um conjunto de evidências funcionalmente equivalentes, ainda que provenientes de momentos não consecutivos do vídeo.

Quadro 7 – Quadro de evidências audiovisuais funcionais

Campo	Conteúdo registrado
Código da evidência	Identificador único da ocorrência
Simulador	Código e título do recurso
Localização interna	Tela, aba, módulo, etapa ou funcionalidade
Registro audiovisual integrado	Identificação do vídeo SVQ-A, SVQ-B ou SVQ-C
Marcação temporal	Timecode no vídeo correspondente
Ação antecedente	Ação de exploração realizada
Evidência observável	Descrição objetiva do que aparece, se modifica ou é audível
Resposta do sistema	Resultado funcional ou representacional produzido
Nível representacional	Macroscópico, submicroscópico ou simbólico, quando aplicável
Forma representacional	Imagem, modelo de partículas, gráfico, fórmula, valor, texto, fala ou sinal sonoro, conforme a função
Dimensão ou dimensões	MR, VFRI, CC, DR, RT, MD e/ou PIR
Categoria ou característica	Classificação interna pertinente à dimensão
Justificativa analítica	Razão da atribuição do código
Evidência complementar	Captura de tela, trecho sonoro, transcrição, anotação ou outro registro associado
Observações	Limitações, dúvidas ou informações contextuais
Condição técnica do áudio	Presença e continuidade da faixa, canais, silenciamento, cortes, compressão, volume relativo e inteligibilidade
Fonte sonora	Áudio interno do simulador, fala do pesquisador, ambiente/externo ou indeterminada
Descrição ou transcrição sonora	Transcrição literal da fala inteligível ou descrição funcional do som não verbal
Relação audiovisual	Anterioridade, simultaneidade ou posterioridade; sincronia, assincronia e função demonstrável
Repetibilidade	Confirmação da ocorrência em ação comparável ou justificativa para estatuto inconclusivo

Fonte: Elaboração própria (2026).

A distinção entre **evidência observável** e **justificativa analítica** foi mantida durante toda a codificação. No campo da evidência, registrou-se o que podia ser localizado no material empírico. No campo da justificativa, explicitou-se por que essa evidência sustentava determinada categoria. Esse procedimento procurou reduzir a sobreposição entre descrição e interpretação.

A utilização de quadros e matrizes favorece a comparação sistemática entre casos e torna mais explícito o percurso entre os dados e as interpretações produzidas (Miles; Huberman; Saldaña, 2014). Nesta pesquisa, o quadro também serviu como índice de localização das evidências nos registros audiovisuais funcionais.

4.7.3 Unidades de análise, contexto e registro

Para organizar a codificação, foram diferenciadas três unidades complementares:

- a) **unidade de análise:** o simulador virtual de Química considerado em sua estrutura funcional e representacional;
- b) **unidade de contexto:** a tela, aba, módulo, etapa ou sequência funcional necessária para compreender a ocorrência;
- c) **unidade de registro:** a manifestação representacional observável à qual foi atribuída uma ou mais dimensões analíticas.

A unidade de registro pôde corresponder a uma forma representacional, a uma relação entre representações, a uma transformação, a uma organização temporal, a uma escolha de modulação ou a uma possibilidade de intervenção disponibilizada pelo sistema.

Sua delimitação foi determinada pela ocorrência analítica, e não exclusivamente por intervalos temporais fixos. Uma unidade poderia ser breve, como a atualização coordenada de duas representações, ou abranger um intervalo mais amplo, como uma sequência composta por ação, resposta e estado resultante.

Quando a compreensão da ocorrência dependia de eventos anteriores ou posteriores, esses elementos foram incorporados à unidade de contexto sem ampliar artificialmente a unidade de registro. Dessa maneira, preservou-se a

possibilidade de localizar precisamente a evidência, sem retirar a ocorrência do percurso funcional em que adquiriu significado.

4.7.4 Marcações temporais e segmentação audiovisual do corpus audiovisual

As marcações T+mm:ss organizaram o roteiro provisório. No corpus definitivo, cada evidência recebeu o timecode real do vídeo SVQ-A, SVQ-B ou SVQ-C correspondente. Esses códigos são localizadores documentais, não variáveis analíticas: a ordem em que a pessoa acessou os campos não define relevância, recorrência, progressão conceitual ou hierarquia de resultados. Evidências registradas em momentos não consecutivos podem ser reunidas quando pertencem à mesma categoria funcional.

Cada unidade temporal compreende, quando aplicável, estado inicial → ação de exploração → resposta audiovisual do sistema → estado resultante. Essa temporalidade interna ao evento é distinguida da ordem global da gravação. Marcações intermediárias são admitidas quando a resposta possui etapas visuais ou sonoras distinguíveis. Para cada categoria de evento sonorizado, registram-se um ou mais intervalos representativos e sua posição em relação à ação e à mudança visual; cliques repetidos que geram a mesma resposta são desconsiderados da contagem e não constituem novas unidades substantivas.

A segmentação é determinada por mudanças relevantes para as dimensões analíticas. Movimentos de cursor, transições de interface ou efeitos visuais sem função representacional não constituem, isoladamente, novas unidades.

As matrizes dos Apêndices A–C funcionam como roteiros de gravação e como índices de rastreabilidade. O Apêndice D integra as evidências entre casos sem substituir os protocolos individuais.

No corpus empírico, as marcas T+ foram substituídas por timecodes reais dos três vídeos e conferidas contra o estado visual e o canal sonoro correspondentes. Os timecodes sustentam localização e auditabilidade, mas não autorizam inferências baseadas na sequência particular de navegação. A análise reúne evidências por equivalência funcional, mesmo quando aparecem em pontos distantes ou em ordem diferente no vídeo.

4.7.5 Associação entre evidência e dimensão analítica

A atribuição de uma dimensão exigiu correspondência explícita entre a evidência observada e o objeto central da categoria. Foram adotadas as seguintes questões decisórias explicitadas no Quadro 8.

Quadro 8 – Questões decisórias para identificação de correspondência explícita entre a evidência observada e o objeto central da categoria

Categoria	Questão decisória
MR	A evidência permite identificar a presença de um ou mais níveis representacionais e o modo como aparecem isoladamente, em coocorrência ou articulados?
VFRI	A evidência revela uma forma específica de expressão do conhecimento no interior de determinado nível representacional?
CC	Há uma relação de significado reconhecível entre duas ou mais representações?
DR	Ocorre uma transformação representacional com significado relacionado ao conteúdo químico?
RT	Duas ou mais ocorrências podem ser comparadas quanto à organização ou à coordenação temporal?
MD	A representação evidencia, restringe, simplifica, omite ou complementa determinados aspectos do conteúdo?
PIR	O sistema disponibiliza uma ação capaz de selecionar, modificar, comparar, construir ou reorganizar representações?

Fonte: Elaboração própria (2026).

A simples presença de um elemento na interface não foi suficiente para mobilizar todas as dimensões potencialmente associadas. Cada atribuição dependeu da existência de evidência específica.

Na MR, registraram-se os níveis macroscópico, submicroscópico e simbólico efetivamente identificados, bem como sua apresentação isolada, simultânea ou articulada. Na VFRI, registrou-se a forma representacional observada no interior de cada nível. Na CC, foi necessário demonstrar a existência de relação conceitual entre formas ou níveis. Na DR, exigiu-se uma transformação representacional, e não apenas movimento decorativo. Na RT, foi necessária a comparação temporal entre pelo menos duas ocorrências. Na MD, identificaram-se escolhas de destaque, simplificação, restrição ou complementação. No PIR, registraram-se possibilidades funcionais efetivamente disponibilizadas e verificadas durante a exploração.

4.7.6 Codificação múltipla

As dimensões não foram tratadas como categorias mutuamente excludentes. Admitiu-se a **codificação múltipla** quando uma mesma unidade de registro apresentava propriedades distintas pertinentes a mais de uma dimensão.

Uma alteração na temperatura, por exemplo, poderia envolver:

- a) a presença conjunta dos níveis macroscópico, simbólico e submicroscópico, codificada na MR;
- b) o termômetro, o valor numérico e o modelo de partículas, examinados na VFRI como formas mobilizadas no interior dos respectivos níveis;
- c) a relação entre o valor da temperatura e a agitação das partículas, codificada na CC;
- d) a mudança no padrão de movimento das partículas, codificada na DR;
- e) a atualização coordenada do valor e do modelo de partículas, codificada na RT;
- f) o emprego de cores, escalas ou movimentos convencionais, examinado pela MD;
- g) a possibilidade de manipular a temperatura, registrada no PIR.

A codificação múltipla somente foi aceita quando cada código correspondia a uma propriedade analítica diferenciada. Não se admitiu a repetição de códigos apenas porque uma ocorrência pudesse, em sentido amplo, ser relacionada a várias dimensões.

Também não se presumiu que a ocorrência de uma dimensão implicasse necessariamente outra. A presença de múltiplas formas não garantiu correspondência conceitual; a existência de movimento não implicou uma relação temporal comparável; e a presença de controles visíveis não assegurou potencial interativo-representacional enquanto sua funcionalidade não fosse verificada.

4.7.7 Regras decisórias e situações limítrofes

Para aumentar a consistência da codificação, foram estabelecidas regras decisórias aplicadas a todo o corpus:

1. **Regra da evidência suficiente:** uma categoria somente foi atribuída quando sustentada pelos registros audiovisuais funcionais, capturas de tela ou informações contextuais verificáveis.
2. **Regra da especificidade:** foi utilizado o código correspondente à propriedade efetivamente observada, evitando classificações baseadas apenas em possibilidades presumidas.
3. **Regra da independência:** cada dimensão foi avaliada separadamente, mesmo quando integrava uma unidade submetida à codificação múltipla.
4. **Regra do contexto:** nenhuma ocorrência foi interpretada sem considerar a tela, o módulo, a ação antecedente e o estado funcional em que se manifestou.
5. **Regra da relevância representacional:** movimentos, cores, transições, falas, sinais e efeitos sonoros só são codificados quando exercem função reconhecível na representação do conteúdo, na orientação contextual ou na resposta do sistema; ocorrências sem função demonstrável permanecem descritas no controle técnico.
6. **Regra da não inferência pedagógica:** não foram atribuídos efeitos sobre compreensão, aprendizagem, motivação ou desempenho, pois esses aspectos não foram investigados por meio de dados de usuários.
7. **Regra da não valoração automática:** presença, ausência, frequência ou variedade de ocorrências não foram interpretadas isoladamente como indicadores de qualidade ou deficiência.
8. **Regra da diferenciação entre presença, variedade e relação:** a presença e a coocorrência dos níveis macroscópico, submicroscópico e simbólico foram registradas na MR; as formas mobilizadas no interior de cada nível foram examinadas na VFRI; e somente foram codificadas na CC as ocorrências em que havia relação conceitual sustentada pela evidência.
9. **Regra da diferenciação entre dinâmica e temporalidade:** uma transformação isolada foi examinada pela DR; a RT foi mobilizada apenas quando duas ou mais ocorrências podiam ser comparadas quanto à organização ou coordenação temporal.

10. **Regra da funcionalidade verificada:** as possibilidades interativas foram registradas com base em controles acionados ou funcionalidades confirmadas, evitando inferências exclusivamente a partir da aparência da interface.
11. **Regra do registro de incerteza:** ocorrências insuficientes, ambíguas ou tecnicamente comprometidas foram identificadas como não codificadas ou pendentes de revisão, em vez de serem forçadas a uma categoria.
12. **Regra da prevalência do registro integral: em caso de dúvida gerada por uma captura estática, por uma transcrição isolada ou pela identificação da fonte sonora, retorna-se ao corpus audiovisual e ao percurso de exploração correspondente.**

As situações limítrofes foram registradas em um campo próprio do quadro de evidências. A decisão final foi acompanhada de justificativa, permitindo recuperar tanto a evidência quanto o raciocínio empregado na classificação.

4.7.8 Etapas da codificação

A codificação ocorreu em etapas sucessivas e recursivas:

- a) organização do inventário documental;
- b) conferência dos roteiros temporais, das matrizes e dos estados visuais;
- c) reprodução integral de cada percurso planejado para reconhecimento do percurso funcional;
- d) segmentação das ocorrências e inserção das marcações temporais;
- e) descrição das evidências sem atribuição inicial de valor;
- f) associação das evidências às dimensões e respectivas categorias;
- g) registro da justificativa de cada atribuição;
- h) revisão das ocorrências submetidas à codificação múltipla;
- i) comparação entre ocorrências semelhantes em diferentes simuladores;
- j) revisão das situações ambíguas e aplicação uniforme das regras decisórias;
- k) consolidação do banco final de codificação;
- l) produção das sínteses qualitativas e descritivas.

A revisão recursiva permitiu ajustar descrições e decisões quando novas ocorrências evidenciavam a necessidade de maior precisão operacional. Eventuais

ajustes foram aplicados também às unidades anteriormente codificadas, preservando a uniformidade do procedimento no corpus.

4.7.9 Tratamento qualitativo e apoio descritivo à categorização

A análise qualitativa procurou compreender como as formas, relações, transformações, organizações temporais, modulações e possibilidades interativas se articulavam na estrutura de cada simulador. Para isso, foram comparadas:

- a) ocorrências internas ao mesmo simulador;
- b) diferentes telas ou módulos de um mesmo recurso;
- c) simuladores que abordavam conteúdos semelhantes;
- d) padrões recorrentes e configurações particulares do corpus;
- e) articulações entre duas ou mais dimensões.

O apoio quantitativo teve finalidade exclusivamente descritiva. Foram sistematizados, quando pertinentes:

- a) número e distribuição das categorias analíticas identificadas por dimensão;
- b) distribuição das ocorrências por simulador, tela ou módulo;
- c) repertório e distribuição das formas representacionais por nível químico;
- d) distribuição das categorias internas de cada dimensão;
- e) categorias e unidades submetidas à codificação múltipla;
- f) proporções e percentuais descritivos somente quando as bases de comparação eram equivalentes e a medida respondia a uma questão metodológica;
- g) cruzamentos entre dimensões, simuladores e conteúdos.

As distribuições foram interpretadas com cautela porque os simuladores apresentavam extensões, estruturas e quantidades de funcionalidades diferentes. Um recurso com maior duração ou número de módulos poderia gerar mais acionamentos sem que isso representasse maior complexidade ou qualidade. No canal sonoro, não se comparou o total de emissões: compararam-se as categorias de eventos em que o som estava presente e as funções que assumia.

Também se evitou transformar contagens em pontuação global de desempenho. Uma categoria única poderia exercer função estrutural relevante,

enquanto muitos acionamentos poderiam resultar da repetição deliberada do mesmo componente. Por essa razão, os resultados descritivos foram acompanhados de análise qualitativa e contextualização das evidências.

A ausência de uma dimensão foi registrada descritivamente, mas não interpretada automaticamente como deficiência. Sua relevância dependeu da finalidade, do conteúdo e da estrutura funcional de cada simulador.

4.7.10 Auditabilidade e rastreabilidade

A auditabilidade foi assegurada pela manutenção de uma cadeia de registros que permitisse reconstruir o percurso entre o material original e os resultados apresentados. A preservação de uma cadeia de evidências constitui um princípio importante para tornar explícita a relação entre os dados, os procedimentos analíticos e as conclusões da pesquisa (Yin, 2018).

Foram mantidos:

- a) o inventário completo dos simuladores;
- b) os registros audiovisuais funcionais identificados por códigos padronizados;
- c) os estados visuais descritos nas matrizes e as capturas de tela, quando disponíveis;
- d) as marcações temporais de início e término;
- e) o quadro de evidências audiovisuais funcionais;
- f) o código atribuído a cada unidade de registro;
- g) as justificativas das decisões analíticas;
- h) as observações referentes a casos ambíguos;
- i) o registro das revisões realizadas no sistema de codificação;
- j) as versões consolidadas do banco de dados.

Cada evidência recebeu um identificador único, formado pela combinação entre o código do simulador, a localização interna e o número da ocorrência. Um registro como SIM03-T02-E015, por exemplo, poderia indicar o simulador 03, a tela 02 e a evidência 015. A marcação temporal e o código do roteiro temporal permitiram retornar à ocorrência original.

Recomenda-se que as alterações efetuadas no banco de codificação sejam documentadas em um **registro de decisões analíticas**, contendo data, código afetado, decisão anterior, decisão revisada e justificativa. Esse registro impede que modificações realizadas durante o refinamento da análise se tornem invisíveis na versão consolidada.

Quando o mesmo pesquisador realizou a exploração, a codificação e a interpretação, a consistência foi favorecida pela reaplicação das regras decisórias, pela revisão diferida de uma parcela do corpus e pelo confronto entre ocorrências semelhantes. Caso tenha havido segundo codificador, deve-se informar separadamente sua participação, o treinamento realizado, a parcela submetida à dupla codificação, o procedimento de comparação e a forma de resolução das divergências. Não se deve declarar concordância intercodificadores se esse procedimento não foi efetivamente realizado.

4.7.11 Análise preliminar audiovisual assistida por IA e validação do pesquisador

A análise preliminar automatizada dos vídeos e a organização inicial das evidências foram orientadas pelo Protocolo Mestre de Análise Preliminar de Vídeos de Simuladores Virtuais e Sistematização de Evidências, reproduzido integralmente no Apêndice F. O protocolo constituiu o instrumento operacional central para inventário técnico, segmentação, localização de candidatos, descrição audiovisual, agrupamento provisório de eventos funcionalmente equivalentes, proposição de quadros, tabelas e gráficos descritivos e seleção inicial de frames. Sua utilização não substituiu as definições, as unidades, as dimensões e as regras decisórias estabelecidas neste capítulo.

A configuração computacional documentada para essa etapa foi o plano ChatGPT Pro, com o modelo ChatGPT 5.6 Sol, esforço de raciocínio configurado como “extra alto” e modo Work, em 3 de setembro de 2026. O registro de plano, modelo, esforço, modo, data, arquivos fornecidos e versão do protocolo integra a rastreabilidade, pois atualizações da plataforma podem alterar o comportamento do sistema e impedem pressupor reprodução textual idêntica em execuções futuras.

A ferramenta recebeu como entradas os três vídeos SVQ-A, SVQ-B e SVQ-C e a metodologia vigente. Sua atuação foi restrita à análise preliminar: extrair e conferir metadados; localizar ações, mudanças visuais e ocorrências sonoras candidatas; sugerir a sequência interna estado–ação–resposta–resultado; colapsar repetições equivalentes; propor categorias subordinadas ao sistema analítico já definido; apontar incertezas; organizar matrizes; e oferecer frames candidatos. A IA não foi tratada como autora, participante, especialista avaliadora ou instância autônoma de validação.

O procedimento adotou duas camadas sucessivas. Na primeira, a IA produziu candidatos e sistematizações preliminares marcados como pendentes. Na segunda, o pesquisador retornou aos trechos integrais, conferiu a identidade do caso e os timecodes, confrontou imagem e áudio, verificou a fonte sonora, aplicou as definições operacionais e decidiu por aceitar, corrigir, fundir, desdobrar, rejeitar ou manter a ocorrência como inconclusiva. Somente após esse exame a linha ingressou no banco validado e pôde sustentar resultados.

A validação humana também incidiu sobre quadros, tabelas, gráficos e figuras. Foram verificados comparabilidade das bases, denominadores, exclusão de repetições, correspondência entre título e conteúdo, limites inferenciais e adequação da forma de apresentação. Cada frame foi confrontado com o vídeo e aprovado apenas quando documentava o elemento fático discutido, mantinha o contexto necessário e possuía arquivo, caso e timecode rastreáveis. Quando o evento dependia de mudança, foram preferidos pares antes/depois; quando o som era central, a figura foi acompanhada de localização e descrição sonora, sem pretender tornar o áudio demonstrável por uma imagem estática.

As saídas automáticas foram consideradas falíveis e potencialmente sujeitas a omissões, descrições excessivas, associação indevida entre ação e efeito, atribuição incorreta de fonte sonora, perda de contexto no frame, criação de categorias não autorizadas e variação entre execuções. Por isso, confiança verbal do modelo, fluência textual ou convergência aparente não foram aceitas como critérios de validade. Diante de ambiguidade, retornou-se ao arquivo original; persistindo a dúvida, registrou-se condição inconclusiva.

A responsabilidade epistemológica e autoral permaneceu integralmente com o pesquisador. A ferramenta não “analisou a dissertação” nem produziu sozinha os resultados: ela apoiou uma etapa preliminar, repetível e auditável de triagem e

sistematização, posteriormente apreciada, corrigida e validada. O Apêndice F documenta as entradas, os bloqueios, os formatos de saída, as proibições e a lista de verificação que operacionalizaram essa supervisão humana.

4.7.12 Síntese do percurso analítico

O percurso de codificação e análise pode ser sintetizado da seguinte maneira:

inventário documental → produção humana dos três vídeos SVQ-A/SVQ-B/SVQ-C → execução do Protocolo Mestre do Apêndice F no ChatGPT Pro/ChatGPT 5.6 Sol, esforço extra alto, modo Work → descrição e categorização preliminares → apreciação, correção e validação pelo pesquisador → banco validado → timecodes dos vídeos correspondentes → descrição da evidência audiovisual → identificação e controle da fonte sonora → categorias de ação/evento com colapso de repetições equivalentes → unidades de registro → dimensões analíticas → sínteses individuais → comparação transversal → resultados.

Esse procedimento permitiu examinar os simuladores como sistemas representacionais digitais sem dissociar as ocorrências do contexto funcional em que se manifestaram. A vinculação entre código, marcação temporal, ação de exploração, resposta do sistema e justificativa analítica tornou possível retornar ao material original e verificar os fundamentos empíricos das interpretações apresentadas.

4.8 Construção das sínteses transversais

Após a codificação das evidências nas sete dimensões primárias — **Multiplicidade Representacional (MR)**, **Variedade de Formas Representacionais Intranível (VFRI)**, **Correspondência Conceitual (CC)**, **Dinâmica Representacional (DR)**, **Relação Temporal (RT)**, **Modulação Representacional (MD)** e **Potencial Interativo-Representacional (PIR)** — foram elaboradas duas sínteses transversais:

a Configuração Representacional Dominante (CRD) e o Potencial Didático-Representacional (PDR).

Essas sínteses não constituíram novas dimensões de codificação nem foram atribuídas diretamente a ocorrências isoladas. Foram construídas em etapa posterior, mediante a integração interpretativa das evidências já codificadas. Enquanto as dimensões primárias permitiram decompor analiticamente o funcionamento representacional dos simuladores, a CRD e o PDR possibilitaram recompor essas informações em caracterizações globais e contextualizadas.

A construção das sínteses aproximou-se dos procedimentos de redução, organização, comparação e interpretação de dados qualitativos discutidos por Miles, Huberman e Saldaña (2014). Não se tratou, entretanto, da aplicação integral do método proposto por esses autores, mas da utilização de matrizes analíticas para relacionar evidências, dimensões e interpretações. A rastreabilidade entre as sínteses e o material empírico foi mantida por meio da cadeia de evidências descrita na seção anterior, em consonância com o princípio de auditabilidade discutido por Yin (2018).

A CRD e o PDR foram construídos separadamente para cada simulador e, quando necessário, para módulos ou configurações internas que apresentavam organizações representacionais significativamente distintas. Posteriormente, essas sínteses foram comparadas entre os recursos que compuseram o corpus.

4.8.1 Natureza das sínteses transversais

As sínteses transversais apresentaram caráter interpretativo, relacional e fundamentado em evidências. Sua elaboração não consistiu na soma mecânica de ocorrências nem na transformação automática de contagens em categorias globais.

Uma dimensão com muitos registros não foi necessariamente considerada a mais estruturante do simulador. Acionamentos numerosos poderiam decorrer da repetição de um mesmo componente, enquanto uma categoria menos recorrente poderia exercer função decisiva na articulação entre níveis, na orientação da leitura ou na transformação das representações.

Por essa razão, foram considerados conjuntamente:

- a) a recorrência das ocorrências;

- b) sua distribuição pelas telas, módulos ou etapas;
- c) sua permanência ao longo do percurso de exploração;
- d) sua função na organização representacional;
- e) sua articulação com outras dimensões;
- f) sua dependência das ações disponibilizadas pelo sistema;
- g) sua relevância para o conteúdo químico abordado;
- h) as restrições, simplificações e omissões observadas;
- i) a existência de evidências convergentes ou divergentes;
- j) as condições funcionais e contextuais em que as ocorrências foram identificadas.

Desse modo, as sínteses resultaram de uma leitura integrada do conjunto de evidências, e não de um único indicador.

4.8.2 Matriz de síntese transversal

Para cada simulador foi elaborada uma **matriz de síntese transversal (Quadro 9)**, preenchida após a consolidação da codificação primária. Essa matriz reuniu as evidências consideradas mais relevantes para a construção da CRD e do PDR.

Quadro 9 – Matriz de síntese transversal reunindo as evidências consideradas mais relevantes para a construção da CRD e do PDR

Campo	Conteúdo registrado
Código do simulador	Identificador do recurso
Escopo da síntese	Simulador completo, módulo, tela ou percurso específico
Conteúdo químico	Conceito ou fenômeno abordado
Evidências centrais de MR	Níveis presentes, ausentes e coocorrentes; formas de disponibilização isolada, simultânea ou articulada; condições necessárias para sua manifestação
Evidências centrais de VFRI	Formas predominantes em cada nível representacional
Evidências centrais de CC	Relações conceituais explícitas e implícitas

Campo	Conteúdo registrado
Evidências centrais de DR	Transformações representacionais relevantes
Evidências centrais de RT	Organização e coordenação temporal das ocorrências visuais, sonoras e audiovisuais
Evidências centrais de MD	Destaques, restrições, simplificações, omissões e complementações visuais ou sonoras
Evidências centrais de PIR	Possibilidades de manipulação, exploração e construção
Evidências convergentes	Ocorrências que sustentam uma mesma interpretação
Evidências divergentes	Ocorrências que limitam, contradizem ou relativizam a interpretação
CRD	Caracterização da organização representacional dominante
Justificativa da CRD	Evidências e relações que fundamentam a síntese
PDR	Caracterização do potencial didático-representacional
Condições de realização do PDR	Ações, percursos e articulações necessárias
Limitações do PDR	Restrições representacionais ou funcionais identificadas
Grau de sustentação	Suficiente, parcial ou inconclusivo
Evidências de referência	Código do vídeo e timecode correspondente
Síntese do canal sonoro	Fontes, ocorrências, relações audiovisuais, recorrências, divergências, condições técnicas e limites inferenciais

Fonte: Elaboração própria (2026).

A matriz não substituiu o quadro de evidências audiovisuais funcionais. Sua função foi condensar os resultados da codificação, preservando a possibilidade de retornar aos registros originais sempre que uma interpretação precisasse ser conferida.

4.8.3 Configuração Representacional Dominante (CRD)

A **Configuração Representacional Dominante (CRD)** corresponde à síntese da organização representacional que se mostrou mais recorrente, permanente ou estruturalmente relevante no funcionamento de determinado simulador.

O termo **configuração** foi empregado para indicar que a síntese não se restringiu à identificação de uma representação isolada. A CRD envolveu o modo como formas, níveis, relações conceituais, transformações, organizações temporais, modulações e possibilidades interativas se combinaram no percurso funcional do recurso.

O termo **dominante** não significou exclusividade. Um simulador poderia apresentar diferentes configurações ao longo da exploração, embora uma delas estruturasse predominantemente a apresentação do conteúdo, a resposta às ações ou a relação entre as representações. A configuração dominante foi, portanto, aquela que melhor caracterizou a lógica representacional prevalente do recurso no escopo analisado.

A CRD respondeu à seguinte questão:

Qual organização de níveis e formas representacionais, relações conceituais, transformações, temporalidades, modulações e possibilidades interativas estrutura predominantemente a representação do conteúdo químico no simulador?

Sua construção considerou:

- a) os níveis representacionais mobilizados;
- b) as formas predominantes no interior de cada nível;
- c) o modo como as representações foram espacial e funcionalmente organizadas;
- d) a existência e a explicitação de correspondências conceituais;
- e) a presença de representações estáticas ou dinâmicas;
- f) a organização temporal simultânea ou sequencial;
- g) a coordenação temporal sincrônica ou assíncrona;
- h) os aspectos selecionados, destacados, simplificados ou omitidos;
- i) o papel das ações de exploração na produção de alterações representacionais;
- j) a permanência ou recorrência dessa organização no percurso analisado.

A elaboração da CRD ocorreu em três movimentos. Inicialmente, foram identificados os componentes mais recorrentes e estruturantes de cada dimensão. Em seguida, examinou-se como esses componentes se articulavam. Por fim, foi redigida uma formulação sintética capaz de representar a lógica predominante do simulador.

Uma formulação de CRD poderia assumir, por exemplo, a seguinte estrutura:

- Configuração predominantemente submicroscópico-simbólica, organizada pela apresentação simultânea de um modelo particulado dinâmico e de valores numéricos, com correspondências conceituais parcialmente explícitas, atualizações sincrônicas e manipulação direta de variáveis.

A redação da CRD deveria indicar, sempre que empiricamente sustentado:

1. o nível ou a combinação de níveis predominantes;
2. as formas representacionais centrais;
3. o tipo de articulação entre elas;
4. seu comportamento dinâmico e temporal;
5. o papel das possibilidades interativas;
6. as principais condições ou restrições da configuração.

Não foram criados tipos fixos de CRD antes do exame do corpus. Configurações semelhantes puderam ser agrupadas posteriormente, desde que compartilhassem propriedades efetivamente verificadas. Essa decisão evitou enquadrar antecipadamente os simuladores em tipologias não derivadas dos dados.

4.8.3.1 Regras para atribuição da CRD

A atribuição da CRD seguiu as seguintes regras:

1. **Regra da abrangência:** a configuração deveria manifestar-se em parcela relevante do percurso analisado ou exercer função estruturante no funcionamento do simulador.
2. **Regra da articulação:** a CRD deveria integrar, sempre que pertinente, evidências de mais de uma dimensão primária.
3. **Regra da prevalência estrutural:** a dominância não seria definida pelo maior número de acionamentos, mas pela combinação entre presença categorial, permanência e função representacional.

4. **Regra da especificidade:** a formulação deveria caracterizar o simulador analisado, evitando descrições genéricas aplicáveis indistintamente a qualquer recurso.
5. **Regra da coexistência:** configurações secundárias ou localizadas não seriam apagadas; seriam registradas quando modificassem ou relativizassem a interpretação da configuração dominante.
6. **Regra da variação interna:** quando módulos de um mesmo simulador apresentassem organizações significativamente distintas, poderiam ser construídas CRDs específicas por módulo, acompanhadas de uma síntese geral.
7. **Regra da evidência convergente:** a CRD deveria ser sustentada por mais de uma ocorrência ou por uma ocorrência estrutural cuja relevância pudesse ser demonstrada no percurso funcional.
8. **Regra da não hierarquização automática:** nenhuma configuração seria considerada superior apenas por apresentar maior quantidade de formas, níveis, movimentos ou controles.

Quando as evidências não permitissem reconhecer uma configuração predominante, o resultado seria registrado como **CRD heterogênea** ou **CRD inconclusiva**, acompanhado da justificativa correspondente. A heterogeneidade indicaria a coexistência de diferentes configurações relevantes; a inconclusividade indicaria insuficiência ou ambiguidade das evidências.

4.8.4 Potencial Didático-Representacional (PDR)

O **Potencial Didático-Representacional (PDR)** corresponde à síntese das possibilidades oferecidas pela configuração representacional do simulador para tornar observáveis, relacionáveis, manipuláveis, comparáveis e interpretáveis determinados aspectos do conhecimento químico.

O PDR não foi entendido como propriedade didática absoluta do recurso, nem como comprovação de aprendizagem. Seu objeto foram as possibilidades incorporadas ao desenho representacional e funcional do simulador. Portanto, a

análise não permitiu afirmar que determinado usuário compreendeu um conceito, aprendeu um conteúdo ou apresentou melhor desempenho após a exploração.

A utilização do termo **potencial** indica precisamente essa delimitação. O simulador pode disponibilizar condições representacionais favoráveis à exploração de determinadas relações, mas sua realização depende de fatores não investigados diretamente nesta pesquisa, como objetivos de uso, conhecimentos prévios, orientação docente, percurso de exploração e contexto educacional.

A noção de potencial apoia-se na compreensão de que as representações externas podem exercer funções distintas em ambientes multirrepresentacionais, como complementar informações, restringir interpretações e favorecer a construção de relações entre registros (Ainsworth, 2006). Também considera que a compreensão de representações depende da forma como diferentes fontes de informação são estruturadas, relacionadas e processadas (Schnotz; Bannert, 2003). Nesta pesquisa, entretanto, a sistematização dessas contribuições nas dimensões primárias e na síntese denominada PDR constitui uma elaboração autoral.

O PDR respondeu à seguinte questão:

Que possibilidades de acesso, exploração e articulação do conhecimento químico são oferecidas pela configuração representacional do simulador, sob quais condições e com quais limitações?

Sua construção considerou as contribuições complementares das sete dimensões primárias (Quadro 10).

Quadro 10 – Contribuições das dimensões primárias para a construção do Potencial Didático-Representacional (PDR)

Dimensão	Contribuição para a construção do PDR
MR	Possibilidade de identificar a presença, a ausência, a coocorrência e os modos de disponibilização dos níveis representacionais mobilizados pelo simulador.
VFRI	Diversidade e especificidade das formas pelas quais o conteúdo é expresso
CC	Possibilidade de reconhecer relações entre formas, registros e níveis
DR	Possibilidade de observar transformações e mudanças de estado
RT	Possibilidade de acompanhar a ordem e a coordenação temporal das ocorrências
MD	Orientação, restrição, simplificação e complementação da interpretação
PIR	Possibilidade de intervir nas representações e observar respostas do sistema

Fonte: Elaboração própria (2026).

As dimensões não receberam pesos fixos. Sua relevância variou conforme o conteúdo, a finalidade e a estrutura de cada simulador. Um recurso voltado à visualização de estruturas moleculares, por exemplo, poderia apresentar potencial representacional relevante mesmo sem mobilizar todos os níveis químicos. Da mesma forma, a ausência de determinada possibilidade interativa não seria considerada deficiência quando essa possibilidade não fosse necessária à finalidade do recurso.

4.8.4.1 Componentes descritivos do PDR

O PDR foi descrito por meio de cinco componentes complementares:

1. **Possibilidades representacionais:** aspectos do conteúdo que o simulador permite visualizar, distinguir ou acompanhar.
2. **Possibilidades relacionais:** relações entre formas, níveis, variáveis, estados ou fenômenos que podem ser reconhecidas na configuração.
3. **Possibilidades exploratórias:** ações que permitem modificar condições, comparar configurações, testar variações ou reorganizar representações.
4. **Condições de realização:** ações, conhecimentos, convenções ou percursos necessários para que as possibilidades sejam mobilizadas.
5. **Limitações representacionais:** simplificações, restrições, omissões, ambiguidades ou desarticulações que delimitam o alcance da representação.

A formulação do PDR combinou esses componentes em uma descrição integrada. Um exemplo de redação seria:

O simulador apresenta potencial para relacionar variações de temperatura ao movimento das partículas, pois permite manipular a variável e observar atualizações coordenadas em um modelo particulado e em indicadores numéricos. Esse potencial depende do reconhecimento da relação entre os indicadores e o modelo, parcialmente orientada por cores e legendas. Sua interpretação é limitada pela ausência de explicitação das condições de escala e pela simplificação do comportamento das partículas.

Esse tipo de formulação explicita simultaneamente:

- o que pode ser explorado;

- quais evidências sustentam essa possibilidade;
- como as dimensões se articulam;
- quais condições são necessárias;
- quais restrições delimitam a interpretação.

4.8.4.2 Regras para a construção do PDR

A construção do PDR seguiu as seguintes regras:

1. **Regra da possibilidade incorporada:** somente foram consideradas possibilidades sustentadas por características efetivamente presentes e verificadas no simulador.
2. **Regra da vinculação conceitual:** toda afirmação sobre o PDR deveria indicar o conteúdo, a relação ou o processo químico ao qual se referia.
3. **Regra da articulação dimensional:** o PDR deveria resultar da integração de evidências de duas ou mais dimensões sempre que a possibilidade interpretada dependesse dessa articulação.
4. **Regra da condicionalidade:** as possibilidades foram descritas juntamente com as condições necessárias à sua realização, quando identificáveis.
5. **Regra da consideração das restrições:** simplificações, omissões e ambiguidades foram incorporadas à síntese para delimitar o alcance do potencial identificado.
6. **Regra da não inferência de aprendizagem:** não foram empregados enunciados que atribuísem compreensão, aprendizagem, motivação ou desempenho aos usuários.
7. **Regra da não equivalência entre variedade e potencial:** maior quantidade de formas representacionais não implicou automaticamente maior PDR.
8. **Regra da não equivalência entre interatividade e qualidade:** maior quantidade de controles ou ações disponíveis não foi interpretada automaticamente como melhor potencial didático-representacional.
9. **Regra da finalidade:** as evidências foram interpretadas considerando o conteúdo e a função específica do recurso, evitando aplicar um padrão único de completude a todos os simuladores.

10. **Regra da proporcionalidade:** as conclusões foram formuladas no mesmo nível de abrangência das evidências, sem generalizações para além do simulador, módulo ou percurso efetivamente analisado.
11. **Regra da convergência:** afirmações mais abrangentes exigiram evidências provenientes de diferentes ocorrências ou dimensões.
12. **Regra da incerteza:** quando as evidências fossem insuficientes ou contraditórias, o PDR seria registrado como parcial ou inconclusivo, sem preenchimento interpretativo baseado em presunções.

4.8.5 Distinção entre PIR e PDR

A distinção entre **Potencial Interativo-Representacional (PIR)** e **Potencial Didático-Representacional (PDR)** foi preservada em todas as etapas da análise (Quadro 11).

Quadro 11 – Diferenças entre o Potencial Interativo-Representacional (PIR) e Potencial Didático-Representacional (PDR)

Aspecto	PIR	PDR
Estatuto analítico	Dimensão primária	Síntese transversal
Unidade de incidência	Funcionalidade ou possibilidade de ação	Configuração representacional integrada
Questão central	O que o sistema permite realizar com suas representações?	Que possibilidades de acesso, exploração e articulação do conhecimento químico são oferecidas?
Base empírica	Controles, ações e respostas verificadas	Integração das evidências das sete dimensões primárias
Momento de aplicação	Codificação das unidades de registro	Etapa posterior à codificação
Alcance	Possibilidades funcionais específicas	Potencial representacional global e contextualizado
Implica aprendizagem?	Não	Não

Fonte: Elaboração própria (2026).

O PIR pôde contribuir para o PDR, mas não o determinou isoladamente. Uma funcionalidade interativa poderia ampliar as possibilidades de exploração quando produzisse alterações representacionalmente relevantes. Entretanto, uma ação meramente operacional, sem relação reconhecível com o conteúdo químico, não sustentaria por si mesma uma interpretação de PDR.

De modo semelhante, um simulador com baixa interatividade poderia apresentar PDR relevante quando organizasse de maneira clara formas, relações, transformações e sequências representacionais. Portanto, PIR e PDR não foram tratados como termos equivalentes nem como medidas diretamente proporcionais.

4.8.6 Relação entre CRD e PDR

A CRD e o PDR foram construídos em sequência lógica, mas não representaram níveis hierárquicos de qualidade.

A CRD descreveu **como o simulador organiza predominantemente suas representações**. O PDR interpretou **quais possibilidades e limitações decorrem dessa organização para o acesso e a exploração do conhecimento químico**.

O percurso de construção pode ser sintetizado da seguinte maneira:

evidências audiovisuais funcionais → codificação nas dimensões primárias → integração das evidências → identificação da CRD → interpretação do PDR.

A CRD forneceu a base descritiva para o PDR. Entretanto, não se estabeleceu correspondência automática entre determinado tipo de CRD e um PDR previamente definido. Configurações semelhantes poderiam oferecer potenciais distintos em razão das formas de articulação conceitual, das possibilidades de intervenção, das orientações disponibilizadas ou das limitações identificadas.

A passagem da CRD para o PDR foi realizada por meio das seguintes perguntas:

- a) quais aspectos do conteúdo se tornam observáveis nessa configuração?;
- b) quais relações conceituais podem ser reconhecidas?;
- c) quais transformações podem ser acompanhadas?;

- d) como a organização temporal participa dessa compreensão?;
- e) quais ações permitem explorar, modificar ou comparar as representações?;
- f) quais recursos orientam ou restringem a interpretação?;
- g) quais conhecimentos ou convenções precisam ser mobilizados pelo usuário?;
- h) quais simplificações, omissões ou ambiguidades delimitam o alcance da configuração?;
- i) quais possibilidades dependem de percursos específicos de exploração?;
- j) quais afirmações podem ser sustentadas sem inferir efeitos sobre a aprendizagem?

4.8.7 Regras interpretativas gerais

Além das regras específicas da CRD e do PDR, foram adotadas regras gerais para assegurar consistência na construção das sínteses transversais:

1. **Primazia da evidência:** nenhuma síntese foi produzida sem vinculação explícita às unidades codificadas e aos respectivos registros audiovisuais funcionais.
2. **Separação entre descrição e interpretação:** primeiramente foi descrita a configuração observável; posteriormente foram interpretadas suas possibilidades e limitações.
3. **Integração sem apagamento:** a síntese reuniu as dimensões, mas preservou particularidades, divergências e variações internas relevantes.
4. **Ausência de compensação numérica:** maior manifestação de uma dimensão não compensou automaticamente restrições observadas em outra.
5. **Ausência de pontuação global:** não foi produzido índice numérico geral de CRD ou PDR.
6. **Contextualização:** toda síntese foi delimitada pelo conteúdo, pelo módulo, pela finalidade e pelo percurso funcional analisado.
7. **Não valoração automática:** presença, ausência, variedade ou número de registros não foram considerados isoladamente indicadores de superioridade ou deficiência.

8. **Consideração de evidências negativas:** ausências, desarticulações, ambiguidades e restrições foram incorporadas quando empiricamente relevantes.
9. **Diferenciação entre disponibilidade e realização:** uma possibilidade disponibilizada pelo sistema não foi confundida com seu uso efetivo por estudantes ou professores.
10. **Diferenciação entre potencial e efeito:** o PDR indicou possibilidades representacionais, não resultados de ensino ou aprendizagem.
11. **Revisão comparativa:** sínteses preliminares foram confrontadas com simuladores ou módulos que apresentavam propriedades semelhantes, buscando uniformidade na aplicação dos critérios.
12. **Registro das decisões:** alterações nas sínteses foram documentadas no registro de decisões analíticas, com indicação das evidências e justificativas correspondentes.

4.8.8 Grau de sustentação das sínteses

Para explicitar a relação entre evidência e interpretação, foi atribuído às sínteses um **grau de sustentação**, sem finalidade classificatória ou avaliativa (ver Quadro 12).

Quadro 12 – Critérios considerados para atribuição dos diferentes graus de sustentação para explicitar a relação entre evidência e interpretação

Grau	Critério
Suficiente	Evidências convergentes, distribuídas no percurso analisado e adequadas à abrangência da interpretação
Parcial	Evidências relevantes, mas localizadas, incompletas ou acompanhadas de ocorrências divergentes
Inconclusivo	Evidências insuficientes, ambíguas ou tecnicamente comprometidas

Fonte: Elaboração própria (2026).

O grau de sustentação não indicou a qualidade do simulador. Indicou apenas a robustez empírica da interpretação formulada pelo pesquisador. Uma CRD ou um PDR inconclusivo poderia decorrer da insuficiência dos registros, da

heterogeneidade do recurso ou da impossibilidade de verificar determinadas funcionalidades.

4.8.9 Tratamento descritivo nas sínteses

Os inventários e as distribuições categoriais produzidos na etapa anterior foram utilizados como apoio à identificação de padrões e à comparação entre simuladores. Não foram estabelecidos pontos de corte universais para definir a dominância de uma configuração ou a intensidade do PDR. No caso do som, compararam-se categorias de eventos e funções; o total de impulsos repetidos foi excluído da síntese.

Os dados descritivos responderam a questões como:

- a) quais formas e categorias estavam presentes em cada caso?;
- b) em quais módulos determinada relação foi identificada?;
- c) como as categorias se distribuíram entre módulos, independentemente da ordem de acesso registrada?;
- d) quais articulações entre dimensões assumiram função estruturante?;
- e) quais categorias permaneceram localizadas, excepcionais ou funcionalmente diferenciadas?

Esses resultados foram sempre confrontados com a função e o contexto das categorias. A distribuição categorial apoiou a síntese, mas não substituiu o julgamento interpretativo fundamentado.

Não foram utilizados rótulos como **baixo**, **médio** ou **alto PDR**, pois esses termos poderiam sugerir uma escala objetiva de desempenho não sustentada pelo desenho metodológico. O PDR foi apresentado por meio de descrições analíticas das possibilidades, condições e limitações identificadas.

4.8.10 Auditabilidade das sínteses transversais

A auditabilidade da CRD e do PDR foi assegurada pela manutenção da vinculação entre:

síntese transversal → justificativa interpretativa → dimensões primárias → códigos das evidências → marcações temporais → registro audiovisual funcional original.

Cada formulação de CRD e PDR foi acompanhada dos códigos das evidências que a sustentavam. Quando uma interpretação dependia da articulação entre ocorrências situadas em diferentes momentos ou módulos, todos os registros relevantes foram indicados.

Também foram preservadas:

- a) as versões preliminares das sínteses;
- b) as alterações realizadas após a comparação entre casos;
- c) as evidências divergentes;
- d) as justificativas para manutenção ou revisão das interpretações;
- e) as decisões relativas a casos parciais ou inconclusivos;
- f) a versão consolidada da matriz transversal.

Esse procedimento tornou possível reconstruir não apenas a origem empírica das sínteses, mas também o percurso interpretativo utilizado em sua elaboração.

4.8.11 Síntese do procedimento

A construção das sínteses transversais ocorreu nas seguintes etapas:

- a) consolidação do quadro de evidências audiovisuais funcionais;
- b) agrupamento das ocorrências por simulador, módulo e dimensão;
- c) identificação das evidências recorrentes e estruturalmente relevantes;
- d) comparação entre ocorrências convergentes, divergentes e excepcionais;
- e) preenchimento da matriz de síntese transversal;
- f) descrição da organização representacional predominante;
- g) formulação e justificação da CRD;
- h) identificação das possibilidades, condições e limitações representacionais;
- i) formulação e justificação do PDR;
- j) atribuição do grau de sustentação;
- k) revisão comparativa entre simuladores;

I) vinculação das sínteses aos códigos e às marcações temporais das evidências.

A CRD e o PDR permitiram integrar os resultados das sete dimensões sem transformar o modelo em uma escala numérica de avaliação. A primeira sintetizou a lógica representacional predominante de cada simulador; o segundo explicitou as possibilidades e limitações que essa configuração oferecia para a exploração do conhecimento químico. Ambas permaneceram subordinadas às evidências empíricas e aos limites do desenho metodológico da pesquisa.

5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

5.1 Análise individual das três simulações funcionais do corpus

Este capítulo apresenta os resultados da inspeção direta dos três vídeos SVQ-A, SVQ-B e SVQ-C, que totalizam 00:53:04,631. A análise percorreu os quadros extraídos, os controles acionados, as alterações de tela e o áudio interno do próprio simulador, mantendo a lógica evidência–interpretação–diálogo teórico–limite inferencial. Como não há fala do usuário, as ocorrências audíveis foram atribuídas ao simulador somente quando sua sincronização com uma ação ou resposta visual pôde ser verificada.

A triagem sonora foi usada apenas para localizar candidatos no fluxo audiovisual. A unidade efetiva de análise foi a categoria funcional de ação ou de resposta do sistema: o que foi acionado, qual efeito apareceu em tela, se houve som, se a associação reapareceu sob condições comparáveis e se o sinal possuía função própria ou apenas redundava a operação. Cliques repetidos que geraram a mesma resposta foram colapsados em uma única categoria; as repetições permaneceram somente como prova de estabilidade. Os timecodes são endereços documentais, não resultados, e a ordem global de acesso aos campos não recebeu peso analítico.

Momentos não consecutivos foram reunidos sempre que apresentaram equivalência funcional. Duração, intensidade e forma acústica auxiliaram a discriminação interna dos sinais, mas não foram convertidas em medida de relevância, aprendizagem ou motivação.

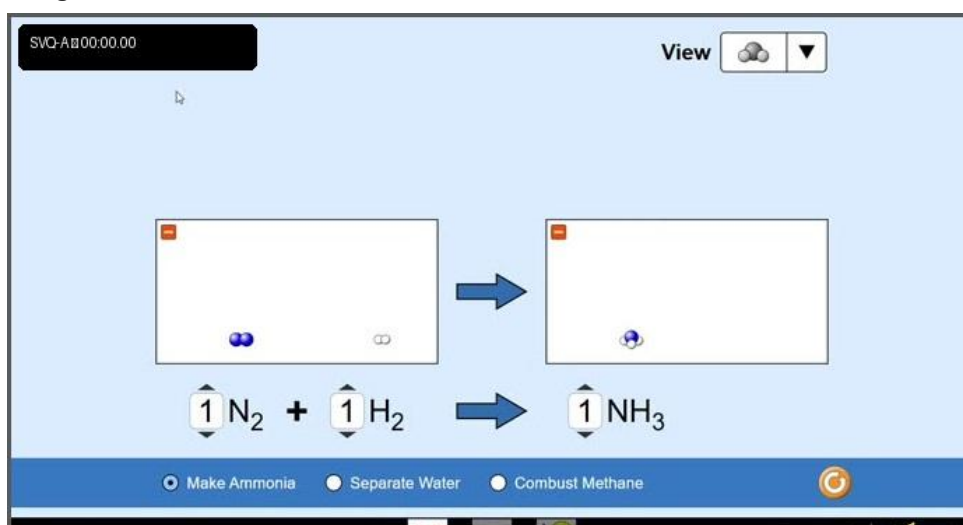
5.1.1 Análise individual da Simulação A — Intro

5.1.1.1 Identificação e delimitação do SVQ-A

O vídeo SVQ-A corresponde ao módulo Intro e tem duração de 00:10:45,146. Ele constitui um caso funcional independente porque oferece três reações — síntese de amônia, decomposição da água e combustão do metano —, manipulação livre dos coeficientes, quatro modos de visualização e reinicialização, sem pontuação ou progressão por rodadas. A delimitação impede que recursos observados apenas nos módulos Equações ou Jogo sejam retroativamente atribuídos ao Intro. No recorte analisado, a equação simbólica permanece no eixo inferior, enquanto painéis de reagentes e produtos e a opção “Ver” ocupam o mesmo campo de trabalho.

A Figura 4 registra a interface inicial que fundamenta essa delimitação. Trata-se de um simulador de um fenômeno conceitual e não de uma reprodução macroscópica de laboratório: as moléculas figuradas e a equação constroem um modelo para a conservação, não uma filmagem de uma reação. A distinção é coerente com Johnstone (1982, 1991) e com Talanquer (2011), que exigem separar o fenômeno, o modelo particulado e a linguagem simbólica. O áudio, informado como proveniente do próprio simulador, integra o caso como modo semiótico, mas sua função é determinada por categoria de evento e nunca presumida a partir da simples presença de alto-falante ou faixa sonora. O timecode apenas localiza a evidência e não atribui importância à posição do evento na gravação.

Figura 4 – Interface inicial e delimitação funcional do SVQ-A/Intro



Fonte: elaboração própria a partir do corpus audiovisual do SVQ-A (00:00:00) (2026).

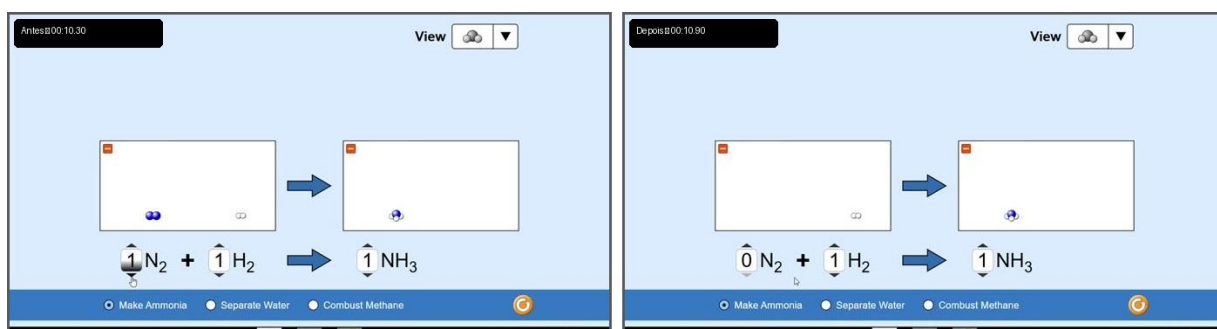
5.1.1.2 Inventário documental e controle do corpus do SVQ-A

O controle do corpus combinou duração, identidade do arquivo, extração de quadros a 2 fps e inspeção da faixa sonora. Após o colapso das repetições equivalentes, o SVQ-A apresentou cinco categorias funcionalmente distintas: quatro ações — ajuste de coeficiente, seleção de reação, mudança de visualização e reinicialização/navegação — e um estado resultante, a emergência do balanceamento. O número expressa classes de ação/resposta verificadas, e não quantidade de cliques ou de episódios sonoros. A matriz categorial e os localizadores representativos são apresentados nos Apêndices A e E.

O par antes/depois mostrado na Figura 5 liga um ajuste documentado à alteração visível do coeficiente e do número de entidades. A cadeia arquivo–timecode–quadro–evento acústico atende à exigência de rastreabilidade de Bardin (2016), Krippendorff (2018) e Yin (2018). O timecode funciona somente como endereço documental; o fato de o evento aparecer antes ou depois de outro campo acessado não lhe confere maior relevância. A interpretação funcional depende da relação interna entre ação, som, imagem e estado

químico. Não se infere intenção do designer a partir de parâmetros acústicos isolados.

Figura 5 – Controle audiovisual de um ajuste de coeficiente no SVQ-A



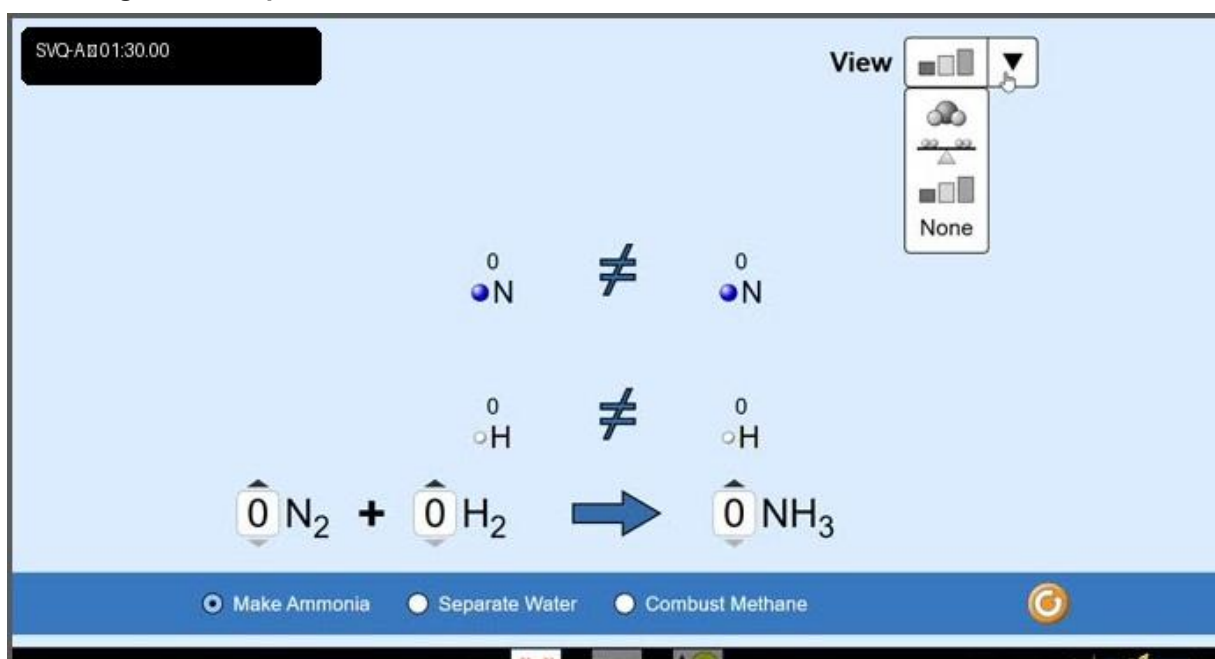
Fonte: elaboração própria a partir do corpus audiovisual do SVQ-A (00:00:10,30–00:00:10,90) (2026).

5.1.1.3 Arquitetura Imagético-Contextual (AIC) do SVQ-A

A AIC do SVQ-A organiza um espaço estável: a equação e seus controles ficam na base do campo principal; reagentes e produtos ocupam painéis laterais; a seta central estabelece direção; o seletor “Ver” alterna as lentes quantitativas; e a faixa inferior seleciona a reação. Essa estabilidade conserva a orientação durante a exploração. O som aparece como camada temporal não espacializada: impulsos curtos acompanham diferentes ações, mas não ocupam uma zona própria nem oferecem legenda que explique seu código. Por isso, sua origem interna é verificável no corpus, enquanto seu significado precisa ser reconstruído pela coocorrência.

Na Figura 6, o menu de visualizações explicita que a arquitetura permite trocar a forma de evidência sem mudar a equação. Kress (2010) e Jewitt, Bezemer e O'Halloran (2016) sustentam que significado multimodal emerge da configuração conjunta dos modos. Aqui, escrita, símbolo, imagem, cor, movimento e som não têm o mesmo papel: a espacialidade organiza comparações; o movimento torna a atualização visível; e o impulso sonoro marca a ocorrência de uma ação. Como o mesmo padrão acústico acompanha ajustes, menus e navegação, ele funciona predominantemente como índice operacional, não como signo químico específico.

Figura 6 – Arquitetura do SVQ-A e menu de formas de visualização



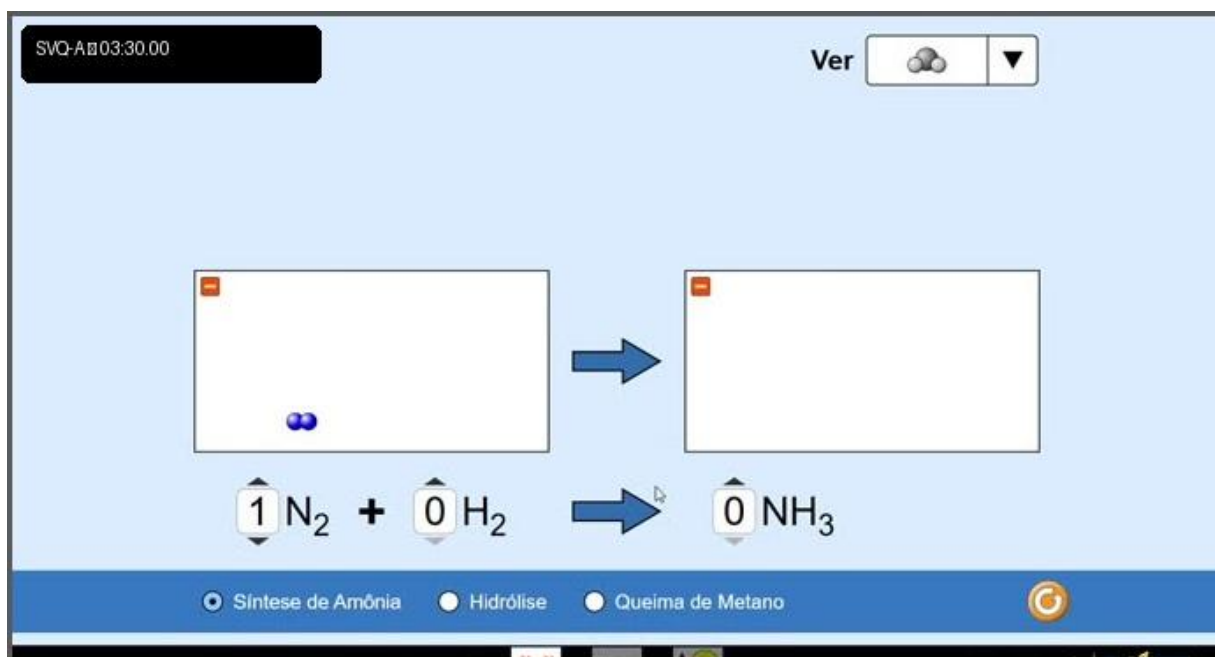
Fonte: elaboração própria a partir do corpus audiovisual do SVQ-A (00:01:30) (2026).

5.1.1.4 Multiplicidade Representacional (MR) do SVQ-A

O SVQ-A articula a equação simbólica, modelos diagramáticos de partículas e duas formas quantitativas — balanças por elemento e gráficos de barras. A seta, os sinais de adição, os coeficientes inteiros e as fórmulas compõem o registro simbólico; as esferas agrupadas representam entidades submicroscópicas; as balanças e barras tornam comparáveis totais atômicos. Não foi identificada representação macroscópica funcional. O som também não cria um quarto nível químico, pois os episódios observados não codificam espécie, número de átomos ou grandeza química.

A Figura 7 exemplifica a coocorrência entre equação e partículas. Conforme Ainsworth (1999, 2006), a multiplicidade ganha valor analítico quando as representações se complementam, restringem leituras ou exigem construção de relações. No SVQ-A, a contribuição do áudio é mais modesta: ele reforça temporalmente que uma ação ocorreu, mas a informação sobre o que mudou permanece visual. Essa diferença é relevante diante de Enge et al. (2024): integração audiovisual não deve ser confundida com sonificação. Para haver sonificação informacional, seria necessária uma correspondência sistemática entre variável química e parâmetro sonoro, o que não foi encontrado.

Figura 7 – Coocorrência da equação simbólica e do modelo de partículas no SVQ-A



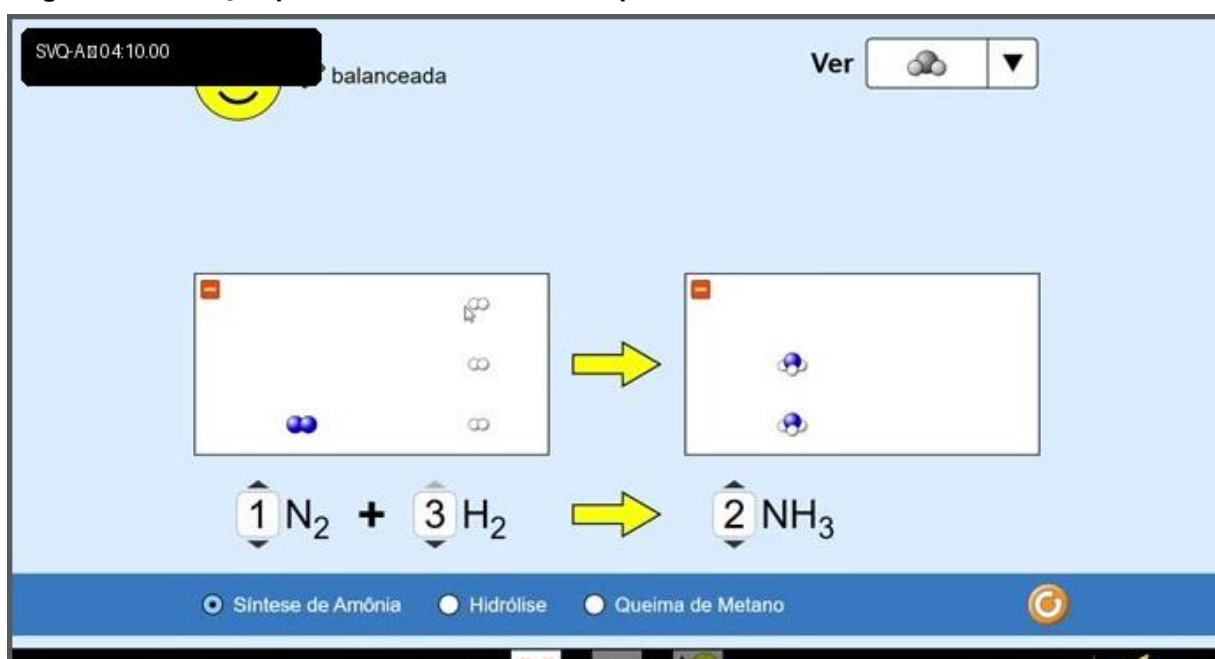
Fonte: elaboração própria a partir do corpus audiovisual do SVQ-A (00:03:30) (2026).

5.1.1.5 Variedade de Formas Representacionais Intranível (VFRI) do SVQ-A

A VFRI é particularmente clara no domínio quantitativo. As balanças figuram igualdade ou desigualdade pelo nivelamento de hastes separadas por elemento; os gráficos de barras expressam magnitudes e relações de igualdade por comprimento, número e sinal relacional; as partículas exibem a multiplicação das espécies. Essas formas não são intercambiáveis sem perda: cada uma seleciona uma propriedade. A alternativa “Nenhuma” mantém a equação e o feedback global, permitindo observar o que desaparece quando a mediação diagramática é retirada.

As balanças apresentadas na Figura 8 mostram a especialização intranível. Gilbert e Treagust (2009) e Schnotz e Bannert (2003) ajudam a interpretar essa distribuição: diferentes formatos impõem estruturas de leitura distintas, mesmo quando remetem ao mesmo conteúdo. O som não varia de maneira estável com Partículas, Balanças, Barras ou Nenhuma; episódios breves acompanham a escolha do menu, mas não traduzem as propriedades visuais de cada forma. Ele sinaliza mudança de configuração e não substitui a comparação quantitativa oferecida pela imagem.

Figura 8 – Balanças por elemento como forma quantitativa intranível no SVQ-A



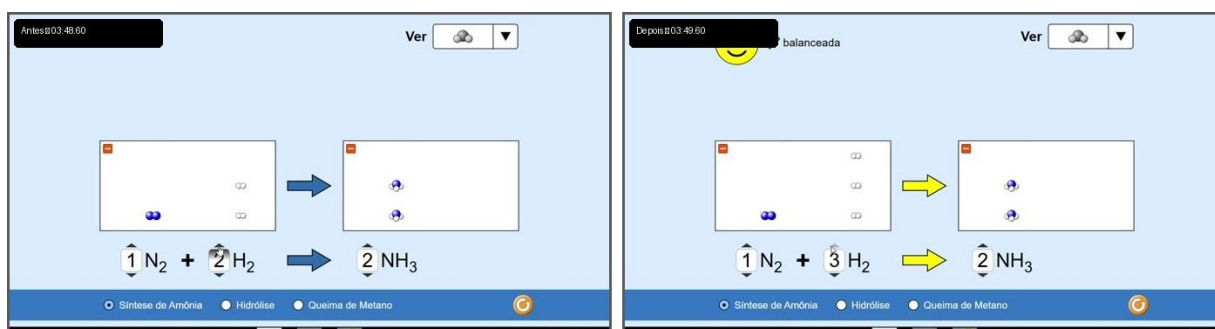
Fonte: elaboração própria a partir do corpus audiovisual do SVQ-A (00:04:10) (2026).

5.1.1.6 Correspondência Conceitual (CC) do SVQ-A

A correspondência conceitual mais consistente liga coeficiente, número de moléculas e total de átomos por elemento. Na síntese de amônia, a passagem para (1,3,2) faz convergir dois átomos de nitrogênio e seis de hidrogênio em cada lado; seta amarela, sorriso e “balanceada” condensam o resultado. O sistema preserva a identidade das espécies e altera sua quantidade relativa, tornando observável a conservação. A correspondência não é apenas proximidade espacial: é uma covariação estruturada entre registros.

A Figura 9 registra o estado imediatamente anterior e o estado balanceado. Esse mapeamento dialoga com Johnstone (1993, 2000), Treagust, Chittleborough e Mamiala (2003) e Hamerská et al. (2024), que destacam a dificuldade de ligar símbolos a partículas sem reduzir o balanceamento a procedimento algorítmico. O episódio sonoro concomitante pertence à mesma classe de impulso breve usada em outras ações; assim, ele confirma temporalmente a atuação, mas não comunica por si mesmo a igualdade elementar. A confirmação química depende da convergência visual entre coeficiente, entidades, seta e rótulo.

Figura 9 – Correspondência entre coeficientes, partículas e estado balanceado no SVQ-A



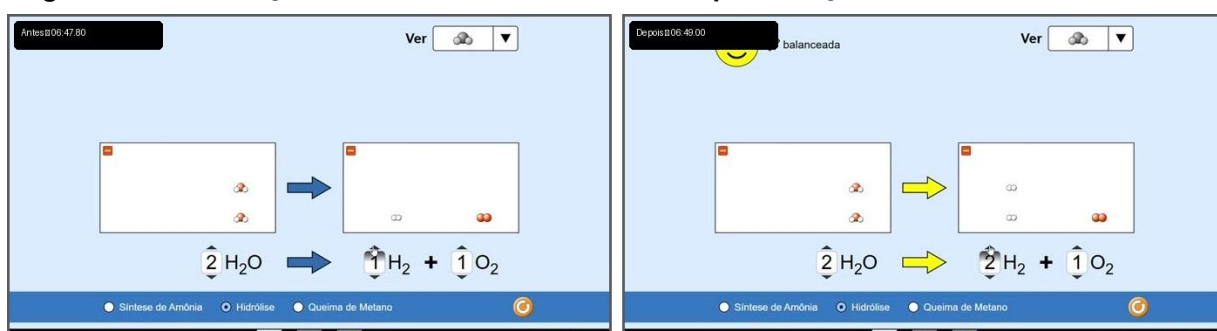
Fonte: elaboração própria a partir do corpus audiovisual do SVQ-A (00:03:48,60–00:03:49,60) (2026).

5.1.1.7 Dinâmica Representacional (DR) do SVQ-A

A dinâmica representacional é contínua: cada clique nos controles altera imediatamente o coeficiente e atualiza partículas, balanças ou barras no mesmo campo. A transformação é conceitualmente pertinente porque modifica quantidades sem transformar a identidade molecular. Trocar o modo “Ver” produz outra espécie de dinâmica: muda a forma de apresentação, mas conserva a situação química. Reiniciar combina várias alterações — reação, coeficientes, visualização e estado dos painéis — e por isso foi codificado como evento composto.

A Figura 10 mostra uma atualização coordenada próxima de 00:06:48. Lowe (2003) adverte que movimento e mudança não são instrutivos por natureza; sua relevância depende do vínculo com a estrutura conceitual. Nesse caso, o movimento auxilia porque mantém adjacentes o estado anterior e o resultante. O som breve acompanha a ação e pode favorecer a segmentação temporal, porém não diferencia aumento, diminuição, balanceamento ou troca de modo. Sua função dominante é indexar a transformação, enquanto a direção e o conteúdo da mudança continuam visuais.

Figura 10 – Atualização coordenada de coeficiente e representações no SVQ-A



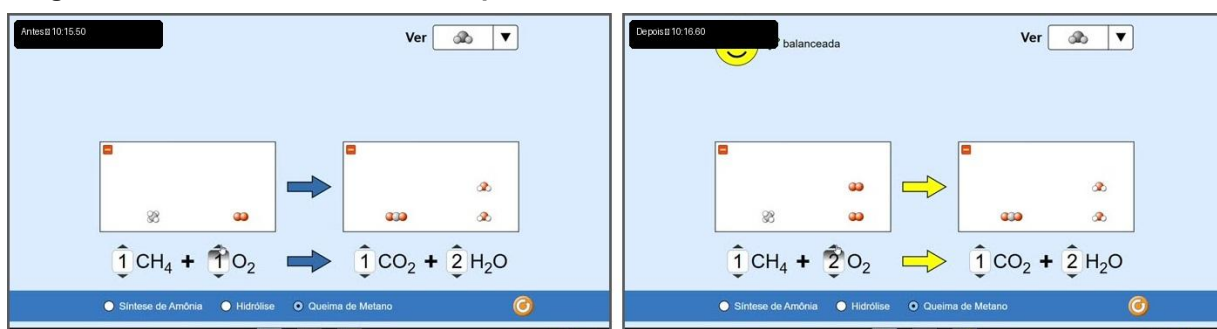
Fonte: elaboração própria a partir do corpus audiovisual do SVQ-A (00:06:47,80–00:06:49,00) (2026).

5.1.1.8 Relação Temporal (RT) do SVQ-A

Na RT, ação, som e resposta visual aparecem no mesmo episódio observável. Três convergências para o balanceamento, em torno de 00:03:49,190, 00:06:48,510 e 00:10:16,050, ocorreram junto a impulsos de aproximadamente 0,08–0,09 s. Entretanto, impulsos acústicos semelhantes também acompanham alterações não balanceadas e comandos de interface. A sincronia é, portanto, robusta como marca de atuação, mas fraca como código de acerto. Não foi detectado atraso funcional capaz de separar sistematicamente ação e resposta.

A Figura 11 exemplifica a proximidade temporal entre o último ajuste e a emergência do estado positivo. Kress (2010) e Jewitt, Bezemer e O'Halloran (2016) permitem tratar essa coordenação como configuração multimodal; Enge et al. (2024) lembram, contudo, que a integração de canais precisa ser examinada pelas relações e não pela mera simultaneidade. O áudio reduz a ambiguidade sobre quando a ação foi registrada, mas não sobre por que a equação se tornou balanceada. Essa explicação permanece nas correspondências visuais.

Figura 11 – Sincronia entre ação, impulso sonoro e feedback visual no SVQ-A



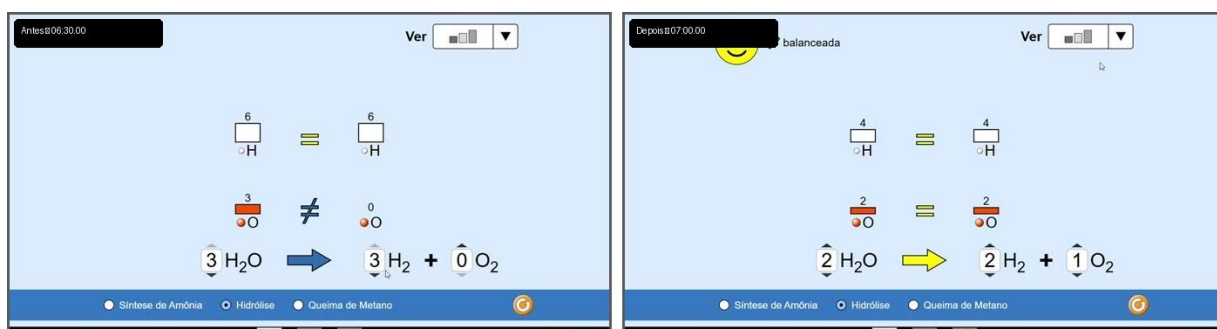
Fonte: elaboração própria a partir do corpus audiovisual do SVQ-A (00:10:15,50–00:10:16,60) (2026).

5.1.1.9 Modulação Representacional (MD) do SVQ-A

A modulação ocorre pela escolha de Partículas, Balanças, Gráficos de barras ou Nenhuma e pela ocultação/expansão dos painéis laterais. Essas operações alteram saliência, disponibilidade e modo de comparação, não a validade da equação. A passagem para barras realça magnitude numérica; balanças destacam equivalência; partículas preservam composição; Nenhuma exige leitura predominantemente simbólica. O feedback positivo adiciona cor amarela e sorriso, comprimindo em um sinal global relações elementares mostradas separadamente pelas formas quantitativas.

Na Figura 12, a alternância para barras torna visível a redistribuição modal. Ainsworth (2006) descreve a modulação como potencial de complementação e restrição entre representações; Schnotz e Bannert (2003) ressaltam que formatos selecionam informações. O som de seleção não amplia o conteúdo químico: ele torna a mudança perceptualmente saliente, mas é semanticamente inespecífico. Consequentemente, pode ser útil como confirmação de comando, embora deva ser mediado para que o estudante não confunda saliência sensorial com relevância conceitual, risco já assinalado por Lowe (2003).

Figura 12 – Modulação do SVQ-A pela alternância entre partículas e barras



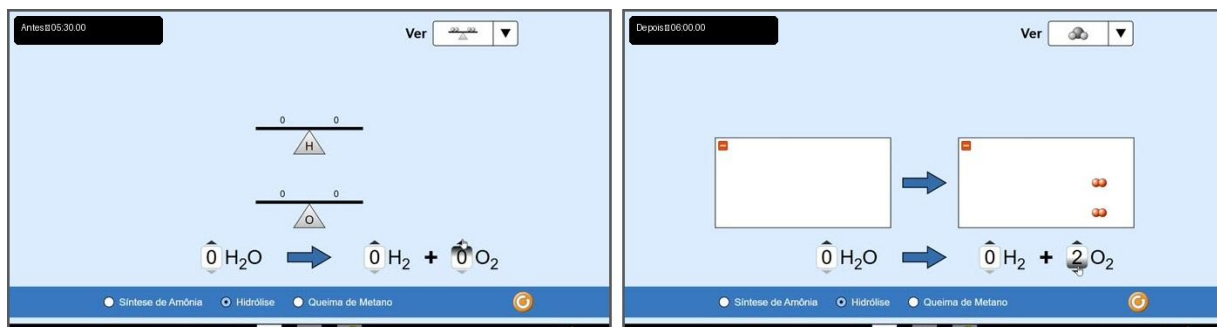
Fonte: elaboração própria a partir do corpus audiovisual do SVQ-A (00:06:30–00:07:00) (2026).

5.1.1.10 Potencial Interativo-Representacional (PIR) do SVQ-A

O PIR inclui selecionar três reações, alterar coeficientes de 0 a 3, alternar visualizações, ocultar painéis e reiniciar. A combinação permite comparar estados inválidos, desequilibrados e mínimos balanceados. O teto 3, porém, restringe a exploração: nas três reações registradas, os múltiplos inteiros dos vetores mínimos excedem o intervalo, de modo que a família de proporções equivalentes não pode ser construída. Essa ausência programada é parte do dado e delimita o que o ambiente permite investigar.

A Figura 13 registra a mudança entre reação e estado de coeficientes que concretiza esse espaço de ação. Ainsworth (2006) situa as possibilidades interativas no desenho do sistema; Carpenter, Moore e Perkins (2016) mostram a pertinência do próprio simulador para práticas de balanceamento, mas a presente análise não converte possibilidade em resultado de aprendizagem. O áudio acrescenta confirmação imediata a muitas ações, sem ampliar os valores acessíveis nem revelar uma relação química indisponível visualmente.

Figura 13 – Mudança de reação e construção de estado no espaço interativo do SVQ-A



Fonte: elaboração própria a partir do corpus audiovisual do SVQ-A (00:05:30–00:06:00) (2026).

5.1.1.11 Recorrência transversal nas reações do SVQ-A

Nas três reações, repete-se a gramática: controles discretos de coeficientes, atualização da forma selecionada, seta central e feedback global ao atingir a razão mínima. Variam o número de espécies, os elementos envolvidos e a proporção requerida. A recorrência sustenta a estabilidade do modelo de interação, mas não elimina a diferença entre uma reação com três coeficientes e outra com quatro. Também se repetem impulsos sonoros durante ajustes e trocas, reforçando a recorrência operacional.

A Figura 14 contrapõe estados de reações diferentes e evidencia o que permanece. Miles, Huberman e Saldaña (2014) apoiam o uso de matrizes para separar padrão e variação; na perspectiva química, Johnstone (1991) impede tratar a recorrência visual como compreensão automática. A regularidade sonora oferece previsibilidade de interface, mas sua inespecificidade impede associá-la a um elemento, a uma reação ou à conservação. Ela funciona como coesão do percurso, não como tradução audível da estequiometria.

Figura 14 – Recorrência da gramática de interação em reações distintas do SVQ-A



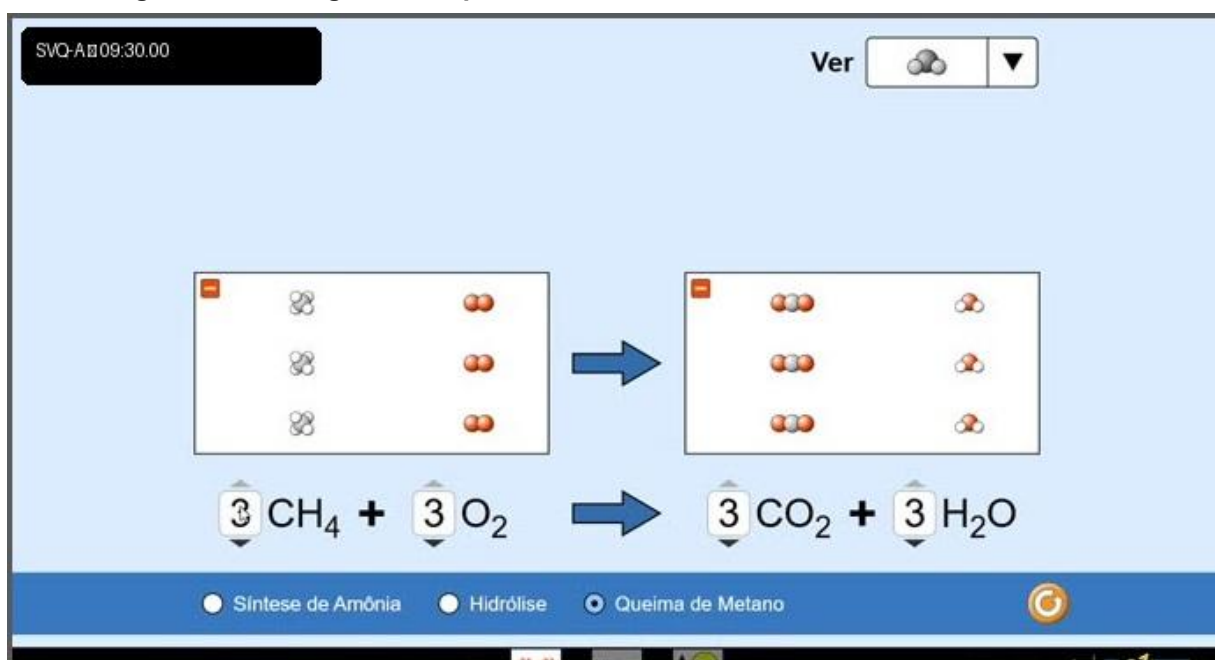
Fonte: elaboração própria a partir do corpus audiovisual do SVQ-A (00:02:00 e 00:05:00) (2026).

5.1.1.12 Configuração Representacional Dominante (CRD) do SVQ-A

A CRD do SVQ-A é uma exploração contínua, centrada na equação, em que partículas, balanças e barras operam como lentes intercambiáveis sobre a conservação. A estabilidade espacial permite modificar coeficientes sem perder o objeto de comparação; as formas auxiliares tornam visíveis diferentes propriedades; o feedback global encerra provisoriamente a busca. O canal sonoro ocupa posição periférica: acompanha a atuação e segmenta a sequência, mas não organiza a estrutura química dominante.

A configuração reunida na Figura 15 sustenta essa síntese. Ela converge com Ainsworth (1999, 2006) quanto à especialização das representações e com Kress (2010) quanto à distribuição desigual de funções entre modos. A ausência de um código auditivo para quantidade, elemento ou igualdade distingue o som de uma sonificação propriamente dita, nos termos discutidos por Enge et al. (2024) e Guiotto Nai Fovino et al. (2024). O áudio integra a experiência, mas a CRD continua simbólico-diagramática.

Figura 15 – Configuração representacional dominante do SVQ-A



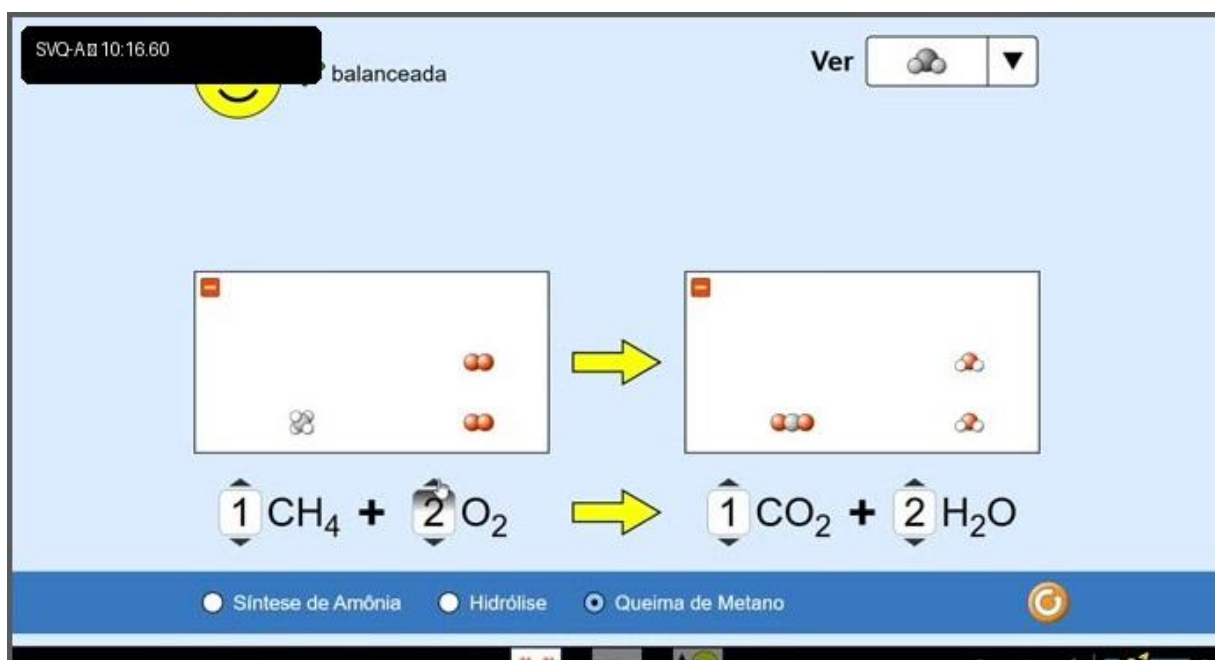
Fonte: elaboração própria a partir do corpus audiovisual do SVQ-A (00:09:30) (2026).

5.1.1.13 Potencial Didático-Representacional (PDR) do SVQ-A

O PDR do Intro reside em possibilitar a comparação, no mesmo campo, entre coeficientes, entidades e totais elementares, com liberdade para trocar a lente de análise. O som breve pode apoiar orientação e fechamento temporal de ações, sobretudo quando a atenção visual está distribuída, mas não carrega a explicação. O sorriso, a seta amarela e o texto “balanceada” são os elementos que classificam o estado; partículas, balanças e barras permitem reconstruir as razões desse feedback.

A Figura 16 documenta o feedback positivo que exemplifica esse potencial. Guiotto Nai Fovino et al. (2024) mostram que o som pode comunicar propriedades quando existe mapeamento explícito e treinável; no SVQ-A, esse requisito não se verifica. Por isso, o áudio é melhor descrito como complemento perceptivo do que como representação científica. Palacios, Pascual e Moreno-Mediavilla (2024) reforçam que o potencial de uma simulação depende do desenho metodológico e da mediação. Não se conclui que o som aumente motivação, compreensão ou desempenho.

Figura 16 – Feedback global positivo e potencial didático-representacional do SVQ-A



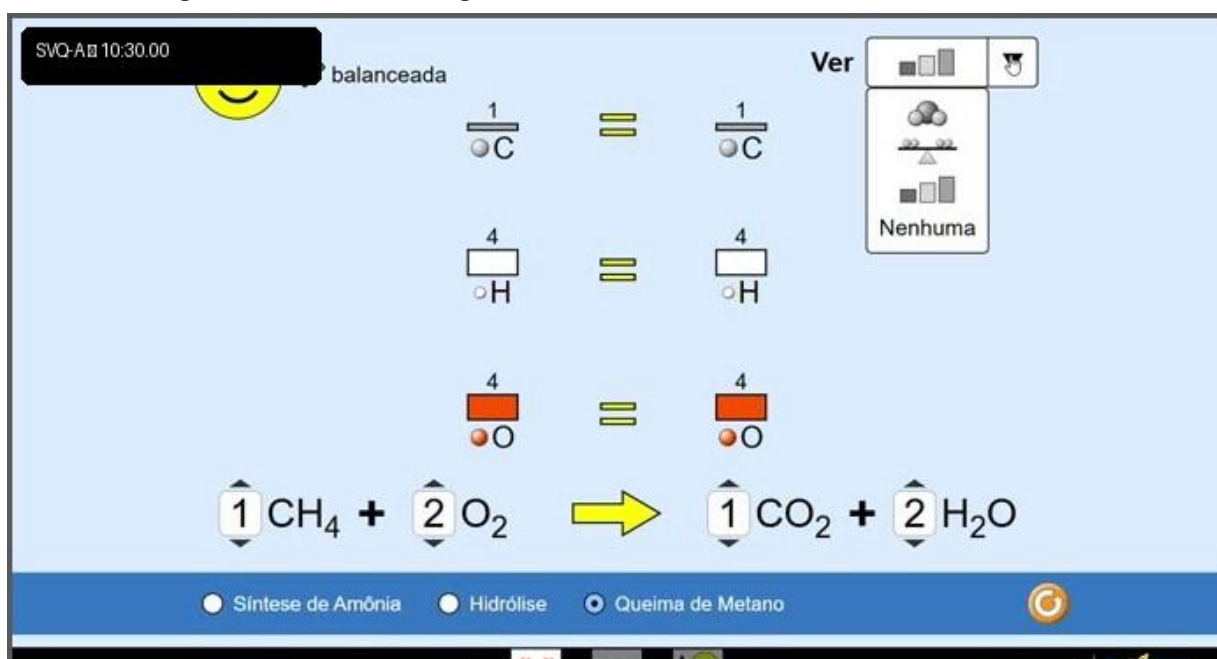
Fonte: elaboração própria a partir do corpus audiovisual do SVQ-A (00:10:16,60) (2026).

5.1.1.14 Síntese conclusiva da análise individual do SVQ-A

O SVQ-A oferece a porta de entrada exploratória do conjunto. Sua contribuição específica é tornar ajustáveis e comparáveis as relações entre equação, entidades diagramáticas e contagens sem transformar a atividade em avaliação por pontos. A análise audiovisual acrescenta que o som está presente e fortemente sincronizado às ações, mas usa classes semelhantes em eventos funcionalmente distintos. Assim, ele confirma que o sistema respondeu, sem fornecer um vocabulário auditivo para o balanceamento.

A Figura 17 sintetiza as categorias do caso, reunindo momentos não necessariamente consecutivos. À luz de Johnstone (2000), Ainsworth (2006), Lowe (2003) e Jewitt, Bezemer e O'Halloran (2016), o resultado combina uma articulação visual conceitualmente produtiva com duas limitações: múltiplos proporcionais não são acessíveis e o som não explica as relações que assinala. O PDR é, portanto, condicional: exige uma atividade que compare formas, explicita a conservação e trate o áudio como pista temporal interna ao evento, não como prova autônoma de correção química.

Figura 17 – Síntese categorial audiovisual do SVQ-A/Intro



Fonte: elaboração própria a partir do corpus audiovisual do SVQ-A (00:10:30) (2026).

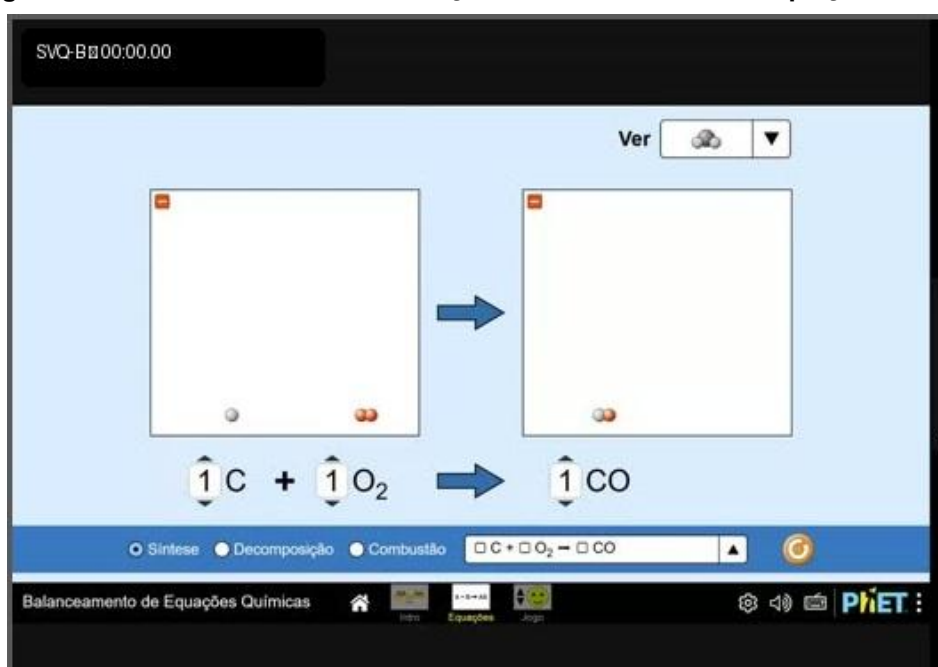
5.1.2 Análise individual da Simulação B — Equações

5.1.2.1 Identificação e delimitação do SVQ-B

O vídeo SVQ-B corresponde ao módulo Equações e tem duração de 00:25:26,125. O caso amplia o repertório para doze equações distribuídas pelo próprio ambiente em Síntese, Decomposição e Combustão, acrescentando dois níveis de seleção: classe e equação. Os coeficientes variam de 0 a 6, enquanto partículas, balanças, barras e a opção Nenhuma permanecem disponíveis. Essa arquitetura o diferencia do Intro e do Jogo, ainda que compartilhe a mesma identidade gráfica.

A Figura 18 mostra o estado inicial do caso e sua faixa de seleção. A classificação da reação orienta a navegação, mas não equivale a explicação de mecanismo. Gilbert e Treagust (2009) e Talanquer (2011) permitem separar o rótulo taxonômico das representações do processo químico. Como no SVQ-A, o áudio é interno ao simulador segundo a informação do pesquisador; sua análise é feita pela relação com cada ação, sem atribuir-lhe função química apenas por acompanhar o módulo.

Figura 18 – Interface inicial e delimitação funcional do SVQ-B/Equações



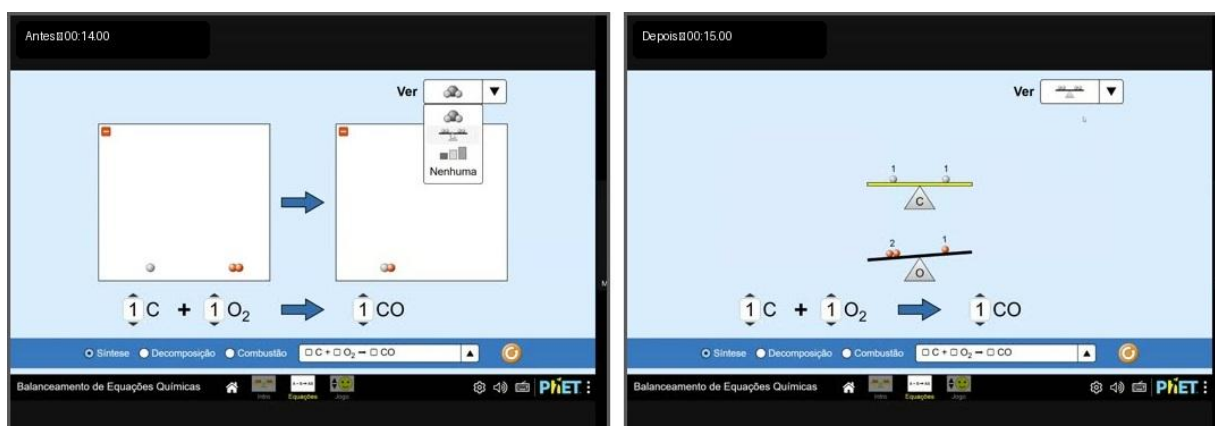
Fonte: elaboração própria a partir do corpus audiovisual do SVQ-B (00:00:00) (2026).

5.1.2.2 Inventário documental e controle do corpus do SVQ-B

No SVQ-B, o inventário consolidado contém sete categorias funcionalmente distintas: cinco ações — ajuste de coeficiente, seleção de classe, seleção de equação, mudança em “Ver” e reinicialização — e dois estados resultantes, balanceamento e simplificação. Os muitos cliques repetidos no registro serviram para demonstrar a estabilidade da resposta e foram colapsados; por isso, sete designa diversidade funcional, não frequência de sons. O inventário mantém separados dados observados, cálculos do espaço de coeficientes e interpretações funcionais. A matriz completa encontra-se nos Apêndices B e E.

A Figura 19 documenta a seleção do modo “Ver” por quadros imediatamente adjacentes. Bardin (2016) e Krippendorff (2018) sustentam a explicitação das regras de segmentação; Yin (2018) sustenta a cadeia de evidências. O limiar acústico localiza episódios, mas somente a inspeção do antes/depois permite classificar o evento como mudança de modo, ajuste ou feedback. A mesma cautela vale para sequências longas, que podem resultar de vários cliques próximos e não de um único som contínuo.

Figura 19 – Controle audiovisual de uma seleção no SVQ-B



Fonte: elaboração própria a partir do corpus audiovisual do SVQ-B (00:00:14–00:00:15) (2026).

5.1.2.3 Arquitetura Imagético-Contextual (AIC) do SVQ-B

A AIC preserva equação, painéis laterais, seta e seletor “Ver”, mas adiciona a faixa inferior de classes e a lista de equações. O campo torna simultaneamente acessíveis a tarefa estequiométrica e sua localização taxonômica. Essa ampliação aumenta o número de rotas possíveis sem alterar a gramática central dos coeficientes. A barra de captura externa presente à direita do arquivo foi excluída das figuras por não integrar o simulador nem o objeto de análise.

A arquitetura exibida na Figura 20 evidencia uma hierarquia de navegação. Kress (2010) e Jewitt, Bezemer e O'Halloran (2016) permitem analisar como espacialidade e saliência distribuem papéis: o centro sustenta a comparação química; a base controla o repertório; o topo muda a forma de evidência. Impulsos acústicos acompanham escolhas em todos esses setores. Como a forma sonora se repete em zonas com funções diferentes, ela unifica a resposta da interface, mas não distingue a semântica de cada controle.

Figura 20 – Arquitetura ampliada do módulo Equações no SVQ-B



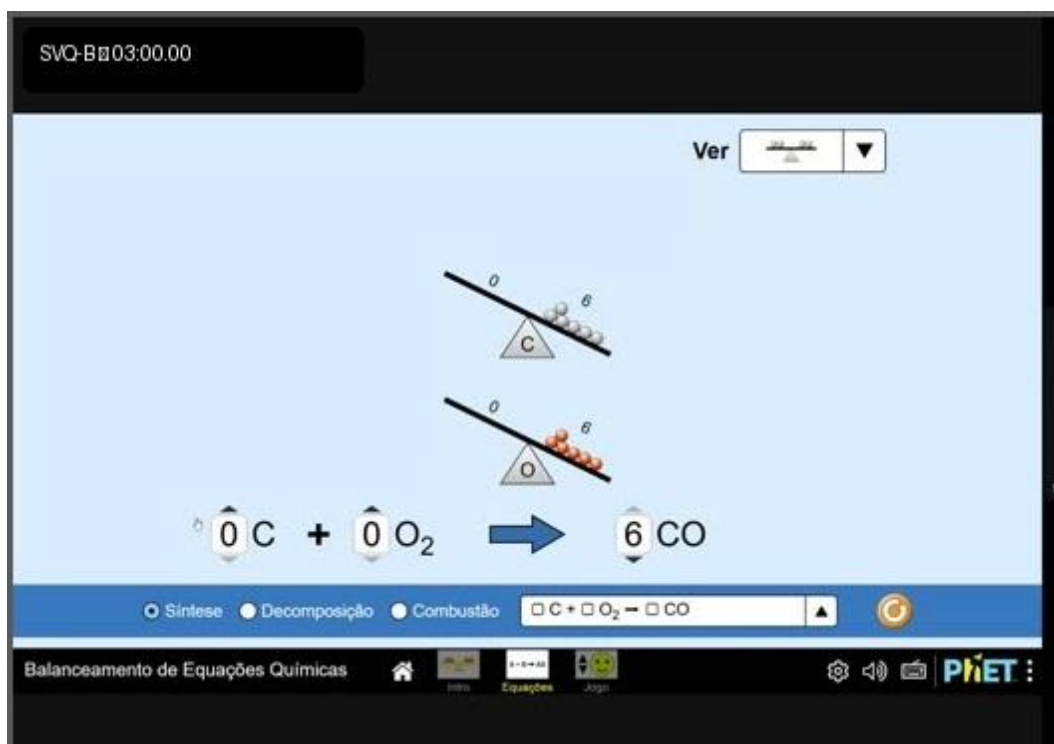
Fonte: elaboração própria a partir do corpus audiovisual do SVQ-B (00:02:00) (2026).

5.1.2.4 Multiplicidade Representacional (MR) do SVQ-B

O SVQ-B mobiliza equações simbólicas, partículas, balanças e barras ao longo de um repertório maior. A visualização pode ser trocada mantendo-se o mesmo vetor de coeficientes, o que permite examinar um estado por formatos alternativos. A representação macroscópica continua ausente. A faixa de classes acrescenta texto organizacional, mas não constitui novo nível químico. Também não foi encontrada codificação sonora de quantidade ou espécie.

Na Figura 21, a equação coocorre com balanças por elemento. Ainsworth (1999, 2006) e Schnotz e Bannert (2003) ajudam a distinguir multiplicidade de mero acúmulo: a balança destaca equivalência, enquanto a equação explicita a razão. O som que acompanha a transição ou o clique confirma a atividade do sistema, mas não substitui nenhuma dessas funções. Nos termos de Enge et al. (2024), há composição audiovisual, não uma sonificação das variáveis estequiométricas.

Figura 21 – Equação e balanças como representações coordenadas no SVQ-B



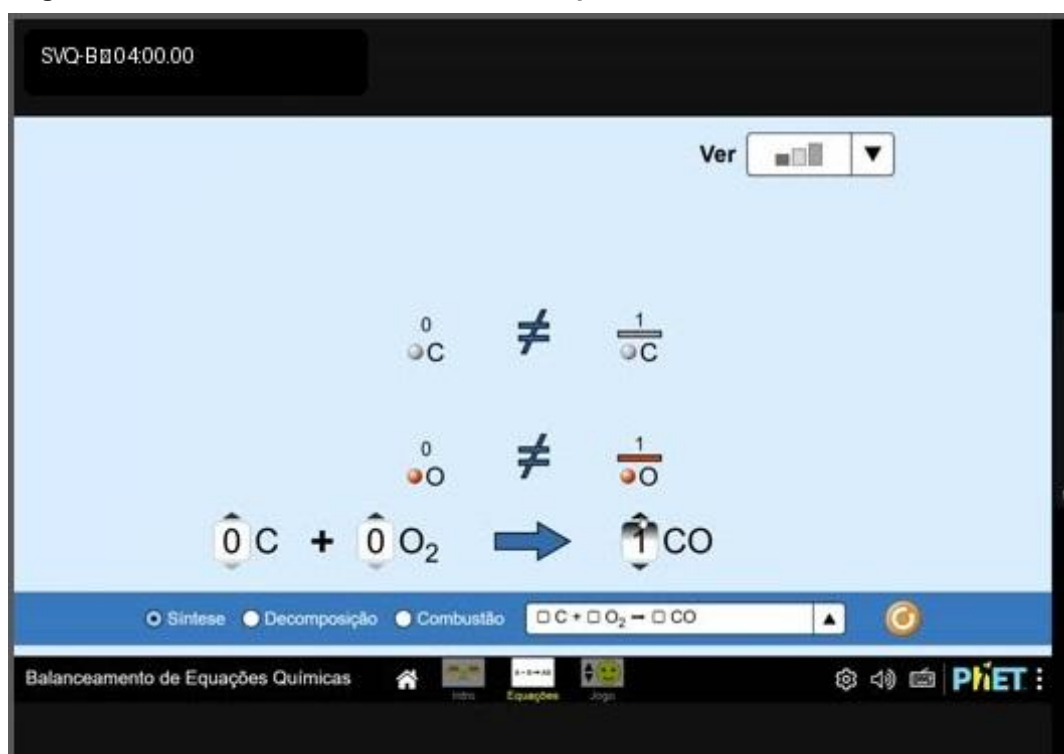
Fonte: elaboração própria a partir do corpus audiovisual do SVQ-B (00:03:00) (2026).

5.1.2.5 Variedade de Formas Representacionais Intranível (VFRI) do SVQ-B

A VFRI repete as formas quantitativas do Intro e as aplica a equações com diferentes números de espécies e razões. Barras, números e sinais de igualdade/desigualdade expõem a magnitude por elemento; balanças convertem a mesma relação em equilíbrio espacial; partículas preservam composição. O módulo também distingue visualmente “balanceada” de “simplificada”, acrescentando ao domínio simbólico-avaliativo duas propriedades que podem coexistir ou divergir.

A Figura 22 evidencia as barras e sua leitura por elemento. Hamerská et al. (2024) mostram que proficiência procedimental no balanceamento não garante compreensão da relação entre símbolos e partículas. A variedade do SVQ-B pode apoiar essa articulação, mas somente se a atividade solicitar comparação e explicação. O som de comando não varia com a forma escolhida; logo, sua contribuição é marcar a mudança de lente, não comunicar a estrutura de barras ou balanças.

Figura 22 – Gráficos de barras como forma quantitativa intranível no SVQ-B



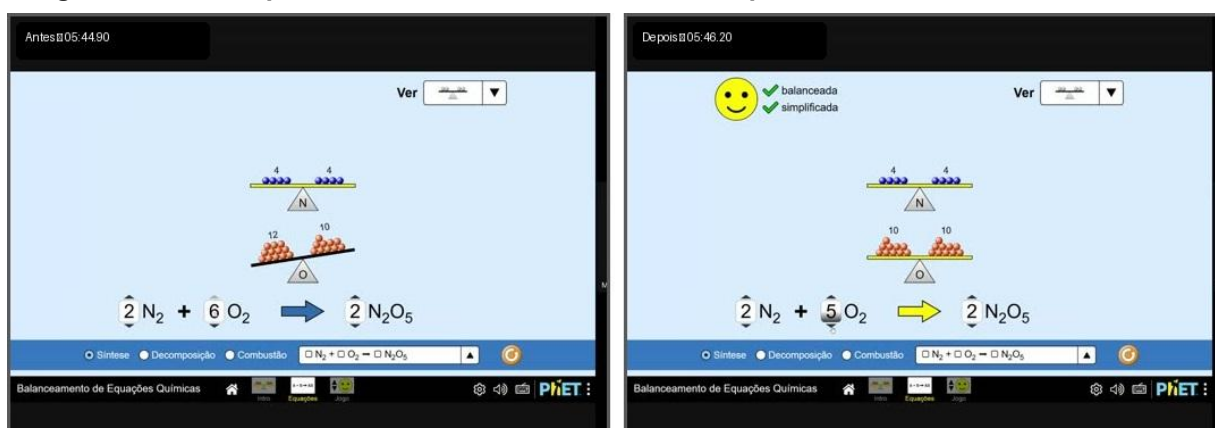
Fonte: elaboração própria a partir do corpus audiovisual do SVQ-B (00:04:00) (2026).

5.1.2.6 Correspondência Conceitual (CC) do SVQ-B

A CC articula cinco componentes: coeficientes, número de entidades, total por elemento, estado de balanceamento e estado de simplificação. O intervalo 0–6 torna acessíveis vetores mínimos e alguns múltiplos inteiros. Assim, o simulador permite observar que uma equação pode conservar átomos e, ainda assim, não estar na menor razão. Essa distinção impede equiparar “balanceada” e “simplificada” e é o principal ganho conceitual do caso em relação ao Intro.

A Figura 23 registra a convergência para um estado acompanhado da dupla classificação visual. Johnstone (2000), Talanquer (2011) e Hamerská et al. (2024) sustentam a necessidade de ligar o procedimento aos significados de conservação e proporção. O impulso sonoro associado ao último ajuste pertence à mesma família acústica de ajustes ordinários; por isso, a correspondência conceitual é demonstrada pela imagem, não pelo áudio isolado. A faixa sonora marca o momento da atualização, mas não diferencia conservação de redução à razão mínima.

Figura 23 – Correspondência entre balanceamento e simplificação no SVQ-B



Fonte: elaboração própria a partir do corpus audiovisual do SVQ-B (00:05:44,90–00:05:46,20) (2026).

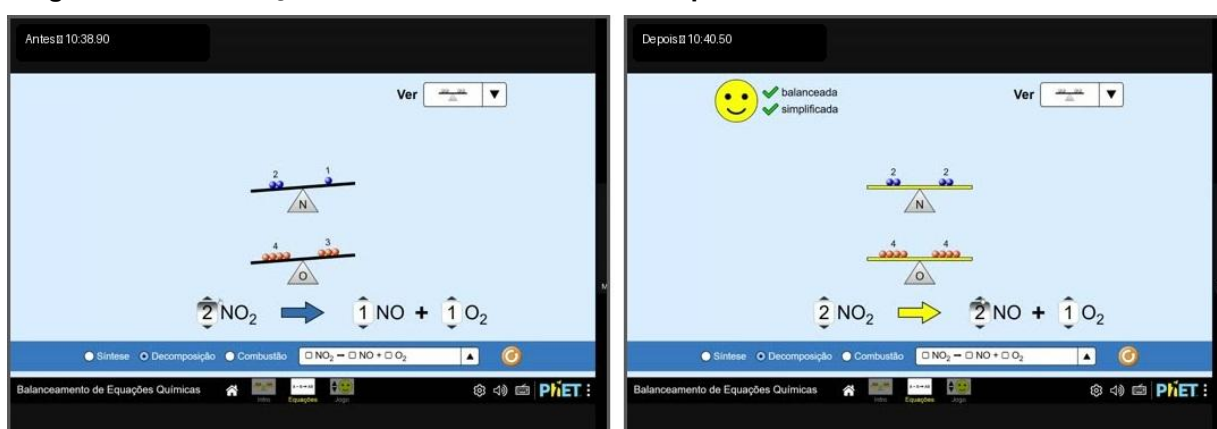
5.1.2.7 Dinâmica Representacional (DR) do SVQ-B

A dinâmica do SVQ-B combina atualização contínua dos coeficientes com mudanças discretas de classe, equação e forma. Um ajuste modifica simultaneamente

entidades e totais; uma troca em “Ver” conserva o vetor; uma troca de equação substitui o objeto químico; reiniciar restaura o estado inicial. Essa decomposição evita tratar toda mudança de tela como transformação química. Os episódios sonoros acompanham os quatro tipos e, portanto, precisam ser interpretados por seu contexto.

A Figura 24 mostra a atualização de uma representação próxima de 00:10:40. Lowe (2003) explica por que o dinamismo só é didaticamente relevante quando torna uma relação pertinente mais acessível. A proximidade visual entre estado anterior e posterior favorece a comparação; o som breve segmenta o episódio. Entretanto, por ocorrer também em mudanças de menu, ele não indica a direção nem a natureza da transformação. Sua função é operacional e temporal, não explicativa.

Figura 24 – Atualização coordenada de um estado representacional no SVQ-B



Fonte: elaboração própria a partir do corpus audiovisual do SVQ-B (00:10:38,90–00:10:40,50) (2026).

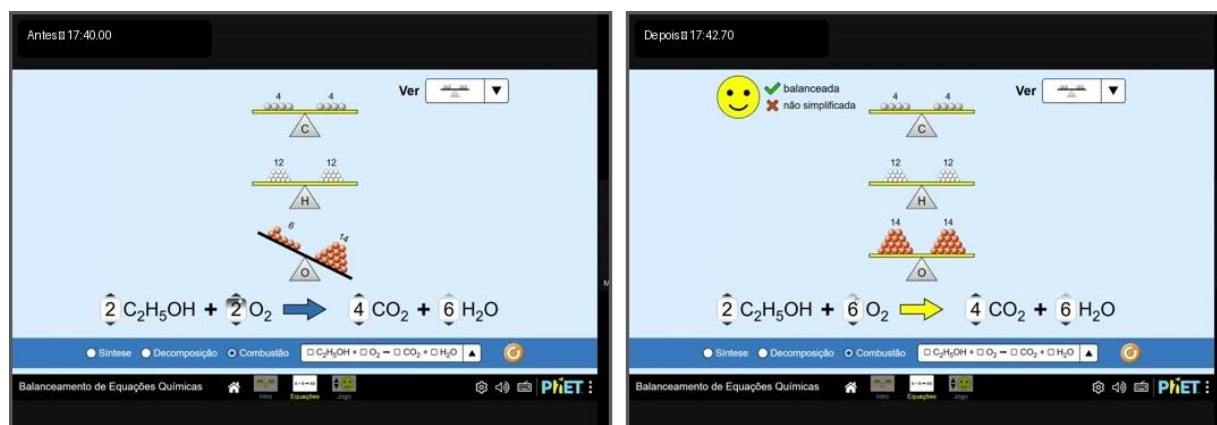
5.1.2.8 Relação Temporal (RT) do SVQ-B

A RT permanece majoritariamente imediata. Estados balanceados tornam-se visíveis após ajustes em torno de 00:03:17,960–00:03:19,610, 00:05:45,590–00:05:45,640, 00:10:39,940–00:10:39,990, 00:17:40,120–00:17:42,320 e 00:23:58,800–00:23:58,850. Os sons podem ser impulsos isolados ou sequências resultantes de cliques sucessivos. Não se observou um som exclusivo para o instante em que a igualdade foi atingida.

A sequência da Figura 25 exemplifica ação, som e resposta no mesmo episódio. Enge et al. (2024) destacam que a integração audiovisual pode distribuir informação ou criar redundância. No SVQ-B, a redundância temporal é clara, mas a

redundância semântica é incompleta: o áudio confirma ocorrência, enquanto o estado químico é codificado por rótulo, sorriso, seta e representações quantitativas. Isso reduz o risco de superestimar o canal sonoro com base apenas na sincronia.

Figura 25 – Relação temporal entre ajustes sucessivos e resposta visual no SVQ-B



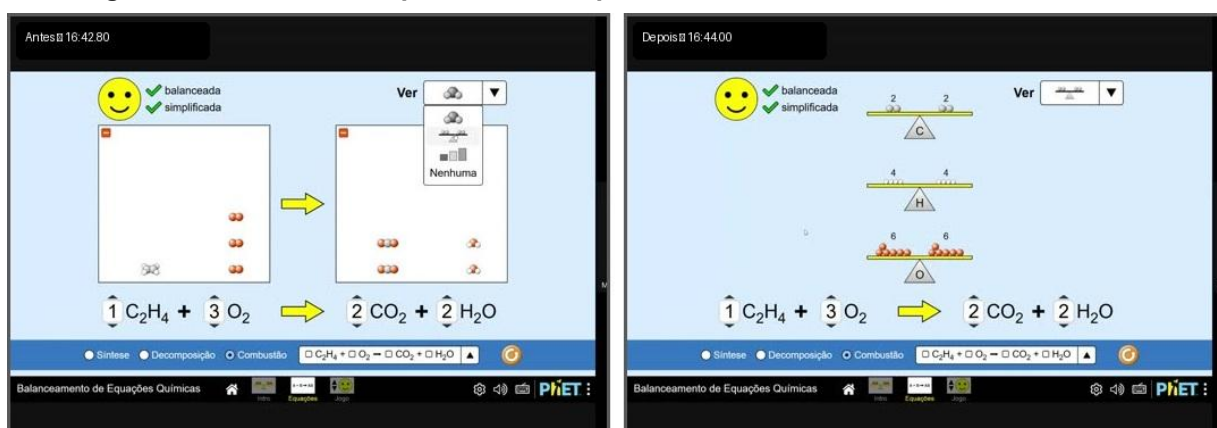
Fonte: elaboração própria a partir do corpus audiovisual do SVQ-B (00:17:40–00:17:42,70) (2026).

5.1.2.9 Modulação Representacional (MD) do SVQ-B

O seletor “Ver” modula o acesso às formas, e a escolha de classe/equação modula o repertório. Foram alinhados a impulsos breves vários eventos de menu, por exemplo 00:00:14,570, 00:02:16,740, 00:07:13,510, 00:10:23,850 e 00:16:43,340. A mudança visual é ampla, mas o som permanece curto. Essa dissociação mostra que duração acústica e extensão visual não são proporcionais.

A Figura 26 registra uma dessas modulações. Ainsworth (2006) e Schnotz e Bannert (2003) orientam a leitura das formas como escolhas que focalizam aspectos diferentes. O som serve como confirmação da escolha, mas não revela qual forma foi ativada. Em termos de acessibilidade, isso significa que o canal auditivo não oferece alternativa autônoma ao conteúdo visual. Guiotto Nai Fovino et al. (2024) mostram que uma sonificação informacional requer mapeamento aprendível; tal mapeamento não foi constatado aqui.

Figura 26 – Modulação representacional pelo seletor “Ver” no SVQ-B



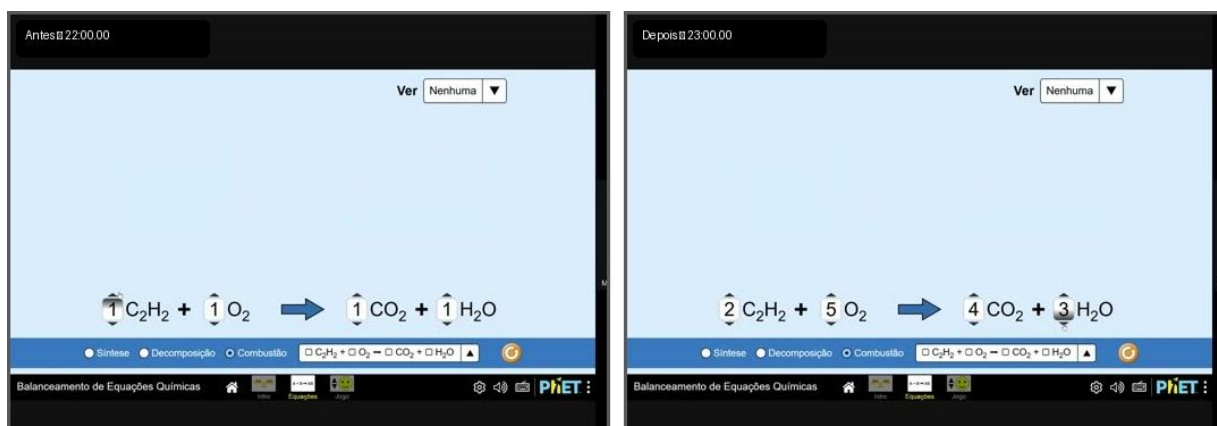
Fonte: elaboração própria a partir do corpus audiovisual do SVQ-B (00:16:42,80–00:16:44) (2026).

5.1.2.10 Potencial Interativo-Representacional (PIR) do SVQ-B

O PIR expande-se para doze equações, três classes e coeficientes de 0 a 6. O espaço teórico calculado contém 12.348 vetores; 25 são balanceados no intervalo, dos quais doze mínimos e treze múltiplos não mínimos. Esses totais são resultados combinatórios, não contagem de estados executados no vídeo. A interação observada amostra classes e formas críticas, especialmente a diferença entre balanceamento e simplificação.

A Figura 27 mostra a passagem entre escolhas e estados que materializa esse potencial. Carpenter, Moore e Perkins (2016) discutem o desenvolvimento de práticas de balanceamento com esta simulação; Chan et al. (2021) e Palacios, Pascual e Moreno-Mediavilla (2024) salientam que desenho e orientação importam. O som confirma comandos, mas não amplia o espaço combinatório nem torna os múltiplos conceitualmente transparentes. Uma tarefa precisa comparar explicitamente vetor mínimo e múltiplo.

Figura 27 – Seleção de equação e construção de estados no SVQ-B

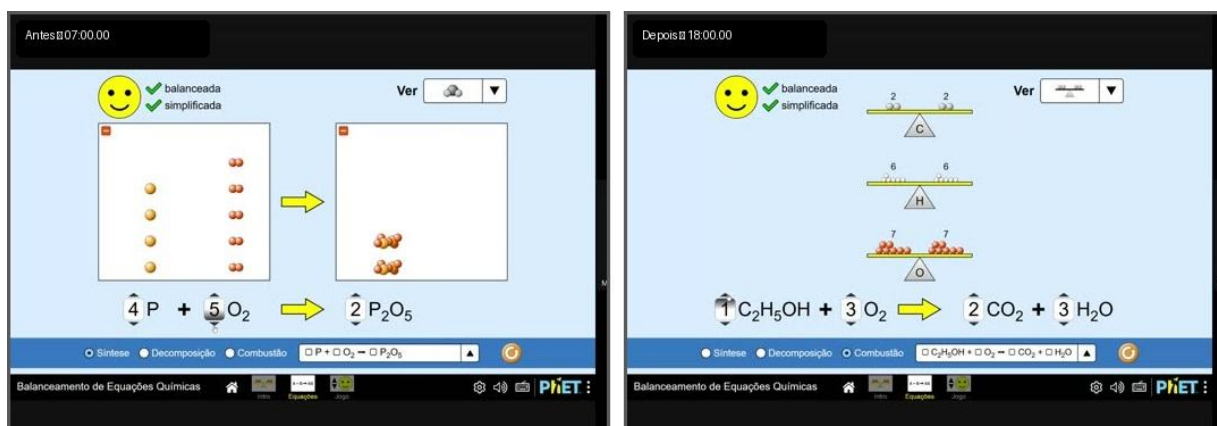


Fonte: elaboração própria a partir do corpus audiovisual do SVQ-B (00:22:00–00:23:00) (2026).

5.1.2.11 Recorrência transversal nas equações do SVQ-B

A recorrência abrange as três classes: equação na base, coeficientes discretos, atualização da forma e feedback global. Variam as razões, o número de coeficientes e a possibilidade de múltiplos dentro do teto 6. O mesmo vocabulário sonoro acompanha classes distintas, inclusive mudança de equação, seleção de forma e ajuste. Esse padrão favorece previsibilidade operacional, mas impede usar a identidade acústica como marcador da classe química.

A Figura 28 compara estados afastados do registro e torna visível a recorrência entre classes. Miles, Huberman e Saldaña (2014) justificam essa matriz de semelhanças e contrastes; Gilbert e Treagust (2009) sustentam a necessidade de examinar a função de cada forma. O áudio contribui para a coesão da interface, porém não classifica Síntese, Decomposição ou Combustão. Seu valor analítico está no ritmo das ações, não na taxonomia química.

Figura 28 – Recorrência da gramática representacional em classes do SVQ-B

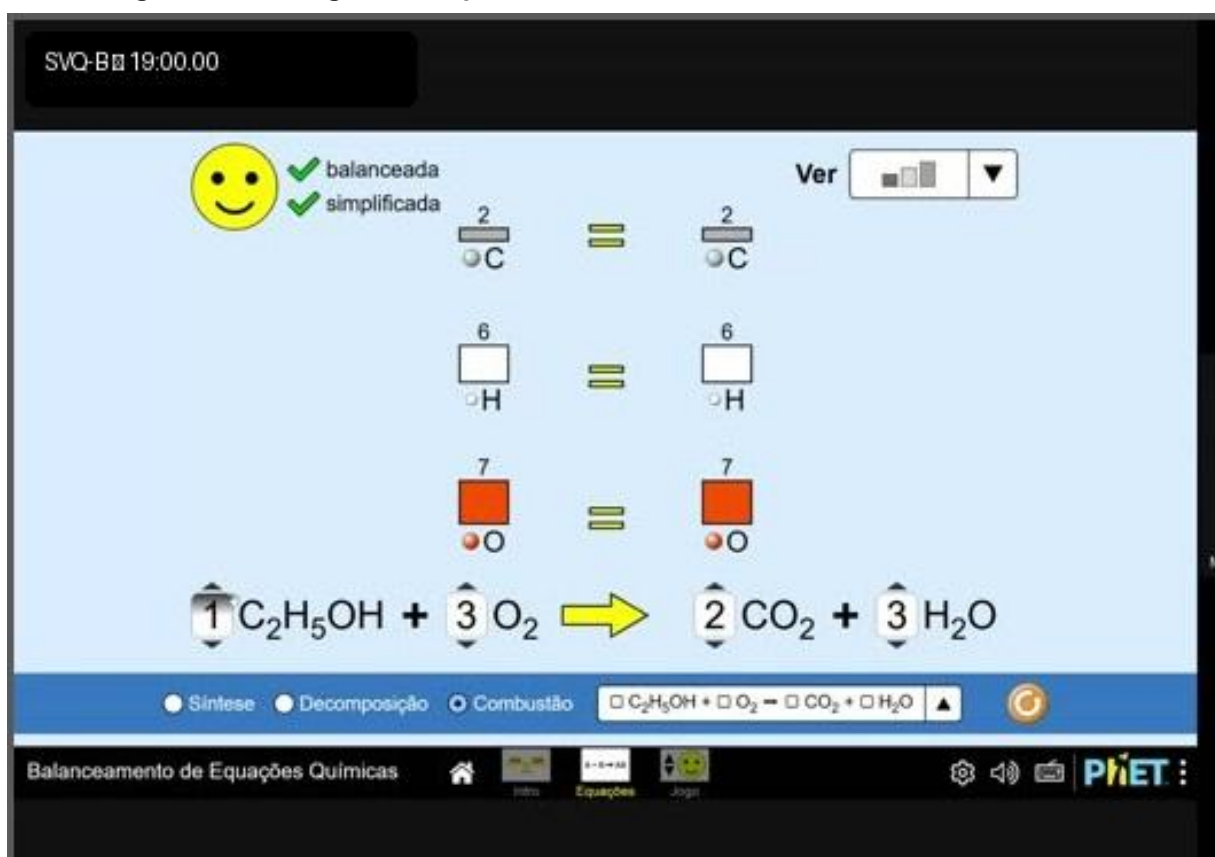
Fonte: elaboração própria a partir do corpus audiovisual do SVQ-B (00:07:00 e 00:18:00) (2026).

5.1.2.12 Configuração Representacional Dominante (CRD) do SVQ-B

A CRD do SVQ-B é a exploração classificada de uma biblioteca de equações, centrada na relação entre coeficientes, contagens e duas propriedades globais: balanceamento e simplificação. As formas auxiliares são alternáveis e o repertório taxonômico permanece disponível. O canal auditivo acompanha densamente a navegação e a manipulação, mas não se diferencia em função da classe ou do estado químico.

A Figura 29 reúne equação, barras e dupla classificação. Ainsworth (2006) permite compreender a especialização das formas; Hamerská et al. (2024) sustenta o foco na articulação entre símbolos e partículas; Enge et al. (2024) delimita a contribuição audiovisual. O resultado é uma CRD visualmente rica e auditivamente confirmatória: o som marca que algo foi acionado, enquanto a química é organizada por estrutura simbólico-diagramática.

Figura 29 – Configuração representacional dominante do SVQ-B



Fonte: elaboração própria a partir do corpus audiovisual do SVQ-B (00:19:00) (2026).

5.1.2.13 Potencial Didático-Representacional (PDR) do SVQ-B

O principal PDR do SVQ-B é tornar contrastáveis a conservação e a razão mínima. A coexistência de “balanceada” e “simplificada” permite tratar múltiplos como quimicamente equivalentes quanto à conservação, embora diferentes quanto à convenção canônica. O repertório por classes também possibilita examinar a recorrência da operação em contextos diversos. O áudio pode sustentar continuidade de uso, mas não informa qual critério foi satisfeito.

A Figura 30 mostra o feedback balanceada/simplificada. Palacios, Pascual e Moreno-Mediavilla (2024) indicam que a simulação precisa compor uma sequência orientada; Hamerská et al. (2024) alerta para a separação entre habilidade procedimental e entendimento. Assim, o som não deve ser tomado como selo de compreensão. Seu uso didático mais defensável é o de pista de resposta, subordinada

à explicação visual e à solicitação de justificativas sobre conservação e proporcionalidade.

Figura 30 – Feedback de balanceamento e simplificação no SVQ-B

The screenshot displays the SVQ-B interface. At the top left, a timer shows 'SVQ-B 23:58.90'. A yellow smiley face icon is next to two green checkmarks, with the text 'balanceada' and 'simplificada' next to them. To the right, a 'Ver' button with a balance scale icon and a dropdown arrow is visible. Below these, three balance scales are shown, each representing an element: Carbon (C) with 4 atoms on each side, Hydrogen (H) with 4 atoms on each side, and Oxygen (O) with 10 atoms on each side. At the bottom, the balanced chemical equation is displayed: $2\text{C}_2\text{H}_2 + 5\text{O}_2 \rightarrow 4\text{CO}_2 + 2\text{H}_2\text{O}$. Below the equation, there are radio buttons for 'Síntese', 'Decomposição', and 'Combustão', with 'Combustão' selected. To the right of these buttons is a text input field containing the unbalanced equation: $\square\text{C}_2\text{H}_2 + \square\text{O}_2 \rightarrow \square\text{CO}_2 + \square\text{H}_2\text{O}$. At the bottom of the interface, there is a navigation bar with icons for 'Balanceamento de Equações Químicas', 'Intro', 'Equações', and 'Jogo', along with a 'PHET' logo.

Fonte: elaboração própria a partir do corpus audiovisual do SVQ-B (00:23:58,90) (2026).

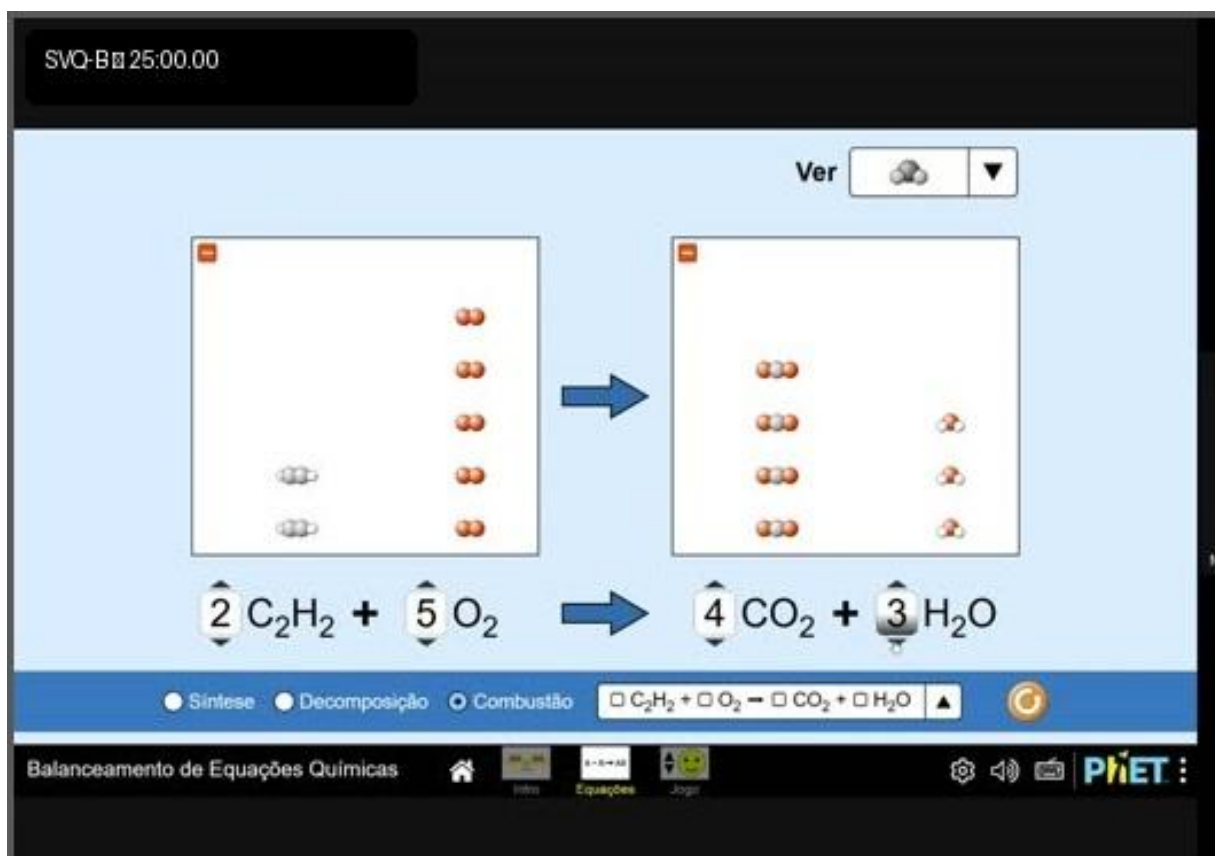
5.1.2.14 Síntese conclusiva da análise individual do SVQ-B

O SVQ-B amplia o conjunto em duas direções: repertório e proporcionalidade. A classificação em três famílias organiza a navegação, enquanto o intervalo 0–6 torna visíveis mínimos e múltiplos. A análise sonora mostra elevada sobreposição funcional: o mesmo padrão operacional acompanha ajustes, menus, mudanças de forma e estados positivos. As repetições confirmam essa estabilidade, sem serem tomadas como medida de riqueza sonora.

A Figura 31 sintetiza as categorias do caso com base em momentos localizados do registro, sem conferir significado à ordem entre eles. À luz de Ainsworth (2006), Johnstone (2000), Lowe (2003) e Enge et al. (2024), o módulo combina potência

comparativa com dependência da leitura visual. O áudio confirma comandos, mas não comunica as razões químicas nem distingue balanceamento de simplificação. O PDR depende de uma atividade que confronte explicitamente vetores equivalentes e peça a explicação do que permanece constante.

Figura 31 – Síntese categorial audiovisual do SVQ-B/Equações



Fonte: elaboração própria a partir do corpus audiovisual do SVQ-B (00:25:00) (2026).

5.1.3 Análise individual da Simulação C — Jogo

5.1.3.1 Identificação e delimitação do SVQ-C

O vídeo SVQ-C corresponde ao módulo Jogo e tem duração de 00:16:53,360. Ele organiza três níveis, rodadas, pontuação, estrelas, comandos “Conferir”, “Tentar de novo”, “Explique-me”, “Avançar” e telas de resultado. Diferentemente de A e B, os

coeficientes são construídos antes da submissão e o feedback avaliativo aparece após uma ação explícita de conferência.

A Figura 32 registra a escolha inicial de nível. A arquitetura de jogo é parte da representação porque condiciona sequência, disponibilidade de ações e saliência do feedback. Kress (2010) e Jewitt, Bezemer e O'Halloran (2016) permitem compreender estrelas, rostos, cores, som e texto como modos articulados. Essa articulação não autoriza inferir motivação real do usuário; ela permite apenas descrever uma convocação motivacional programada no objeto.

Figura 32 – Tela de escolha de nível e delimitação funcional do SVQ-C/Jogo



Fonte: elaboração própria a partir do corpus audiovisual do SVQ-C (relativo 00:00:00) (2026).

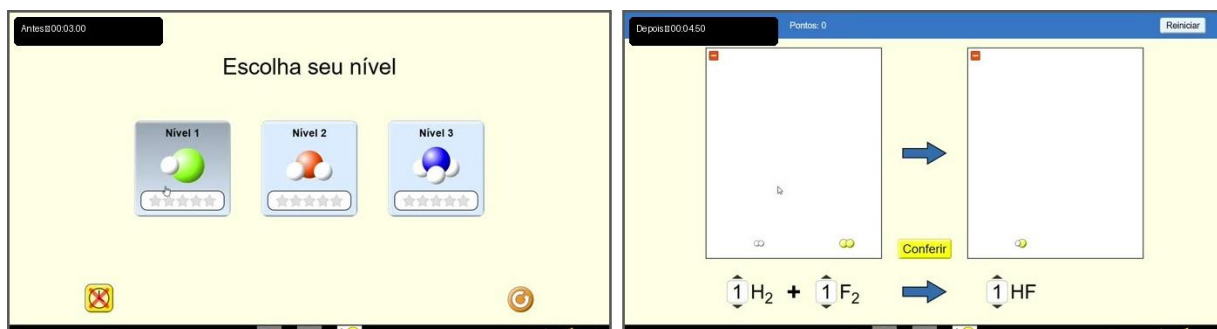
5.1.3.2 Inventário documental e controle do corpus do SVQ-C

No SVQ-C, a inspeção consolidou dez categorias funcionalmente distintas. Seis correspondem a ações — selecionar nível, ajustar coeficiente, conferir/submeter, tentar novamente ou solicitar explicação, avançar e retornar/reiniciar — e quatro a respostas do sistema — erro, acerto, pontuação e encerramento. Essa composição evidencia uma especialização ausente nos módulos exploratórios: sinais de manipulação coexistem com sinais avaliativos e de progressão. As repetições equivalentes foram colapsadas e usadas apenas para confirmar a associação

categoria–efeito. Como o banco de questões é variável, o corpus documenta uma amostra de estados e ações, sem pretender exaurir todas as reações; a ordem de acesso não integra o resultado.

A Figura 33 apresenta a entrada no nível por dois quadros adjacentes do mesmo evento. Bardin (2016), Krippendorff (2018) e Yin (2018) fundamentam a separação entre inventário, codificação e interpretação. Os parâmetros acústicos auxiliam a diferenciar formas, mas os sentidos “acerto”, “erro”, “progressão” ou “navegação” foram atribuídos somente quando a tela os demonstrou. O Apêndice E preserva as categorias e exemplos localizados por timecodes relativos e absolutos; a ordem dos acessos realizados pela pessoa que gravou o vídeo não integra a interpretação.

Figura 33 – Controle audiovisual da entrada no nível 1 do SVQ-C



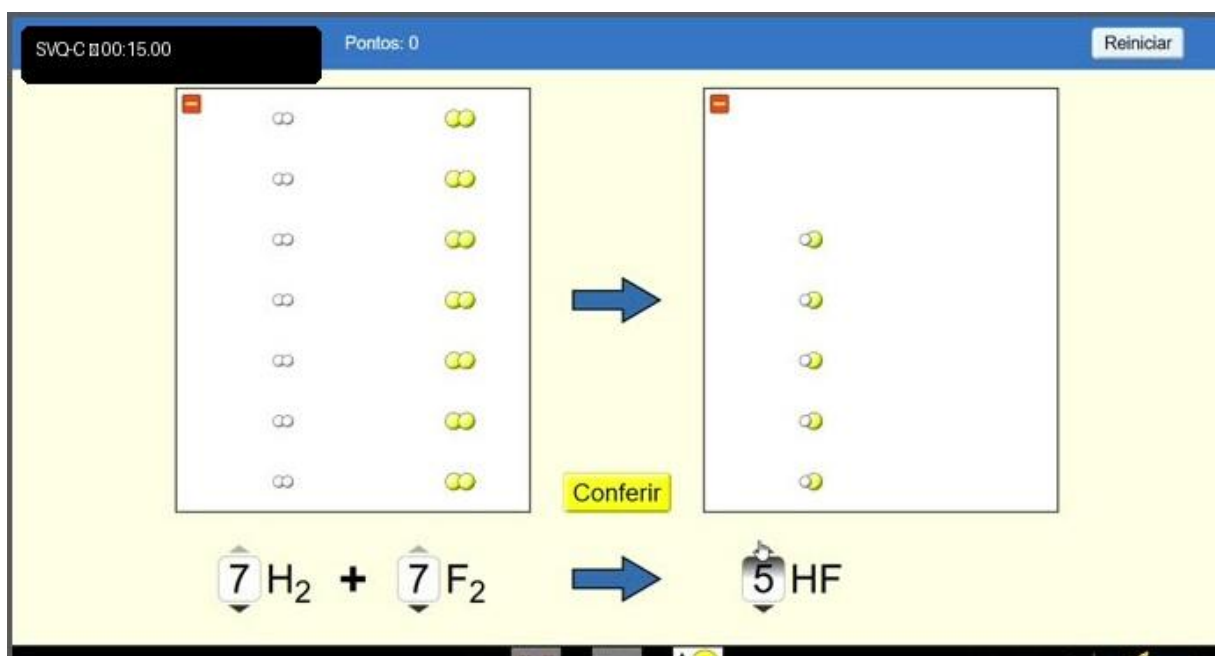
Fonte: elaboração própria a partir do corpus audiovisual do SVQ-C (relativo 00:00:03–00:00:04,50) (2026).

5.1.3.3 Arquitetura Imagético-Contextual (AIC) do SVQ-C

A AIC do Jogo organiza uma rodada com equação e controles na base, painéis de reagentes/produtos ao centro, pontuação e progresso no topo e “Conferir” entre os lados. Após a submissão, uma caixa central bloqueia ou redireciona a ação. O campo é menos configurável que A/B: não há menu livre de partículas/balanças/barras; em compensação, há ramificações avaliativas e progressão. Sons mais longos aparecem acoplados a caixas de acerto e telas de resultado.

A Figura 34 mostra a arquitetura da rodada antes da conferência. Jewitt, Bezemer e O’Halloran (2016) sustentam que modalização e sequência precisam ser lidas em conjunto. O posicionamento central do feedback, a alteração de disponibilidade dos controles e a saliência acústica convergem para regular o percurso. O som não ocupa uma região visual, mas participa da arquitetura temporal: separa tentativa, julgamento e continuação.

Figura 34 – Arquitetura da rodada antes da conferência no SVQ-C



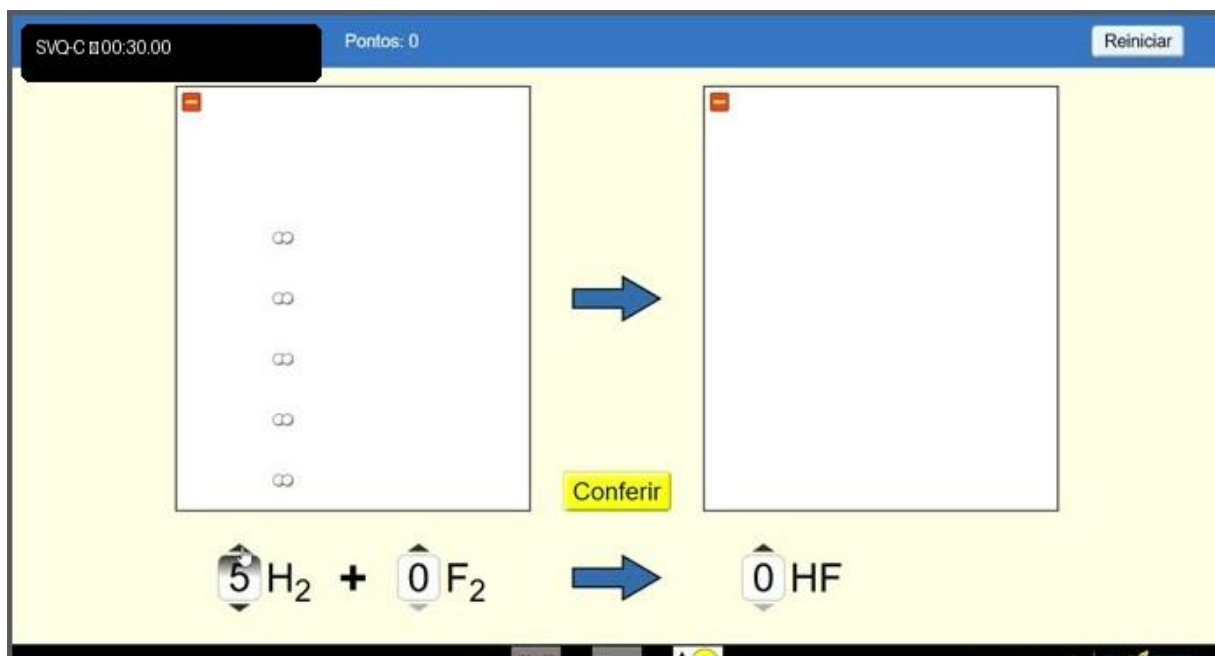
Fonte: elaboração própria a partir do corpus audiovisual do SVQ-C (relativo 00:00:15) (2026).

5.1.3.4 Multiplicidade Representacional (MR) do SVQ-C

A MR do SVQ-C combina equação simbólica, partículas, seta, texto avaliativo, rostos, marcas verdes/vermelhas, pontuação e estrelas. Balanças e barras não ficam livremente disponíveis durante a construção, podendo aparecer apenas em explicações condicionadas. A multiplicidade inclui, portanto, representações químicas e signos de percurso. O som integra os signos de percurso: ele não representa átomo ou coeficiente, mas reforça eventos de interface e avaliação.

Na Figura 35, equação e partículas coexistem antes da submissão. Ainsworth (1999, 2006) ajuda a separar formas que representam o domínio das que regulam a tarefa. Enge et al. (2024) reforça que componentes audiovisuais podem ser complementares sem transmitir o mesmo dado. No Jogo, a imagem fornece a estrutura química; o som fornece marcação temporal e valência avaliativa em alguns eventos. Confundir esses papéis faria estrelas e áudio parecerem evidência de compreensão química, algo que o corpus não mede.

Figura 35 – Equação e partículas na construção de uma resposta do SVQ-C



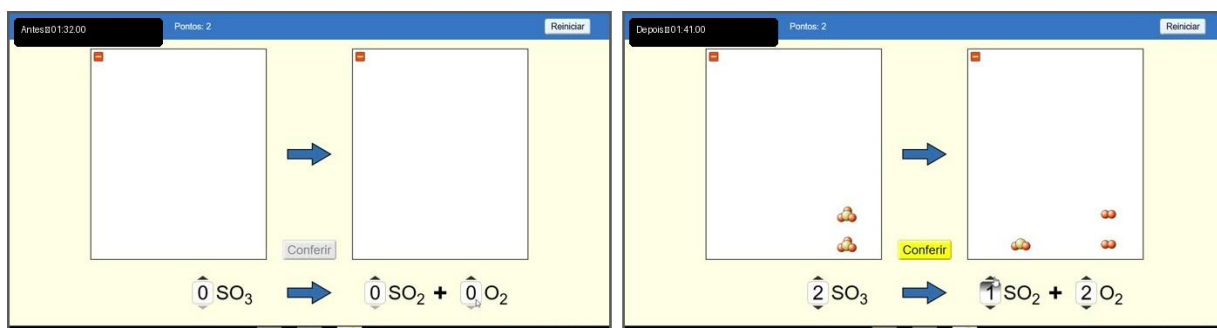
Fonte: elaboração própria a partir do corpus audiovisual do SVQ-C (relativo 00:00:30) (2026).

5.1.3.5 Variedade de Formas Representacionais Intranível (VFRI) do SVQ-C

A variedade intranível é mais controlada pelo sistema do que nos módulos exploratórios. A equação e as partículas dominam a construção; mensagens e caixas reorganizam a leitura após “Conferir”; formas quantitativas podem ser convocadas por “Explique-me”. O contraste mais marcado ocorre no plano avaliativo: rosto sorridente ou triste, marca verde ou vermelha, texto, pontuação e som expressam aspectos do resultado por diferentes modos.

A Figura 36 confronta um estado de tentativa com um feedback de erro. Schnotz e Bannert (2003) e Ainsworth (2006) permitem analisar a especialização dessas formas. O som de erro identificado no episódio 00:01:41,634–00:01:42,454 acompanha rosto triste e “não balanceada”; ele agrega saliência e valência, mas não demonstra qual elemento está desigual. A explicação química depende das representações que mostram as contagens. A modalidade sonora, assim, complementa a avaliação sem substituir o diagnóstico.

Figura 36 – Variedade modal no feedback de erro do SVQ-C



Fonte: elaboração própria a partir do corpus audiovisual do SVQ-C (relativo 00:01:32–00:01:41) (2026).

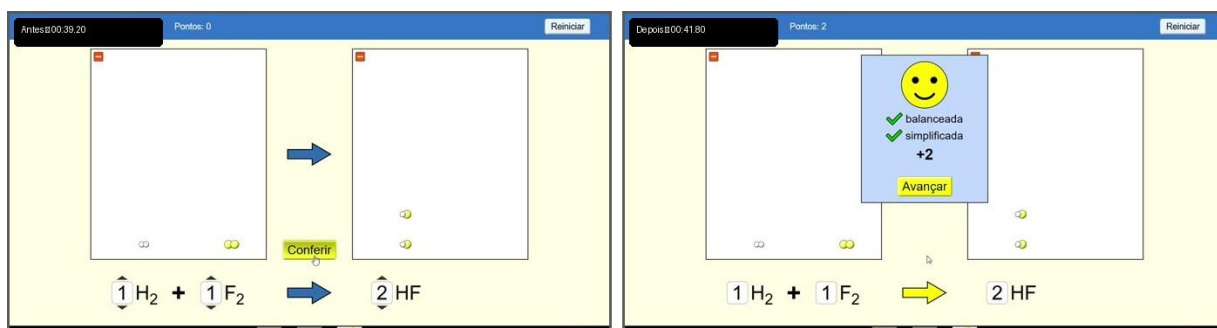
5.1.3.6 Correspondência Conceitual (CC) do SVQ-C

A correspondência entre coeficientes, partículas e conservação permanece, mas é submetida a uma regra de progressão. Quando a equação está balanceada e simplificada, aparecem marcas verdes, sorriso, pontos e “Avançar”. Quando está balanceada, porém não simplificada, o sistema reconhece a primeira propriedade e

impede a progressão até a razão mínima. A dupla exigência torna explícita a distinção entre validade por conservação e forma canônica.

A Figura 37 registra o acerto em torno de 00:00:39,704–00:00:41,384 relativo. Johnstone (2000), Talanquer (2011) e Hamerská et al. (2024) sustentam a necessidade de conectar a regra simbólica às quantidades representadas. A sequência sonora de cerca de 1,68 s coincide com a caixa positiva e a seta amarela, mas não codifica a razão atingida. Ela marca o êxito no percurso. A correspondência química continua verificável pelas partículas e pela equação.

Figura 37 – Correspondência conceitual e feedback de acerto no SVQ-C



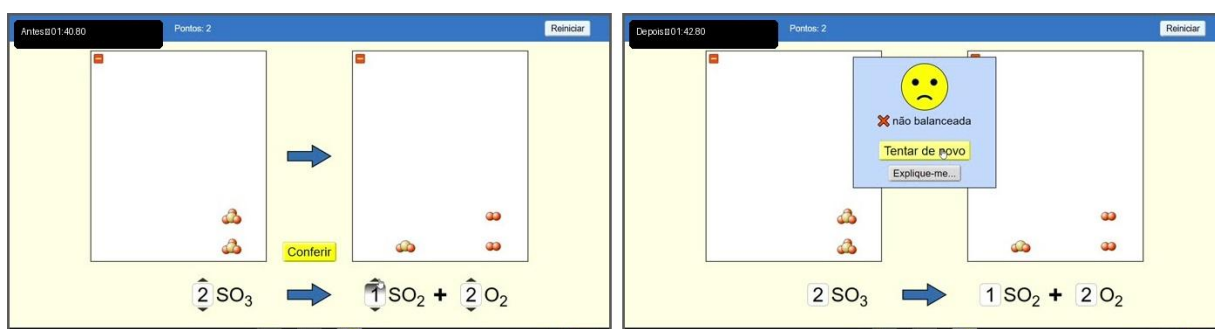
Fonte: elaboração própria a partir do corpus audiovisual do SVQ-C (relativo 00:00:39,20–00:00:41,80) (2026).

5.1.3.7 Dinâmica Representacional (DR) do SVQ-C

A DR é segmentada por submissão. Antes de “Conferir”, coeficientes e partículas mudam; depois, surge um painel que classifica a tentativa e altera os comandos disponíveis. O erro abre “Tentar de novo” ou “Explique-me”; o acerto libera “Avançar”; o fim de cinco desafios abre um placar. Essa ramificação converte a transformação visual em uma árvore de estados, e não em mera atualização contínua.

A Figura 38 mostra a passagem do estado construído ao feedback. Lowe (2003) orienta a distinguir dinamismo conceitual de saliência. No SVQ-C, o movimento da caixa e o som chamam atenção para o julgamento, enquanto a relação estequiométrica pode ficar em segundo plano. O desenho favorece segmentação do percurso, mas exige mediação para que o estudante explique a causa do feedback. O som confirma a transição de estado; não explicita a transformação química.

Figura 38 – Transformação da tentativa em estado avaliativo no SVQ-C



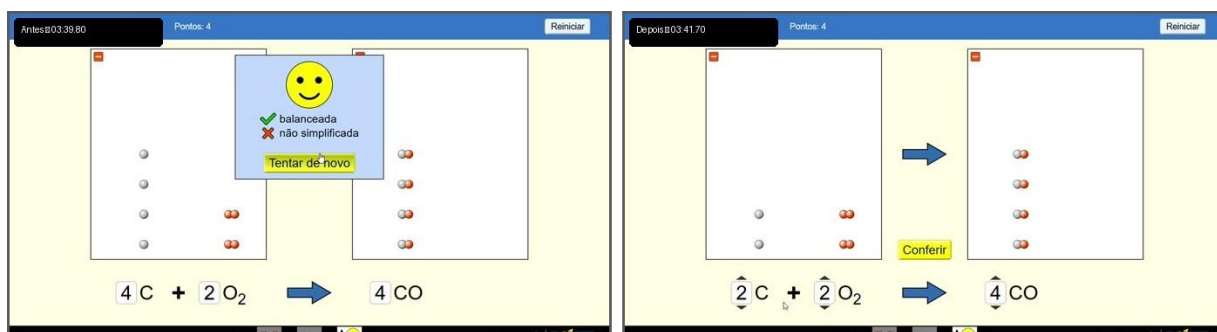
Fonte: elaboração própria a partir do corpus audiovisual do SVQ-C (relativo 00:01:40,80–00:01:42,80) (2026).

5.1.3.8 Relação Temporal (RT) do SVQ-C

A RT diferencia manipulação, submissão e avaliação. Sons breves acompanham mudanças de coeficiente; após “Conferir”, sequências perceptivelmente mais desenvolvidas coincidem com feedbacks. O erro em 00:03:36,674 relativo e o acerto iniciado em 00:03:00,534 apresentam relações audiovisuais distintas da confirmação elementar de clique. O contraste sustenta categorias funcionais, embora não se tenha realizado experimento perceptivo para afirmar que usuários reconhecem esse código sem apoio visual.

A Figura 39 materializa a sincronia entre conferência e feedback negativo. Enge et al. (2024) permite interpretar a coordenação temporal como design audiovisual integrado. Diferentemente de A/B, o som do Jogo participa de uma oposição avaliativa mais marcada. Ainda assim, a inferência é funcional e semiótica, não psicológica: o registro mostra associação programada, mas não demonstra atenção, emoção, motivação ou aprendizagem do usuário.

Figura 39 – Sincronia entre submissão e feedback de erro no SVQ-C



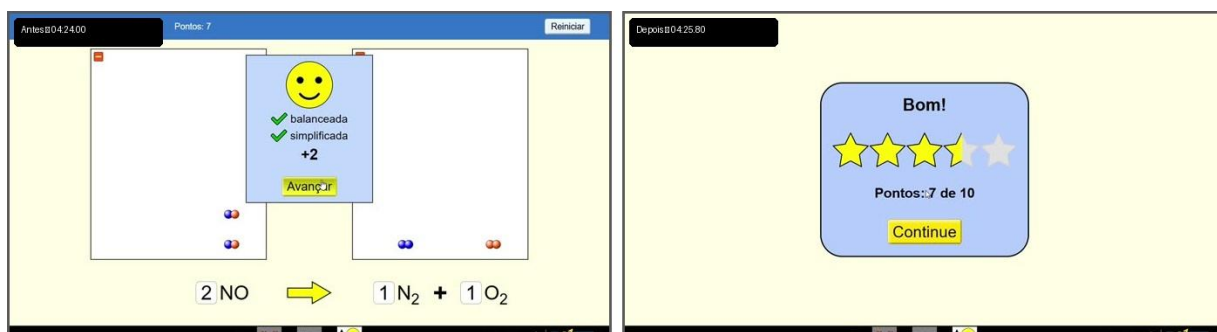
Fonte: elaboração própria a partir do corpus audiovisual do SVQ-C (relativo 00:03:39,80–00:03:41,70) (2026).

5.1.3.9 Modulação Representacional (MD) do SVQ-C

A modulação deriva de nível, estado de tentativa, abertura de explicação, pontuação e progresso. Ao final de uma série, a tela química é substituída pelo placar; ao retornar, estrelas acumuladas reorganizam a escolha de nível. Esse regime modula tanto a informação disponível quanto o valor atribuído à ação. O som prolongado acompanha algumas dessas mudanças de alta saliência e participa da passagem entre trabalho químico e recompensa.

A Figura 40 mostra a modulação para o placar. Kress (2010) descreve como recursos modais realizam escolhas de destaque; Lowe (2003) alerta que destaque perceptivo pode não coincidir com centralidade conceitual. A sequência sonora pode funcionar como adereço motivacional ou marcador de conclusão. Não é despropositada por si mesma, porque corresponde ao fechamento da rodada; torna-se potencialmente problemática se a recompensa for tomada como explicação ou se obscurecer a justificativa química.

Figura 40 – Modulação da rodada para a tela de pontuação no SVQ-C



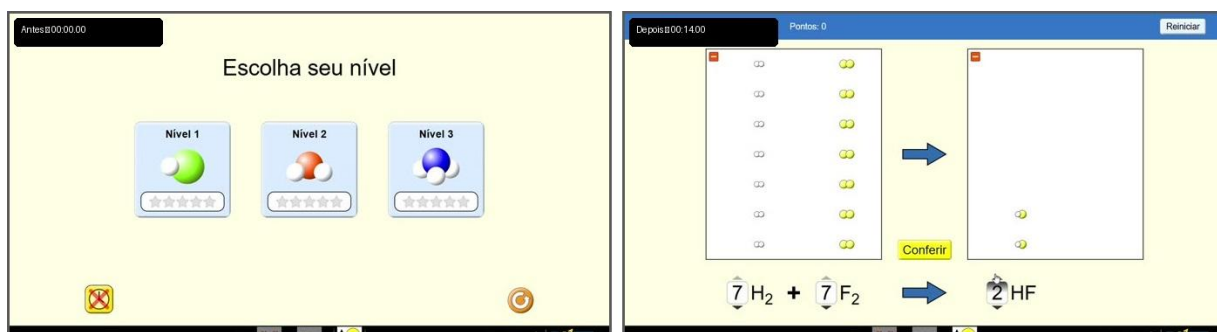
Fonte: elaboração própria a partir do corpus audiovisual do SVQ-C (relativo 00:04:24–00:04:25,80) (2026).

5.1.3.10 Potencial Interativo-Representacional (PIR) do SVQ-C

O PIR inclui selecionar nível, ajustar coeficientes, submeter, tentar novamente, solicitar explicação, avançar e reiniciar. O sistema não oferece a mesma liberdade de troca de formas de A/B; em compensação, possibilita diagnóstico condicionado e progressão. A aleatoriedade do banco amplia a variedade de reações, mas o vídeo representa apenas a amostra percorrida. A interação é regulada pela correção e pela simplificação.

A Figura 41 mostra o salto da escolha de nível para a manipulação. Ainsworth (2006) e Chan et al. (2021) vinculam potencial ao desenho das ações e dos apoios. O áudio reforça entrada, conferência, acerto, erro e término, construindo um ritmo de jogo. Esse ritmo pode apoiar orientação, mas não acrescenta uma ação representacional nova. O alcance didático depende de usar “Explique-me” e de solicitar justificativas, não apenas de acumular estrelas.

Figura 41 – Seleção de nível e entrada no espaço interativo do SVQ-C



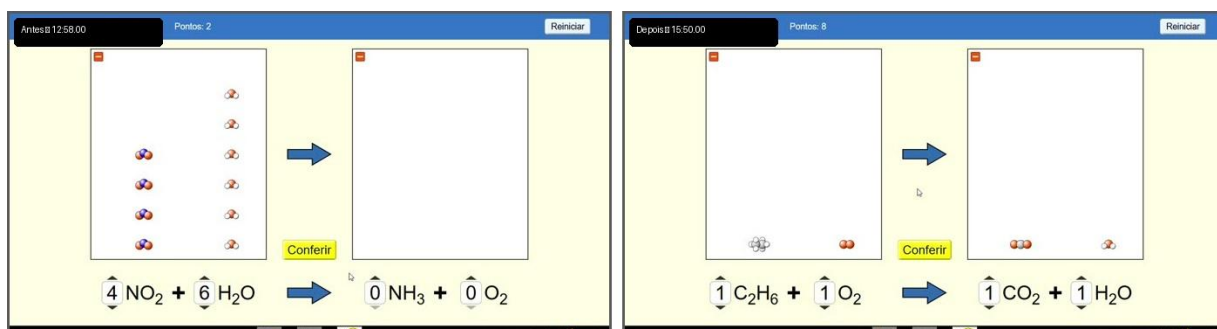
Fonte: elaboração própria a partir do corpus audiovisual do SVQ-C (relativo 00:00:00–00:00:14) (2026).

5.1.3.11 Recorrência transversal nos níveis e rodadas do SVQ-C

Repete-se, nos níveis registrados, a cadeia construir–conferir–receber feedback–continuar, com pontuação e estrelas acumuladas. Variam complexidade, número de espécies, razão e disponibilidade de explicação. Os sons curtos repetem-se durante a construção, e sequências mais salientes reaparecem em acertos e encerramentos. Essa recorrência estabelece uma gramática audiovisual própria do Jogo.

A Figura 42 contrapõe rodadas de níveis distintos. Miles, Huberman e Saldaña (2014) permitem separar o padrão recorrente da variação amostral. Eramo et al. (2025) mostram que experiências sonoras em ciência dependem de desenho instrucional robusto; aqui, a recorrência acústica organiza o percurso, mas não foi criada para representar dados químicos. Ela pode favorecer antecipação do próximo passo, sem comprovar transferência conceitual entre reações.

Figura 42 – Recorrência da gramática de jogo em níveis distintos do SVQ-C



Fonte: elaboração própria a partir do corpus audiovisual do SVQ-C (relativo 00:12:58 e 00:15:50) (2026).

5.1.3.12 Configuração Representacional Dominante (CRD) do SVQ-C

A CRD do SVQ-C é uma avaliação segmentada da equação, em que partículas apoiam a construção e signos multimodais regulam o percurso. A equação continua sendo o núcleo químico, mas rosto, texto, cor, pontos, estrelas e som ganham peso após a submissão. A configuração dominante não é somente simbólico-diagramática: é simbólico-diagramática-avaliativa, com o áudio integrado ao último componente.

A Figura 43 mostra a caixa de acerto sobre o estado químico. Ainsworth (2006) explica a relação entre representações e tarefas; Jewitt, Bezemer e O'Halloran (2016) fundamentam a leitura do conjunto modal. O som mais prolongado e tonal associado ao acerto aumenta a diferenciação em relação aos impulsos de manipulação. Mesmo assim, não há mapeamento de informação química para som; logo, a CRD incorpora feedback auditivo, mas não sonificação estequiométrica.

Figura 43 – Configuração representacional dominante do SVQ-C/Jogo



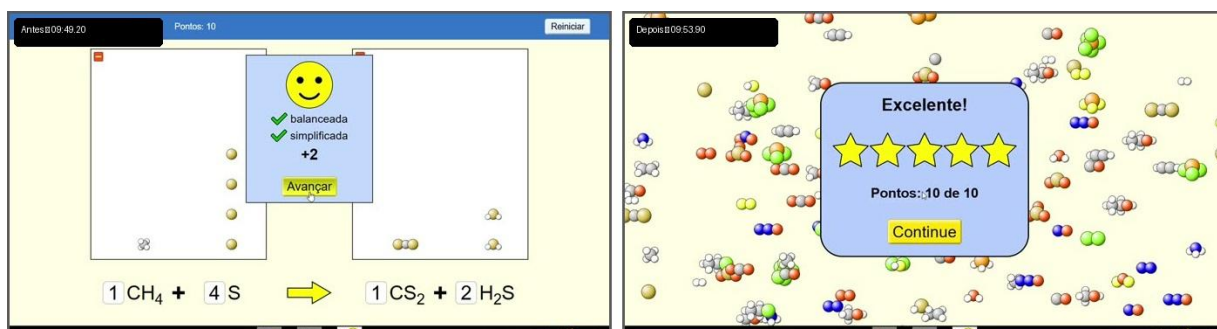
Fonte: elaboração própria a partir do corpus audiovisual do SVQ-C (relativo 00:10:04,90) (2026).

5.1.3.13 Potencial Didático-Representacional (PDR) do SVQ-C

O PDR do Jogo está em exigir decisão, oferecer retorno contingente, distinguir balanceamento de simplificação e permitir revisão. O feedback multimodal torna o julgamento inequívoco: marcas, texto, rosto e som convergem. As ocorrências ligadas ao acerto e ao encerramento formam categorias perceptivelmente mais salientes que o simples clique de coeficiente, como se observa na passagem iniciada em 00:09:49,774 relativo. A diferença funcional reforça o fechamento e a progressão.

A Figura 44 mostra a passagem do acerto à tela “Excelente!”, com cinco estrelas e dez pontos. Eramo et al. (2025) e Guiotto Nai Fovino et al. (2024) indicam possibilidades educativas do som, mas também a necessidade de correspondência clara e desenho robusto. Aqui, o áudio é um adereço didático no sentido de complementar e valorizar o feedback; ele pode evocar convenções de recompensa dos jogos. Essa analogia é motivacional, não química, e não deve substituir a explicação da conservação.

Figura 44 – Feedback audiovisual de acerto e recompensa no SVQ-C



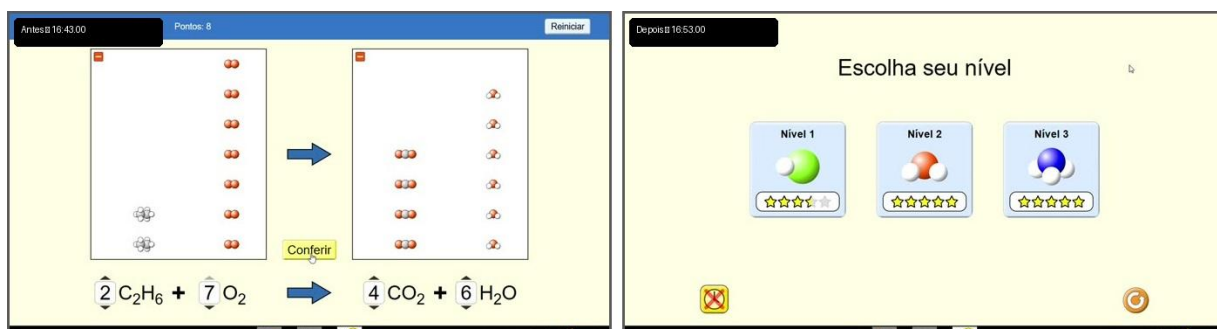
Fonte: elaboração própria a partir do corpus audiovisual do SVQ-C (relativo 00:09:49,20–00:09:53,90) (2026).

5.1.3.14 Síntese conclusiva da análise individual do SVQ-C

O SVQ-C converte o balanceamento em estrutura avaliativa programada. Sua contribuição específica é transformar propriedades químicas e convencionais em condições de ação: balancear, simplificar, conferir, corrigir e avançar. A análise sonora encontra maior diferenciação funcional do que em A/B. Impulsos marcam manipulação; sequências breves acompanham erro/acerto; sequências prolongadas marcam resultados e retorno. O áudio especializa-se, mas essa conclusão decorre das categorias do sistema, não da ordem particular em que os campos foram acessados no vídeo.

A Figura 45 sintetiza o fechamento e o retorno aos níveis. À luz de Kress (2010), Ainsworth (2006), Lowe (2003) e Enge et al. (2024), o som contribui para segmentar e valorizar estados, sem representar diretamente quantidade ou conservação. O PDR é condicional: a gamificação pode sustentar atenção e persistência, mas o corpus não mede motivação; sem mediação, estrelas e sons podem deslocar o foco da justificativa para a recompensa.

Figura 45 – Síntese categorial audiovisual do SVQ-C/Jogo



Fonte: elaboração própria a partir do corpus audiovisual do SVQ-C (relativo 00:16:43–00:16:53) (2026).

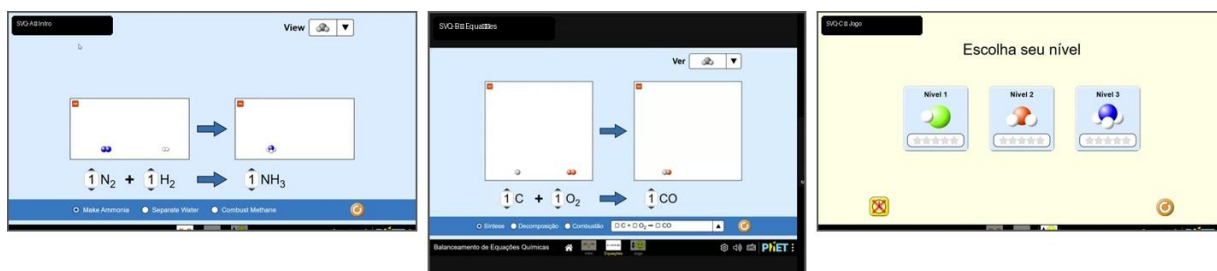
5.2 Síntese integradora do conjunto temático Balanceamento de Equações Químicas

5.2.1 Delimitação da análise intercasos

A análise intercasos mantém os três vídeos A, B e C como unidades independentes e compara apenas categorias aplicadas de modo comum. Os timecodes, as capturas, as categorias de ação/evento e os estados visuais foram normalizados para possibilitar comparação sem transformar repetições deliberadas em frequências explicativas.

A Figura 46 reúne as três entradas funcionais. Bardin (2016) e Yin (2018) sustentam a necessidade de corpus delimitado e cadeia de evidências; Miles, Huberman e Saldaña (2014) fundamentam a matriz comparativa. A comparação revela três regimes — explorar, classificar e avaliar — e não uma escala simples de complexidade. O dado sonoro pertinente é sua presença, diferenciação e função nas categorias, não a soma de ocorrências produzidas pelo protocolo de repetição.

Figura 46 – Delimitação comparativa dos três casos funcionais



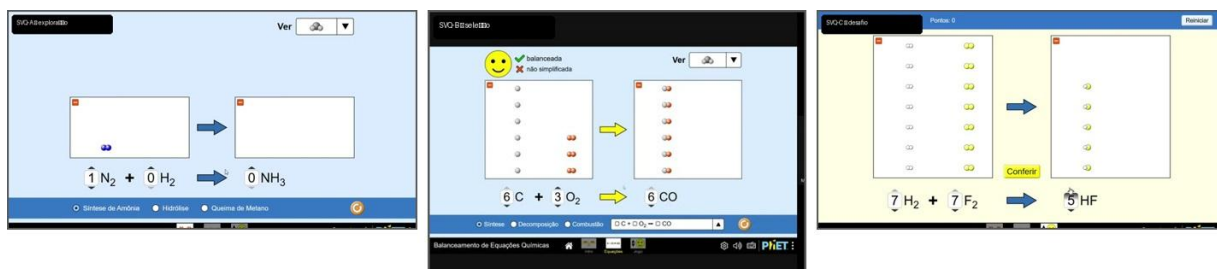
Fonte: elaboração própria a partir dos três vídeos do corpus audiovisual (2026).

5.2.2 Arquiteturas e especializações funcionais no conjunto

As arquiteturas compartilham equação, coeficientes, seta e entidades, mas especializam o entorno. A oferece escolha de reação e lentes; B adiciona classes e biblioteca; C substitui a livre alternância por níveis, submissão e progressão. A especialização sonora acompanha esse deslocamento: A/B usam predominantemente sinais breves de atuação; C incorpora sequências mais longas em julgamento e recompensa.

A Figura 47 coloca lado a lado exploração, seleção e desafio. Kress (2010) e Jewitt, Bezemer e O'Halloran (2016) mostram que arquitetura e temporalidade distribuem funções semióticas. O áudio não é camada uniforme do produto: sua função muda com o regime. A/B oferecem confirmação operacional; C usa o som também para separar estados avaliativos. Essa diferença é sustentada pelo alinhamento audiovisual, não por suposição sobre intenção.

Figura 47 – Arquiteturas e especializações dos módulos Intro, Equações e Jogo



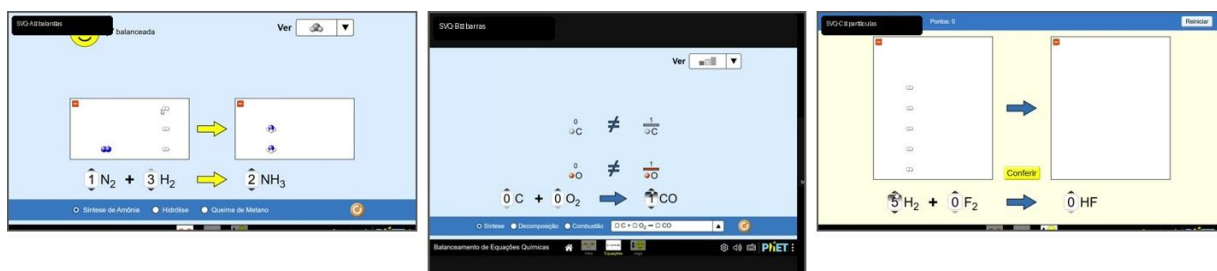
Fonte: elaboração própria a partir dos três vídeos do corpus audiovisual (2026).

5.2.3 Níveis e formas representacionais no conjunto

Nos três casos, o núcleo químico articula o simbólico e o submicroscópico diagramático. Nenhum registro mostrou fenômeno macroscópico empírico. A/B disponibilizam partículas, balanças, barras e Nenhuma; C privilegia partículas e condiciona outras formas ao feedback. O som não constitui nível químico adicional porque não codifica entidades ou grandezas. Ele é um modo de interface e avaliação.

A Figura 48 compara formas quantitativas e particuladas. Johnstone (1982, 1991), Gilbert e Treagust (2009) e Hamerská et al. (2024) sustentam a distinção entre níveis e a necessidade de relações entre símbolos e partículas. Enge et al. (2024) permite qualificar o resultado: a presença de som torna o objeto audiovisual, mas não o transforma automaticamente em representação auditiva do conhecimento químico.

Figura 48 – Níveis e formas representacionais mobilizados no conjunto



Fonte: elaboração própria a partir dos três vídeos do corpus audiovisual (2026).

A comparação permite avançar da enumeração de níveis para uma tipologia das relações efetivamente inscritas no design. O Quadro 13 distingue relações interníveis, intraníveis e metarrepresentacionais, evitando tratar toda justaposição como integração. A classificação considera o que é posto em correspondência, a operação semiótica realizada e o limite observado no corpus.

Quadro 13 – Tipologia das relações entre níveis e formas representacionais no conjunto temático

Tipo de relação	Níveis/formas articulados	Operação representacional	Manifestação nos casos	Alcance e limite
Coocorrência orientada	Simbólico ↔ submicroscópico	Apresenta simultaneamente equação, moléculas e contagens, com alinhamento espacial.	SVQ-A, SVQ-B e SVQ-C.	Cria disponibilidade para comparação, mas a simultaneidade, isoladamente, não garante integração conceitual.
Correspondência quantitativa	Coefficiente simbólico ↔ número de entidades ↔ total de átomos	Propaga a alteração do coeficiente para quantidades diagramáticas e contagens elementares.	Presente nos três casos; visualmente mais explorável em A/B.	Explicita conservação por contagem; não representa diretamente o fenômeno macroscópico.
Redescrição diagramática	Equação simbólica ↔ balança/barras	Reexpressa igualdade ou desigualdade por metáforas e diagramas quantitativos.	Formas selecionáveis em SVQ-A e SVQ-B; uso mais condicionado em SVQ-C.	Pode complementar a equação, mas a metáfora da balança não substitui a explicação estequiométrica.
Equivalência intranível	Simbólico ↔ simbólico	Relaciona vetores de coeficientes múltiplos e a menor razão inteira.	SVQ-B torna múltiplos contrastáveis; SVQ-C exige simplificação para progressão; SVQ-A limita a exploração pelo teto dos controles.	Distingue conservação de convenção de escrita mínima; a equivalência precisa ser inferida ou mediada.
Validação metarrepresentacional	Representação química ↔ indicadores de estado	Classifica a configuração como não balanceada, balanceada, simplificada, correta ou incorreta.	Indicadores visuais nos três casos; julgamento e progressão mais especializados em SVQ-C.	Informa o estatuto da resposta, mas não necessariamente explicita a razão química do julgamento.
Complementação modal não química	Representações visuais ↔ som de interface	Marca efetivação de ação ou valência avaliativa do evento.	Confirmação operacional em SVQ-A/SVQ-B; confirmação e avaliação em SVQ-C.	O som integra o evento multimodal, mas não constitui nível químico nem sonificação de conservação ou proporcionalidade.
Lacuna intermodal/inter-níveis	Macroscópico ausente ↔ simbólico/submicroscópico presentes	Não há ponte interna com fenômeno observável empírico.	Ausência funcional nos três casos.	A relação com evidências macroscópicas depende de tarefa, fonte ou mediação externa.

Fonte: elaboração própria (2026), com base nos três vídeos do corpus e em Johnstone (1982, 1991, 1993, 2000), Ainsworth (1999, 2006), Schnotz e Bannert (2003), Gilbert e Treagust (2009), Talanquer (2011) e Kress (2010).

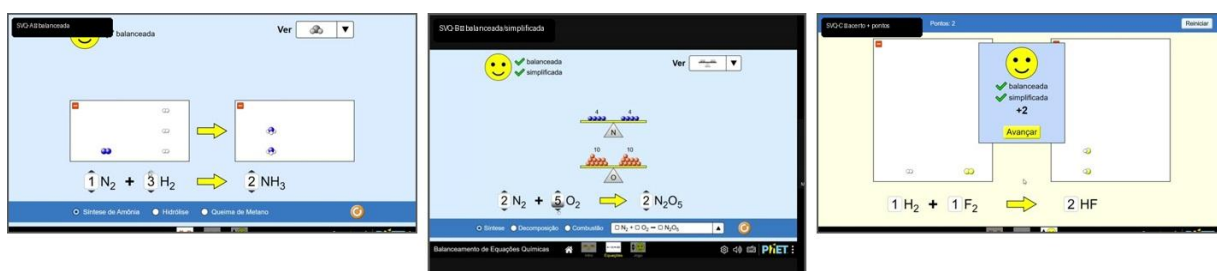
A tipologia evidencia que o eixo mais estável do conjunto não é a presença de três níveis, mas a coordenação seletiva entre o simbólico e o submicroscópico. As relações mais fortes são quantitativas e metarrepresentacionais: o coeficiente altera entidades e totais, enquanto indicadores qualificam o estado produzido. As relações diagramáticas funcionam como redescrições complementares, e a equivalência entre múltiplos e razão mínima ocorre no interior do nível simbólico. Em contraste, o nível macroscópico não participa funcionalmente do sistema e o som informa a interação ou a avaliação, não o conteúdo químico. Assim, a integração é assimétrica, parcial e dependente da função de cada módulo, em consonância com a distinção de Ainsworth (1999, 2006) entre complementar, restringir e construir relações entre representações.

5.2.4 Correspondências conceituais e equivalência estequiométrica

A correspondência transversal liga coeficiente, número de entidades e contagem elementar. O tratamento da proporção distingue os casos: A restringe os múltiplos pelo teto 3; B permite contrastar estados balanceados e simplificados; C transforma a menor razão em requisito de progressão. O conjunto, portanto, separa conservação, equivalência proporcional e convenção de escrita mínima.

A Figura 49 reúne os três modos de validar o estado. Johnstone (2000), Talanquer (2011) e Hamerská et al. (2024) ajudam a evitar que o balanceamento seja reduzido a ajuste numérico. O áudio acompanha a chegada ao resultado, mas não explicita essa distinção. Em C, o som valoriza a aprovação; em A/B, impulsos semelhantes ocorrem também fora do acerto. A correspondência química permanece visualmente demonstrada.

Figura 49 – Correspondências conceituais e tratamento da proporção mínima



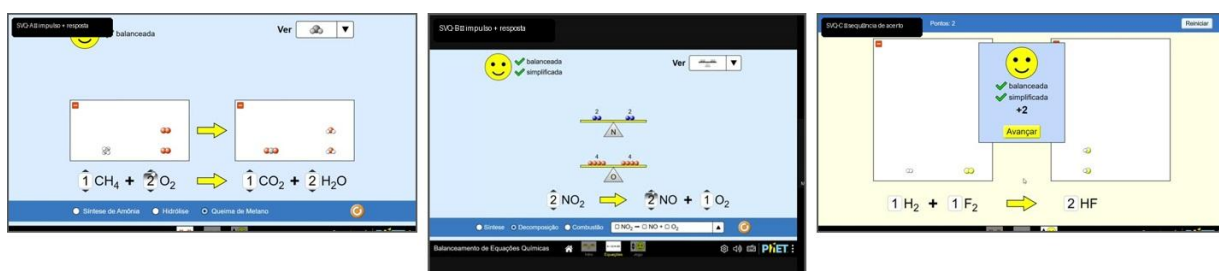
Fonte: elaboração própria a partir dos três vídeos do corpus audiovisual (2026).

5.2.5 Transformações, temporalidades e modulações audiovisuais

A/B adotam resposta contínua; C insere submissão e ramificação. O inventário empírico resultou em cinco categorias funcionais no SVQ-A, sete no SVQ-B e dez no SVQ-C, sem contabilizar repetições equivalentes. Nas categorias compartilhadas — ajuste de coeficiente, seleção e reinicialização — o som confirma a efetivação da operação. Em A/B, o estado balanceado ou simplificado emerge após um clique já sonorizado, sem código auditivo autônomo comprovado. Em C, conferir e receber o julgamento formam um episódio audiovisual estreitamente acoplado: o registro permite distinguir a valência sonora de erro e acerto, mas não separar com segurança um suposto som de submissão do sinal avaliativo subsequente. Pontuação, encerramento e retorno também apresentam tratamento audiovisual próprio.

A Figura 50 exemplifica os três regimes temporais. Lowe (2003) e Enge et al. (2024) ajudam a distinguir saliência, sincronia e conteúdo. Em nenhum caso a simples simultaneidade prova que o som comunica química. O Quadro 14 resume a cobertura das categorias e seus limites inferenciais. O áudio é confirmação operacional quando atesta o clique, complemento quando chama atenção para a resposta e marcador motivacional quando mobiliza convenções de recompensa.

Figura 50 – Regimes de transformação e feedback audiovisual nos três casos



Fonte: elaboração própria a partir dos três vídeos do corpus audiovisual (2026).

Quadro 14 – Categorias de ação/evento e funções sonoras por caso

Caso	Categorias observadas	Presença do som	Função categorial dominante
SVQ-A	5 categorias: 4 ações (coeficiente; reação; visualização; reiniciar/navegar) + 1 estado resultante (balanceamento)	presente e recorrente nas operações	confirmação operacional; estado balanceado sem código sonoro autônomo comprovado

Caso	Categorias observadas	Presença do som	Função categorial dominante
SVQ-B	7 categorias: 5 ações (coeficiente; classe; equação; visualização; reiniciar) + 2 estados resultantes (balanceamento; simplificação)	presente e recorrente nas operações	confirmação operacional; balanceamento/simplificação dependem do feedback visual
SVQ-C	10 categorias: 6 ações (nível; coeficiente; conferir; tentar/explicar; avançar; retornar/reiniciar) + 4 respostas (erro; acerto; pontuação; encerramento)	presente, com diferenciação entre manipulação e avaliação	confirmação operacional + feedback avaliativo e progressão/recompensa

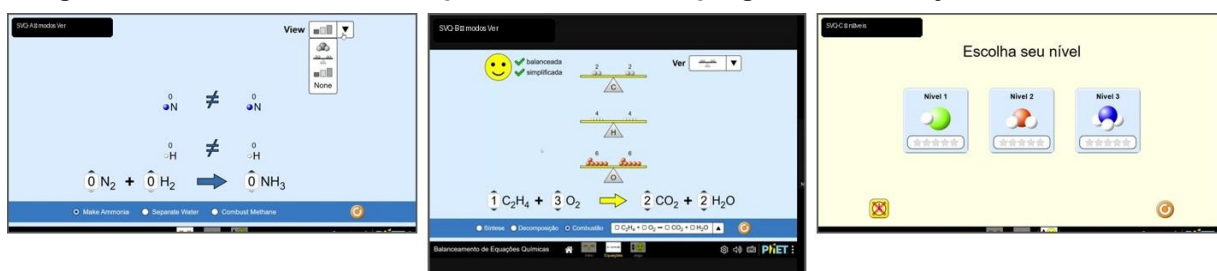
Fonte: elaboração própria a partir do alinhamento entre cliques, efeitos em tela e sinais sonoros repetidos (2026).

5.2.6 Possibilidades interativo-representacionais do conjunto

O PIR apresenta especializações funcionais complementares: A permite explorar relações; B amplia repertório e múltiplos; C solicita decisão e revisão. Nenhum módulo isolado reúne liberdade de formas, biblioteca ampla e avaliação progressiva. A comparação não estabelece ordem didática obrigatória entre os módulos nem transforma a ordem da gravação em resultado; apenas identifica possibilidades que podem ser combinadas por uma proposta pedagógica externa.

A Figura 51 compara controles característicos. Ainsworth (2006), Chan et al. (2021) e Palacios, Pascual e Moreno-Mediavilla (2024) reforçam que possibilidades do recurso precisam ser articuladas por desenho instrucional. O som facilita reconhecimento de ações e estados, sobretudo no Jogo, porém não cria uma nova possibilidade de manipular o conhecimento. Seu valor depende da tarefa e da mediação.

Figura 51 – Possibilidades de exploração, seleção e progressão no conjunto



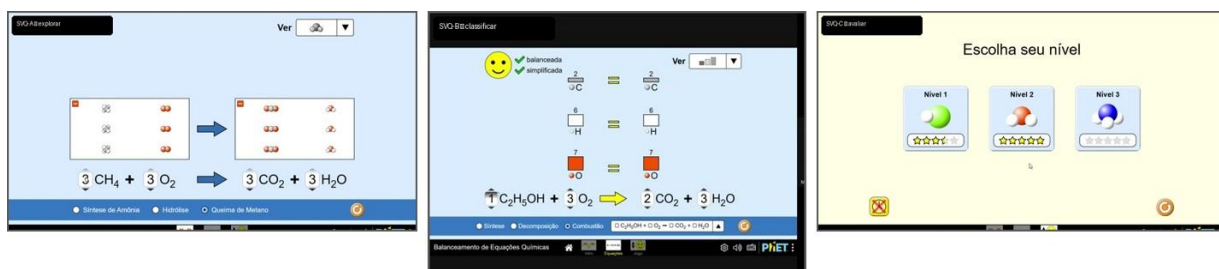
Fonte: elaboração própria a partir dos três vídeos do corpus audiovisual (2026).

5.2.7 Convergências, divergências e complementaridades entre as simulações

Convergem a equação central, os controles discretos e a conservação por contagem. Divergem repertório, liberdade de visualização, temporalidade avaliativa e especialização sonora. A complementa B ao introduzir formas; B complementa A ao tornar acessíveis múltiplos; C complementa ambos ao testar a menor razão. Persistem lacunas: ausência macroscópica e ausência de codificação auditiva de propriedades químicas.

A Figura 52 sintetiza os três regimes. Ainsworth (1999, 2006) permite interpretar complementação sem supor superioridade. Fadda, Salis e Vivanet (2022) e Palacios, Pascual e Moreno-Mediavilla (2024) situam a importância de integrar recursos e mediação. O áudio converge como confirmação geral, mas diverge em C ao assumir valência avaliativa mais nítida. Essa especialização pode favorecer orientação, sem provar benefício pedagógico.

Figura 52 – Convergências, divergências e complementaridades funcionais



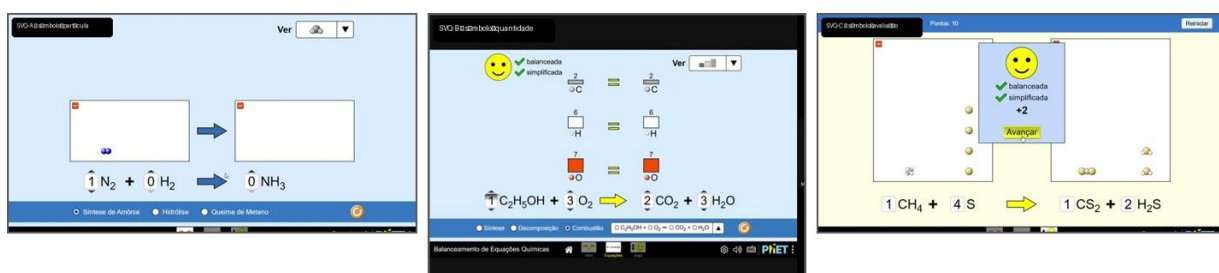
Fonte: elaboração própria a partir dos três vídeos do corpus audiovisual (2026).

5.2.8 Configuração representacional integrada do conjunto

A configuração integrada é um sistema simbólico-diagramático-avaliativo organizado em três regimes. A equação conserva o objeto químico; partículas e diagramas reexpressam quantidades; rótulos e indicadores classificam estados; som e movimento regulam a temporalidade. A integração não soma canais indistintamente: cada modo apresenta informação, saliência ou condição de ação específica.

A Figura 53 mostra a cadeia símbolo–quantidade–avaliação. Kress (2010), Jewitt, Bezemer e O'Halloran (2016) e Enge et al. (2024) sustentam essa leitura relacional. O som é modalmente relevante porque diferencia momentos e, no Jogo, valências; é conceitualmente secundário porque não carrega relações estequiométricas. Essa assimetria é um resultado, não uma deficiência presumida.

Figura 53 – Configuração representacional integrada do conjunto temático



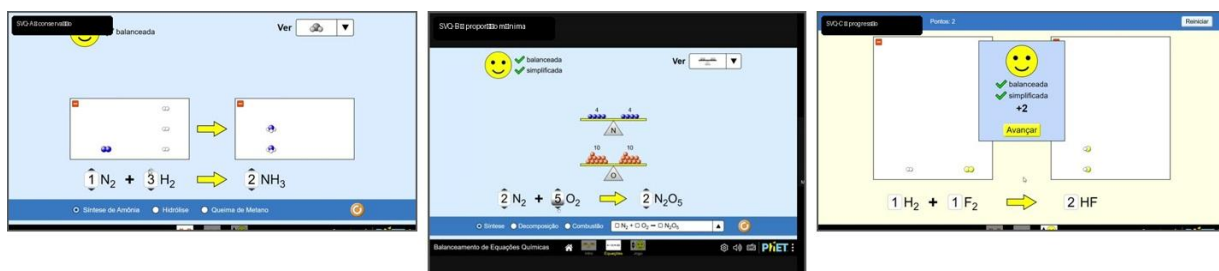
Fonte: elaboração própria a partir dos três vídeos do corpus audiovisual (2026).

5.2.9 Potencial didático-representacional do conjunto temático

O PDR integrado reside em tornar comparáveis notação, entidades, totais, equivalência proporcional e regra de progressão. A pode introduzir a conservação; B pode confrontar mínimos e múltiplos; C pode oferecer prática contingente. O potencial depende de perguntas que obriguem a explicar o que muda e o que permanece. Sem isso, o percurso pode reduzir-se a tentativa, sinal de sucesso e avanço.

A Figura 54 relaciona conservação, proporção mínima e progressão. Carpenter, Moore e Perkins (2016), Hamerská et al. (2024) e Palacios, Pascual e Moreno-Mediavilla (2024) convergem quanto à importância de práticas e desenho. O som pode apoiar atenção e engajamento situacional, mas não foi testado com participantes. A análise limita-se a afirmar que o objeto oferece pistas auditivas de atuação e avaliação.

Figura 54 – Potencial didático-representacional articulado entre os três módulos



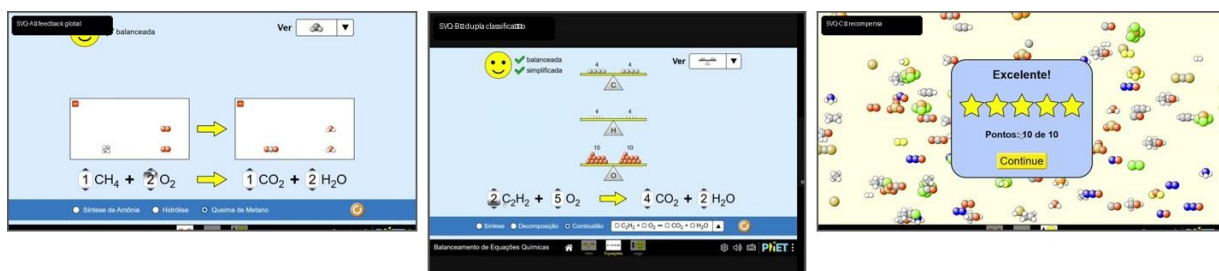
Fonte: elaboração própria a partir dos três vídeos do corpus audiovisual (2026).

5.2.10 Diálogo com a literatura e conhecimento produzido

O estudo confirma que múltiplas formas podem complementar-se e exigir mapeamento, como propõem Ainsworth (2006) e Schnotz e Bannert (2003), e amplia a discussão ao incorporar o canal sonoro com rastreabilidade temporal. O achado recente de Hamerská et al. (2024) sobre a tensão entre símbolos e partículas ajuda a interpretar por que feedback de correção não basta. A literatura de visualização e sonificação acrescenta um critério decisivo: som presente não equivale a dado sonificado.

A Figura 55 evidencia a diferença entre feedback global, dupla classificação e recompensa. Guiotto Nai Fovino et al. (2024), Enge et al. (2024) e Eramo et al. (2025) mostram que o som pode comunicar ciência quando o mapeamento é explícito e o desenho instrucional é robusto. Nos casos analisados, o conhecimento produzido é outro: A/B sonorizam principalmente a interação; C sonoriza também a avaliação. Nenhum sonoriza a conservação ou a proporção.

Figura 55 – Diálogo entre feedback do corpus e literatura audiovisual recente



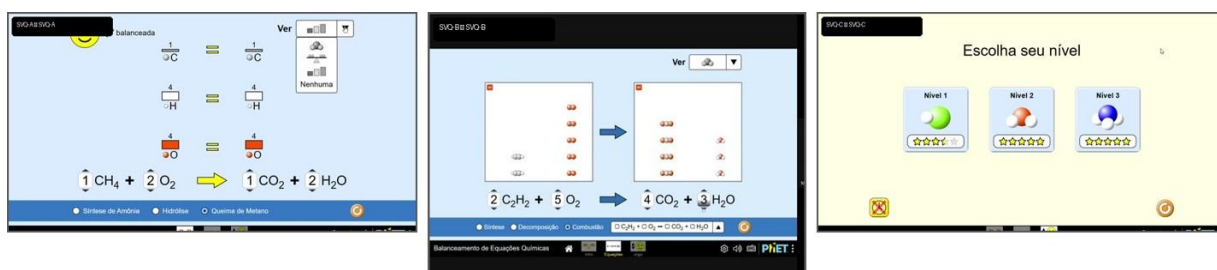
Fonte: elaboração própria a partir dos três vídeos do corpus audiovisual (2026).

5.2.11 Atendimento aos objetivos e resposta à questão de pesquisa

Os objetivos foram atendidos para os três casos em AIC, MR, VFRI, CC, DR, RT, MD, PIR, CRD e PDR. A análise localizou as formas, descreveu correspondências e transformações, comparou possibilidades e incorporou som sem criar dimensão externa ao protocolo. A questão recebe resposta: o conjunto organiza o conhecimento em torno da equação simbólica, articula quantidades por formas diagramáticas e reconfigura a atividade como exploração, classificação e avaliação.

A Figura 56 sintetiza a resposta. O som participa da organização como confirmação temporal em A/B e como marca operacional-avaliativa em C; não há evidência de representação auditiva das variáveis químicas. Em consonância com Bardin (2016), Ainsworth (2006), Kress (2010) e Enge et al. (2024), a conclusão é proporcional ao corpus. O Quadro 15 relaciona objetivos, evidências e limites; não se formulam afirmações sobre aprendizagem, motivação real ou eficácia.

Figura 56 – Síntese intercasos e resposta à questão de pesquisa



Fonte: elaboração própria a partir dos três vídeos do corpus audiovisual (2026).

Quadro 15 – Atendimento dos objetivos e limites da inferência

Objetivo analítico	Resultado sustentado	Limite
Caracterizar AIC	Arquiteturas de exploração, classificação e avaliação	Não atribuir intenção autoral não documentada
Analisar MR, VFRI e CC	Equação, partículas, balanças, barras e feedbacks	Ausência de fenômeno macroscópico e de sonificação química
Analisar DR, RT e MD	Atualizações contínuas em A/B e segmentadas em C; som sincronizado	Sincronia não prova explicação nem aprendizagem
Delimitar PIR, CRD e PDR	Possibilidades, restrições e especialização dos três módulos	Potencial não equivale a eficácia; não há dados de usuários

Fonte: elaboração própria (2026).

6 CONCLUSÃO

A questão central desta dissertação perguntou como as três simulações do conjunto Balanceamento de Equações Químicas organizam níveis e formas de representação, correspondências, transformações, temporalidades, modulações e possibilidades interativas, incluindo o canal sonoro, e quais potencialidades e limites emergem dessa organização. A resposta construída pelo corpus é que o conjunto organiza o conhecimento por uma arquitetura predominantemente simbólico-submicroscópica, quantitativa e diagramática, cujo centro de estabilidade é a equação química. Os módulos não repetem uma mesma solução: Intro institui um regime exploratório, Equações amplia e classifica o repertório, e Jogo converte a configuração simbólica em objeto de julgamento e progressão. A integração do conjunto decorre, portanto, da permanência do núcleo químico e da mudança das funções que o enquadram.

Quanto ao objetivo específico (a), a Arquitetura Imagético-Contextual mostrou uma base visual comum — equação, controles discretos, seta, entidades e indicadores — reconfigurada por escolhas de reação, bibliotecas, níveis e telas avaliativas. O som integra essa arquitetura como modo transversal: em SVQ-A e SVQ-B, predomina a confirmação temporal de operações; em SVQ-C, acrescentam-se marcas diferenciadas de erro, acerto, pontuação e encerramento. Tal presença é funcional, mas não autoriza concluir sobre motivação efetiva ou aprendizagem, porque o corpus documenta propriedades do objeto e não respostas de participantes.

Em relação ao objetivo (b), a análise de MR e VFRI identificou uma configuração assimétrica dos níveis de Johnstone (1982, 1991, 1993, 2000). O nível simbólico está presente e central nos três casos; o submicroscópico comparece por moléculas, partículas e contagens diagramáticas; o macroscópico não foi identificado como representação funcional do fenômeno químico. No interior desses níveis, partículas, balanças, barras, números, cores, rótulos e ícones diversificam a forma de apresentação, mas não possuem o mesmo estatuto epistemológico. A coocorrência oferece condições para comparação, sem garantir por si só a construção de relações, como alertam Ainsworth (2006) e Schnotz e Bannert (2003).

O objetivo (c) foi respondido pela tipologia sistematizada no item 5.2. As relações interníveis mais estáveis ligam coeficientes simbólicos ao número de entidades e às contagens de átomos, de modo que uma alteração algébrica se

propaga visualmente para o registro particulado. As balanças e barras realizam uma redescrição diagramática da igualdade, enquanto cores, mensagens e indicadores estabelecem relações metarrepresentacionais ao qualificar o estado como balanceado, simplificado, correto ou incorreto. Há ainda uma relação intranível decisiva entre diferentes vetores de coeficientes: múltiplos preservam a conservação, mas apenas a menor razão inteira satisfaz a convenção exigida para progressão no Jogo. A ausência macroscópica e a inexistência de sonificação química constituem lacunas relacionais, não meras ausências de elementos.

No objetivo (d), DR, RT e MD demonstraram que as representações se transformam segundo dois regimes temporais principais. Em SVQ-A e SVQ-B, controles produzem atualização contínua e permitem observar a conservação emergir durante a manipulação; em SVQ-C, a submissão cria uma descontinuidade entre construção e julgamento, seguida por ramificações de erro, explicação, acerto ou avanço. A modulação seleciona o que pode ser visto, comparado e validado em cada módulo. Por isso, movimento e simultaneidade não foram tomados como conteúdo em si: a análise verificou se a transformação preservava correspondências químicas e qual informação permanecia acessível antes, durante e depois da ação.

Quanto ao objetivo (e), o PIR revelou especializações complementares. SVQ-A permite explorar relações em um repertório reduzido e alternar formas auxiliares; SVQ-B combina repertório ampliado, classes de reação e contraste entre balanceamento e simplificação; SVQ-C estrutura tentativa, conferência, feedback e progressão. Nenhum módulo reúne isoladamente todas essas possibilidades, e a ordem registrada nos vídeos não foi interpretada como sequência didática necessária. O potencial interativo reside nas ações programadas e nas respostas representacionais disponíveis, não em uma aprendizagem presumida.

O objetivo (f) foi atendido pela formulação das CRD e PDR individuais e integrada. A Configuração Representacional Dominante do conjunto pode ser definida como simbólico-submicroscópica, diagramático-quantitativa e avaliativamente modulada. Seu Potencial Didático-Representacional reside em possibilitar a comparação entre notação, entidades, totais elementares, equivalência proporcional e razão mínima, desde que uma tarefa pedagógica solicite explicações sobre o que muda, o que permanece e por que diferentes vetores podem conservar os mesmos átomos. Sem essa mediação, os mesmos recursos podem sustentar apenas tentativa, reconhecimento perceptivo de sucesso e avanço de tela.

A participação sonora precisa ser situada dentro dessa resposta, e não como um nível químico adicional. O áudio confirma a efetivação de ações em SVQ-A e SVQ-B e diferencia mais claramente estados avaliativos em SVQ-C, mas não apresenta mapeamento sistemático entre parâmetros acústicos e identidade elementar, desigualdade, conservação ou proporcionalidade. Em termos de Kress (2010) e Jewitt, Bezemer e O'Halloran (2016), ele é um modo significativo no evento multimodal; em termos de Enge et al. (2024), não configura sonificação das variáveis químicas. A contribuição analítica consiste justamente em preservar essa diferença entre feedback sonoro de interface e representação sonora de dados.

A contribuição empírica e a contribuição metodológica devem, contudo, permanecer distintas. A primeira é a descrição e interpretação das três simulações: sua arquitetura, tipologia relacional, transformações, possibilidades e limites. A segunda é o modelo que articula AIC, MR, VFRI, CC, DR, RT, MD, PIR, CRD e PDR, apoiado por protocolo audiovisual, timecodes, figuras, quadros e apêndices. A aplicação não prova uma validade universal do modelo; demonstra sua pertinência analítica para este corpus, ao permitir diferenciar presenças, correspondências, lacunas e funções modais sem extrapolar para efeitos educacionais.

Há, nesse sentido, uma validação recíproca delimitada. O modelo tornou visíveis diferenças que uma listagem de recursos não revelaria — especialmente a distinção entre coocorrência e correspondência, entre conservação e simplificação e entre áudio interacional e sonificação química. Inversamente, o corpus exigiu o refinamento do modelo ao incorporar o som como descritor transversal, colapsar repetições funcionalmente equivalentes e tratar o tempo apenas como localizador global e como relação interna ao evento. Essa reciprocidade corresponde a um processo de adequação e consistência interpretativa, não a validação estatística, psicométrica ou experimental.

O uso de inteligência artificial integrou exclusivamente o apoio preliminar à localização, organização e sistematização das evidências. A aceitação, correção, fusão ou rejeição de categorias, a seleção de frames e a interpretação teórica permanecem sob apreciação e validação do pesquisador, conforme o protocolo apresentado no Apêndice F. Essa delimitação preserva a responsabilidade autoral e impede que regularidades técnicas sejam tratadas automaticamente como resultados substantivos.

Os limites do estudo incluem o recorte em um único conjunto temático, a amostra intencional de estados e ações, a não exaustão do banco aleatorizado do Jogo e a ausência de dados de estudantes e professores. Consequentemente, não se conclui sobre aprendizagem, usabilidade, motivação, emoção ou eficácia. Estudos posteriores poderão testar a transferibilidade do modelo em outros temas, versões e idiomas, realizar validação interavaliadores das categorias e, em desenho empírico distinto, investigar como usuários constroem ou deixam de construir as relações simbólico–submicroscópicas identificadas. A contribuição central da dissertação é oferecer uma resposta teoricamente fundamentada e empiricamente rastreável sobre como o conhecimento químico é organizado no objeto, mantendo explícita a distância entre potencial representacional e efeito pedagógico.

REFERÊNCIAS

- AINSWORTH, S. The functions of multiple representations. **Computers & Education**, Oxford, v. 33, n. 2-3, p. 131-152, 1999. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0360-1315\(99\)00029-9](https://doi.org/10.1016/S0360-1315(99)00029-9). Acesso em: 3 set. 2026.
- AINSWORTH, S. DeFT: a conceptual framework for considering learning with multiple representations. **Learning and Instruction**, Oxford, v. 16, n. 3, p. 183-198, 2006. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.learninstruc.2006.03.001>. Acesso em: 3 set. 2026.
- BARDIN, L. **Análise de conteúdo**. São Paulo: Edições 70, 2016.
- BYUKUSENGE, C.; NSANGANWIMANA, F.; TARMO, A. P. Effectiveness of virtual laboratories in teaching and learning biology: a review of literature. **International Journal of Learning, Teaching and Educational Research**, v. 21, n. 6, p. 1-17, 2022. DOI: <https://doi.org/10.26803/ijlter.21.6.1>. Acesso em: 3 set. 2026.
- CAMPOS MERA, G.; BENARROCH BENARROCH, A. Laboratorios virtuales para la enseñanza de las ciencias: una revisión sistemática. **Enseñanza de las Ciencias**, v. 42, n. 2, p. 109-129, 2024. DOI: <https://doi.org/10.5565/rev/ensciencias.6040>. Acesso em: 3 set. 2026.
- CARPENTER, Y.; MOORE, E. B.; PERKINS, K. K. Using an interactive simulation to support development of expert practices for balancing chemical equations. **Journal of Chemical Education**, Washington, DC, v. 93, n. 6, p. 1150-1151, 2016. DOI: <https://doi.org/10.1021/acs.jchemed.5b00546>. Acesso em: 3 set. 2026.
- CARVALHO, P. S.; MARÇAL DE BARROS FILHO, E.; LIMA, L. Utilização de softwares de simulações computacionais para o ensino de estequiometria: uma revisão sistemática. **Revista Educar Mais**, v. 7, p. 414-426, 2023. DOI: <https://doi.org/10.15536/reducarmais.7.2023.3118>. Acesso em: 3 set. 2026.
- CHAN, P.; VAN GERVEN, T.; DUBOIS, J.-L.; BERNAERTS, K. Virtual chemical laboratories: a systematic literature review of research, technologies and instructional design. **Computers and Education Open**, v. 2, art. 100053, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.caeo.2021.100053>. Acesso em: 3 set. 2026.
- DARMAN, D. R.; SUHANDI, A.; KANIAWATI, I.; SAMSUDIN, A.; WIBOWO, F. C. Virtual laboratory in physics education: a systematic review. **AIP Conference Proceedings**, v. 3116, art. 040008, 2024. DOI: <https://doi.org/10.1063/5.0210640>. Acesso em: 3 set. 2026.
- DURUKAN, A.; ARTUN, H.; TEMUR, A. Virtual reality in science education: a descriptive review. **Journal of Science Learning**, v. 3, n. 3, p. 132-142, 2020. DOI: <https://doi.org/10.17509/jsl.v3i3.21906>. Acesso em: 3 set. 2026.
- ENGE, K. et al. Open your ears and take a look: a state-of-the-art report on the integration of sonification and visualization. **Computer Graphics Forum**, v. 43, n. 3, e15114, 2024. DOI: <https://doi.org/10.1111/cgf.15114>. Acesso em: 3 set. 2026.

ERAMO, G.; PASTORE, S.; DE TULLIO, M.; ROSSINI, V.; MONNO, A.; MESTO, E. The sound of science: a sonification learning experience in an Italian secondary school. **Frontiers in Education**, v. 9, art. 1502396, 2025. DOI: <https://doi.org/10.3389/educ.2024.1502396>. Acesso em: 3 set. 2026.

FADDA, D.; SALIS, C.; VIVANET, G. About the efficacy of virtual and remote laboratories in STEM education in secondary school: a second-order systematic review. **Journal of Educational, Cultural and Psychological Studies**, n. 26, p. 51-72, 2022. DOI: <https://doi.org/10.7358/ecps-2022-026-fadd>. Acesso em: 3 set. 2026.

FAULCONER, E. K.; GRUSS, A. B. A review to weigh the pros and cons of online, remote, and distance science laboratory experiences. **The International Review of Research in Open and Distributed Learning**, v. 19, n. 2, 2018. DOI: <https://doi.org/10.19173/irrodl.v19i2.3386>. Acesso em: 3 set. 2026.

GABEL, D. L. Use of the particulate nature of matter in developing conceptual understanding. **Journal of Chemical Education**, v. 70, n. 3, p. 193-194, 1993. DOI: <https://doi.org/10.1021/ed070p193>. Acesso em: 3 set. 2026.

GIL, A. C. **Como elaborar projetos de pesquisa**. 7. ed. Barueri: Atlas, 2022.

GILBERT, J. K.; TREAGUST, D. F. (org.). **Multiple representations in chemical education**. Dordrecht: Springer, 2009. DOI: <https://doi.org/10.1007/978-1-4020-8872-8>. Acesso em: 3 set. 2026.

GUIOTTO NAI FOVINO, L. et al. Evaluating the effectiveness of sonification in science education using Edukoi. **Personal and Ubiquitous Computing**, v. 28, p. 693-711, 2024. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00779-024-01809-5>. Acesso em: 3 set. 2026.

HAMERSKÁ, L.; MATĚCHA, T.; TÓTHOVÁ, M.; RUSEK, M. Between symbols and particles: investigating the complexity of learning chemical equations. **Education Sciences**, v. 14, n. 6, art. 570, 2024. DOI: <https://doi.org/10.3390/educsci14060570>. Acesso em: 3 set. 2026.

HERADIO, R.; DE LA TORRE, L.; GALÁN, D.; CABRERIZO, F. J.; HERRERA-VIEDMA, E.; DORMIDO, S. Virtual and remote labs in education: a bibliometric analysis. **Computers & Education**, v. 98, p. 14-38, 2016. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.compedu.2016.03.010>. Acesso em: 3 set. 2026.

JEWITT, C.; BEZEMER, J.; O'HALLORAN, K. **Introducing multimodality**. London: Routledge, 2016.

JOHNSTONE, A. H. Macro- and micro-chemistry. **School Science Review**, v. 64, n. 227, p. 377-379, 1982.

JOHNSTONE, A. H. Why is science difficult to learn? Things are seldom what they seem. **Journal of Computer Assisted Learning**, v. 7, n. 2, p. 75-83, 1991. DOI: <https://doi.org/10.1111/j.1365-2729.1991.tb00230.x>. Acesso em: 3 set. 2026.

JOHNSTONE, A. H. The development of chemistry teaching: a changing response to changing demand. **Journal of Chemical Education**, v. 70, n. 9, p. 701-705, 1993. DOI: <https://doi.org/10.1021/ed070p701>. Acesso em: 3 set. 2026.

JOHNSTONE, A. H. Teaching of chemistry: logical or psychological? **Chemistry Education Research and Practice**, v. 1, n. 1, p. 9-15, 2000. DOI: <https://doi.org/10.1039/A9RP90001B>. Acesso em: 3 set. 2026.

KAVANAGH, S.; LUXTON-REILLY, A.; WUENSCH, B.; PLIMMER, B. A systematic review of virtual reality in education. **Themes in Science and Technology Education**, v. 10, n. 2, p. 85-119, 2017. Disponível em: <https://eric.ed.gov/?id=EJ1165633>. Acesso em: 3 set. 2026.

KRESS, G. **Multimodality: a social semiotic approach to contemporary communication**. London: Routledge, 2010.

KRIPPENDORFF, K. **Content analysis: an introduction to its methodology**. 4. ed. Thousand Oaks: Sage, 2018.

LOWE, R. K. Animation and learning: selective processing of information in dynamic graphics. **Learning and Instruction**, v. 13, n. 2, p. 157-176, 2003. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0959-4752\(02\)00018-X](https://doi.org/10.1016/S0959-4752(02)00018-X). Acesso em: 3 set. 2026.

LUI, A. L. C.; NOT, C.; WONG, G. K. W. Theory-based learning design with immersive virtual reality in science education: a systematic review. **Journal of Science Education and Technology**, v. 32, n. 3, p. 390-432, 2023. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10956-023-10035-2>. Acesso em: 3 set. 2026.

MA, J.; NICKERSON, J. V. Hands-on, simulated, and remote laboratories: a comparative literature review. **ACM Computing Surveys**, v. 38, n. 3, art. 7, 2006. DOI: <https://doi.org/10.1145/1132960.1132961>. Acesso em: 3 set. 2026.

MEDEIROS JR., R. N.; NAIA, M. D.; LOPES, J. B. Simulações interativas do PhET nas práticas de ensino da Física: uma meta-análise. **Revista Brasileira de Ensino de Física**, v. 46, e20240186, 2024. DOI: <https://doi.org/10.1590/1806-9126-RBEF-2024-0186>. Acesso em: 3 set. 2026.

MERCADO, J. C.; PICARDAL, J. P. Virtual laboratory simulations in biotechnology: a systematic review. **Science Education International**, v. 34, n. 1, p. 52-57, 2023. DOI: <https://doi.org/10.33828/sei.v34.i1.6>. Acesso em: 3 set. 2026.

MILES, M. B.; HUBERMAN, A. M.; SALDAÑA, J. **Qualitative data analysis: a methods sourcebook**. 3. ed. Thousand Oaks: Sage, 2014.

MINAYO, M. C. S. **O desafio do conhecimento: pesquisa qualitativa em saúde**. 14. ed. São Paulo: Hucitec, 2014.

MORTIMER, E. F.; MACHADO, A. H.; ROMANELLI, L. I. A proposta curricular de química do Estado de Minas Gerais: fundamentos e pressupostos. **Química Nova**, v. 23, n. 2, p. 273-283, 2000. DOI: <https://doi.org/10.1590/S0100-40422000000200022>. Acesso em: 3 set. 2026.

PAGEL, C. H. **As potencialidades pedagógicas presentes em laboratórios virtuais para o Ensino de Cinemática**. 2023. Dissertação (Mestrado em Educação em Ciências) — Universidade Federal do Rio Grande, Rio Grande, 2023. Disponível em: <https://repositorio.furg.br/items/b3c54d21-5374-44e4-b2c6-da606cf5831f>. Acesso em: 3 set. 2026.

PALACIOS, A.; PASCUAL, V.; MORENO-MEDIAVILLA, D. Methodological design in the use of virtual simulations in chemistry: a systematic review. **Journal of Technology and Science Education**, v. 14, n. 3, p. 701-719, 2024. DOI: <https://doi.org/10.3926/jotse.2357>. Acesso em: 3 set. 2026.

PELLAS, N.; DENGEL, A.; CHRISTOPOULOS, A. A scoping review of immersive virtual reality in STEM education. **IEEE Transactions on Learning Technologies**, v. 13, n. 4, p. 748-761, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1109/TLT.2020.3019405>. Acesso em: 3 set. 2026.

PHET INTERACTIVE SIMULATIONS. **Balancing chemical equations**. Boulder: University of Colorado Boulder, [s. d.]. Disponível em: https://phet.colorado.edu/pt_BR/simulations/balancing-chemical-equations. Acesso em: 3 set. 2026.

POTKONJAK, V.; GARDNER, M.; CALLAGHAN, V.; MATTILA, P.; GÜTL, C.; PETROVIĆ, V. M.; JOVANOVIĆ, K. Virtual laboratories for education in science, technology, and engineering: a review. **Computers & Education**, v. 95, p. 309-327, 2016. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.compedu.2016.02.002>. Acesso em: 3 set. 2026.

RAMAN, R.; ACHUTHAN, K.; NAIR, V. K.; NEDUNGADI, P. Virtual laboratories: a historical review and bibliometric analysis of the past three decades. **Education and Information Technologies**, v. 27, p. 11055-11087, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10639-022-11058-9>. Acesso em: 3 set. 2026.

REEVES, S. M.; CRIPPEN, K. J. Virtual laboratories in undergraduate science and engineering courses: a systematic review, 2009-2019. **Journal of Science Education and Technology**, v. 30, n. 1, p. 16-30, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10956-020-09866-0>. Acesso em: 3 set. 2026.

ROSLI, R.; ISHAK, N. A. Integration of virtual labs in science education: a systematic literature review. **Jurnal Pendidikan Sains dan Matematik Malaysia**, v. 14, n. 1, p. 81-103, 2024. DOI: <https://doi.org/10.37134/jpsmm.vol14.1.8.2024>. Acesso em: 3 set. 2026.

RUTTEN, N.; VAN JOOLINGEN, W. R.; VAN DER VEEN, J. T. The learning effects of computer simulations in science education. **Computers & Education**, v. 58, n. 1, p. 136-153, 2012. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.compedu.2011.07.017>. Acesso em: 3 set. 2026.

SANTOS, A. C.; FERNANDES, F. S.; SILVA, J. B. O uso de laboratórios online no ensino de ciências: uma revisão sistemática da literatura. **ScientiaTec**, v. 4, n. 1, p. 143-159, 2017. DOI: <https://doi.org/10.35819/scientiatec.v4i1.2196>. Acesso em: 3 set. 2026.

SCHNOTZ, W.; BANNERT, M. Construction and interference in learning from multiple representation. **Learning and Instruction**, v. 13, n. 2, p. 141-156, 2003. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0959-4752\(02\)00017-8](https://doi.org/10.1016/S0959-4752(02)00017-8). Acesso em: 3 set. 2026.

SILVA, C. M. S.; ROMEU, M. C.; BARROSO, M. C. S. Uso de simulações computacionais em aulas de Física: uma revisão sistemática de literatura. **Revista Insignare Scientia**, v. 5, n. 3, p. 243-263, 2022. DOI: <https://doi.org/10.36661/2595-4520.2022v5n3.12664>. Acesso em: 3 set. 2026.

SILVA, I. P.; MERCADO, L. P. L. Laboratórios de ensino de Física mediados por interfaces digitais. **EDUCA: Revista Multidisciplinar em Educação**, v. 7, n. 17, p. 3-22, 2020. DOI: <https://doi.org/10.26568/2359-2087.2020.4175>. Acesso em: 3 set. 2026.

SOUZA, B. S. **O uso do simulador PhET no ensino de Química: uma revisão sistemática**. 2024. Monografia (Especialização em Tecnologias Digitais Aplicadas à Educação) — Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Sertão Pernambucano, Petrolina, 2024. Disponível em: <https://releia.ifsertao-pe.edu.br/jspui/handle/123456789/1395>. Acesso em: 3 set. 2026.

TALANQUER, V. Macro, submicro, and symbolic: the many faces of the chemistry “triplet”. **International Journal of Science Education**, v. 33, n. 2, p. 179-195, 2011. DOI: <https://doi.org/10.1080/09500690903386435>. Acesso em: 3 set. 2026.

TIMÓTEO, D. J. A.; OLIVEIRA, M. J. S.; CANTO FILHO, A. B.; LIMA, J. V.; TAROUÇO, L. M. R. Práticas pedagógicas auxiliadas por laboratórios virtuais no processo ensino-aprendizagem de Física: uma revisão sistemática da literatura. **Research, Society and Development**, v. 11, n. 15, e426111537280, 2022. DOI: <https://doi.org/10.33448/rsd-v11i15.37280>. Acesso em: 3 set. 2026.

TREAGUST, D. F.; CHITTLEBOROUGH, G.; MAMIALA, T. L. The role of submicroscopic and symbolic representations in chemical explanations. **International Journal of Science Education**, v. 25, n. 11, p. 1353-1368, 2003. DOI: <https://doi.org/10.1080/0950069032000070306>. Acesso em: 3 set. 2026.

YIN, R. K. **Case study research and applications: design and methods**. 6. ed. Thousand Oaks: Sage, 2018.

APÊNDICES

APÊNDICE A — PROTOCOLO E SÍNTESE DA CODIFICAÇÃO DO SVQ-A

Vídeo SVQ-A: duração de 00:10:45,146. Fonte sonora: áudio interno do simulador, conforme informação do pesquisador. A triagem técnica apenas localizou candidatos; a unidade interpretativa foi a categoria de ação/evento. As repetições foram utilizadas para confirmar a estabilidade da relação entre clique, efeito em tela e som. A classificação funcional dependeu do alinhamento com quadros antes/depois.

Quadro 16 – Síntese da codificação sonora do SVQ-A

Categoria de ação/evento	Presença	Função/limite
Ajuste de coeficiente	som presente e recorrente	confirmação da efetivação do incremento/decremento
Seleção de reação	som presente	confirmação de escolha e mudança do objeto químico
Seleção em “Ver”	som presente	confirmação de mudança de forma representacional
Reinicialização/navegação	som presente nos eventos registrados	marca retorno ou transição
Estado balanceado	surge após clique já sonorizado	não foi comprovado código sonoro exclusivo de balanceamento

Fonte: elaboração própria (2026).

APÊNDICE B — PROTOCOLO E SÍNTESE DA CODIFICAÇÃO DO SVQ-B

Arquivo integral: 00:00:00–00:25:26,125. Aplicaram-se os mesmos parâmetros técnicos e as mesmas regras de interpretação do SVQ-A. A área externa à interface do simulador foi desconsiderada nas figuras e na atribuição funcional.

Quadro 17 – Síntese da codificação sonora do SVQ-B

Categoria de ação/evento	Presença	Função/limite
Ajuste de coeficiente	som presente e recorrente	confirmação operacional
Seleção de classe	som presente nos eventos registrados	confirmação de mudança taxonômica
Seleção de equação	som presente e recorrente	confirmação de substituição do objeto
Seleção em “Ver”	som presente e recorrente	confirmação de mudança de forma
Reinicialização	som presente nos eventos registrados	marca retorno ao estado inicial
Balanceamento/simplificação	aparecem após operação já sonorizada	sem código sonoro autônomo comprovado para cada propriedade

Fonte: elaboração própria (2026).

APÊNDICE C — PROTOCOLO E SÍNTESE DA CODIFICAÇÃO DO SVQ-C

Vídeo SVQ-C: duração de 00:16:53,360. Aplicaram-se os mesmos parâmetros técnicos. Feedbacks de erro, acerto e encerramento foram classificados somente quando textos, rostos, estrelas ou transições visuais permitiram a atribuição.

Quadro 18 – Síntese da codificação sonora do SVQ-C

Categoria de ação/evento	Presença	Função/limite
Seleção de nível	som presente	confirmação de entrada no nível
Ajuste de coeficiente	som presente e recorrente	confirmação operacional
Conferir	som presente	marca submissão e passagem ao julgamento
Erro	som diferenciado com feedback visual negativo	avaliação negativa; não explica qual elemento está desigual
Acerto	som diferenciado com feedback visual positivo	avaliação positiva; não codifica a razão
Tentar de novo/Explique-me	som presente nos ramos registrados	orientação do percurso
Avançar	som presente	progressão para novo desafio
Pontuação	som saliente com estrelas/placar	recompensa e totalização; não comprova motivação
Encerramento	sequência prolongada em tela final	fechamento da série; não representa conteúdo químico
Retornar aos níveis/reiniciar	som de transição presente	reorientação do percurso; sem conteúdo químico

Fonte: elaboração própria (2026).

APÊNDICE D — CÓDIGO DE INTERPRETAÇÃO AUDIOVISUAL INTERCASOS

O quadro distingue forma acústica, função multimodal e limite. A forma decorre de propriedades do sinal; a função decorre do alinhamento com o evento visual; o limite impede transformar coocorrência em efeito pedagógico.

Quadro 19 – Código de interpretação dos eventos audiovisuais

Código	Critério observável	Função inferida	Limite
Confirmação de atuação	impulso curto após ajuste ou comando	marca que o sistema registrou a ação	não informa o conteúdo da mudança
Sequência de manipulação	vários impulsos agrupados	segmenta uma série de ajustes	não equivale a som contínuo único
Feedback avaliativo	sinal/ sequência junto a erro ou acerto	reforça valência e mudança de estado	não explica a desigualdade ou a razão
Progressão/recompensa	sequência prolongada junto a pontos/estrelas	marca fechamento e continuidade	não comprova motivação ou aprendizagem
Sonificação química	mapeamento sistemático variável–som	não identificada no corpus	áudio não permite reconstruir a estequiometria isoladamente

Fonte: elaboração própria com base no corpus e em Enge et al. (2024) (2026).

APÊNDICE E — MATRIZ CONSOLIDADA DE CATEGORIAS DE AÇÃO/EVENTO E FUNÇÃO SONORA

A matriz consolida as categorias efetivamente verificadas: cinco no SVQ-A, sete no SVQ-B e dez no SVQ-C. Todos os cliques equivalentes que geraram a mesma resposta foram colapsados e não constituíram novas unidades substantivas; as repetições aparecem apenas quando necessárias para demonstrar estabilidade. Mudanças de função, estado ou resposta justificaram variantes categoriais. Os timecodes servem exclusivamente à localização e à auditoria; a ordem das linhas e dos momentos recuperados não representa a sequência da gravação, e uma mesma categoria pode reunir evidências não consecutivas. “Mesmo sinal operacional” significa que a forma sonora não permite distinguir semanticamente as ações sem apoio visual.

Quadro 20 – Matriz categorial completa da função sonora

Cas o	Categoria	Timecodes representativos	Efeito em tela	Relação sonora	Função	Limite
A	Ajustar coeficiente	00:00:10,80; 00:03:49,19; 00:06:48,51	número e entidades mudam	presente; sinal operacional recorrente	confirmar efetivação do clique	não indica direção nem correção
A	Selecionar reação	00:03:55–00:04:05; 00:07:25– 00:07:35	equação e espécies mudam	presente	confirmar escolha	não classifica a reação
A	Trocar “Ver”	00:02:23,970; 00:06:05,210; 00:10:22,620	forma auxiliar muda	presente; sinal operacional	confirmar mudança de lente	não comunica a forma escolhida
A	Reiniciar/navegar	eventos de retorno e 00:10:45,146	estado inicial ou novo módulo	presente	marcar retorno/transição	não possui conteúdo químico
A	Atingir balanceamento	00:03:49,19; 00:06:48,51; 00:10:16,05	sorriso, seta e “balanceada”	som coincide com o último clique	confirma operação	sem sinal exclusivo de acerto

Cas o	Categoria	Timecodes representativos	Efeito em tela	Relação sonora	Função	Limite
B	Ajustar coeficiente	00:03:17,96; 00:05:45,59; 00:23:58,80	número e representações mudam	presente; recorrente	confirmar operação	não distingue incremento, redução ou resultado
B	Selecionar classe	eventos nas faixas Síntese/Decomposição/Combustão	biblioteca muda	presente nos eventos registrados	confirmar seleção	não comunica taxonomia
B	Selecionar equação	00:04:22,120–00:04:22,240; 00:07:48,880–00:07:49,000; 00:09:18,450–00:09:18,570	equação e espécies mudam	presente; recorrente	confirmar nova equação	não explica a reação
B	Trocar “Ver”	00:00:14,57; 00:02:16,74; 00:10:23,85; 00:16:43,34	partículas/balanças/barras/Nenhuma	presente; recorrente	confirmar mudança representacional	não substitui a informação visual
B	Reiniciar	eventos de retorno registrados	estado inicial reaparece	presente	marcar retorno	sem conteúdo químico
B	Atingir balanceamento	00:03:19,61; 00:10:39,99; 00:17:42,32	feedback “balanceada”	som do ajuste antecedente	confirmar operação	sem código autônomo de balanceamento
B	Atingir simplificação	00:05:45,64; 00:23:58,85	feedback “simplificada”	coincide com operação	confirmar operação	não diferencia propriedade pelo som isolado
C	Selecionar nível	rel. 00:00:03,31; 00:04:35,53; 00:10:58,07	tela de rodada aparece	presente	confirmar entrada	não comunica dificuldade química

Cas o	Categoria	Timecodes representativos	Efeito em tela	Relação sonora	Função	Limite
C	Ajustar coeficiente	rel. 00:02:20,20; 00:04:40,53; 00:09:11,45	número e partículas mudam	presente; sinal operacional recorrente	confirmar operação	não indica correção
C	Conferir	rel. 00:00:39,704; 00:01:41,634; 00:09:47,314	painel avaliativo é aberto	sinal avaliativo inicia no episódio de submissão/respo sta	marcar passagem ao julgamento	não se isola som autônomo de submissão da valência subsequente
C	Erro/não balanceada	rel. 00:01:41,63; 00:03:36,67	rosto triste, marca vermelha e opções	sinal avaliativo diferenciado	feedback negativo	não localiza o elemento desigual
C	Acerto balanceada/simplific ada	rel. 00:00:39,70; 00:03:00,53; 00:09:47,31	rosto sorridente, marcas e pontos	sinal positivo diferenciado	feedback positivo	não codifica a razão estequiométrica
C	Tentar de novo/Explique-me	ramos posteriores aos erros registrados	retorno ou explicação	presente nos ramos observados	orientar correção	não comprova compreensão
C	Avançar	rel. 00:00:45,73; 00:02:13,48; 00:06:02,62	novo desafio aparece	presente	progressão	não representa transformaçã o química
C	Pontuar	rel. 00:04:24,364– 00:04:25,804	estrelas e total parcial	sinal saliente de totalização	recompensa/pontuaç ão	analogia de jogo; não prova motivação

Cas o	Categoria	Timecodes representativos	Efeito em tela	Relação sonora	Função	Limite
C	Encerrar série	rel. 00:09:49,774– 00:09:53,984	tela “Excelente!”, estrelas e pontos	sequência sonora prolongada	fechamento/recompe nsa	não representa a conservação nem comprova aprendizage m
C	Retornar aos níveis/reiniciar	rel. 00:16:43,694– 00:16:49,584	tela de níveis reaparece	sequência sonora de transição	encerrar e reorientar o percurso	sem conteúdo químico

Fonte: elaboração própria a partir da comparação das repetições deliberadas do corpus audiovisual (2026).

APÊNDICE F — PROTOCOLO MESTRE DE ANÁLISE PRELIMINAR DE VÍDEOS DE SIMULADORES VIRTUAIS E SISTEMATIZAÇÃO DE EVIDÊNCIAS

Condição de uso: instrumento de apoio preliminar sujeito à apreciação, correção e validação do pesquisador.

1 FINALIDADE, ESCOPO E RESULTADO AUTORIZADO

Este protocolo orienta exclusivamente a análise preliminar assistida por inteligência artificial de registros audiovisuais de simuladores virtuais, a organização rastreável das evidências, a proposição de categorias provisórias, a sistematização de quadros, tabelas e gráficos descritivos e a seleção preliminar de frames representativos. Seu produto é um conjunto de materiais candidatos à apreciação humana; não é uma análise final, não constitui validação metodológica e não autoriza a redação autônoma de resultados, discussão, conclusão, resumo, abstract ou qualquer outra parte da dissertação.

O protocolo foi concebido para preservar a cadeia arquivo → caso → evento → evidência audiovisual → categoria provisória → decisão do pesquisador. A ferramenta pode localizar, descrever, ordenar e comparar candidatos, mas a decisão de aceitar, rejeitar, corrigir, fundir ou desdobrar uma categoria pertence ao pesquisador. Somente o banco expressamente validado pelo pesquisador pode ser tratado como material analítico da pesquisa.

No estudo que originou este instrumento, a execução computacional foi realizada no ChatGPT Pro, com o modelo ChatGPT 5.6 Sol, esforço de raciocínio configurado como “extra alto” e modo Work. Essa informação identifica o ambiente de processamento empregado; não representa garantia de determinismo ou de reprodução idêntica em versões futuras. Toda reaplicação deve registrar data, plano, modelo, nível de esforço, modo de execução e alterações do protocolo.

Quadro 21 – Responsabilidades da ferramenta e do pesquisador

Etapa	Apoio admitido da IA	Decisão indelegável do pesquisador
Triagem	Localizar candidatos, extrair metadados e sugerir eventos.	Confirmar integridade, identidade do vídeo e pertinência do candidato.
Descrição	Produzir descrição literal preliminar de ações, estados, imagens e sons.	Conferir o arquivo original e corrigir omissões, atribuições e vocabulário.
Categorização	Propor agrupamentos e códigos provisórios segundo definições fornecidas.	Aplicar as regras decisórias e aprovar, rejeitar, fundir ou desdobrar códigos.
Sistematização	Montar matrizes, quadros, tabelas e gráficos candidatos.	Validar base, denominadores, comparabilidade, títulos, notas e interpretação permitida.
Frames	Localizar e extrair imagens candidatas em timecodes representativos.	Selecionar a imagem final e confirmar que ela sustenta a afirmação associada.
Interpretação	Sinalizar padrões e hipóteses de leitura, sempre como provisórios.	Realizar a interpretação científica final e assumir sua responsabilidade autoral.

Fonte: elaboração própria (2026).

A distribuição de responsabilidades sintetizada no Quadro 21 é obrigatória em todas as execuções deste protocolo.

2 MATERIAIS DE ENTRADA E REGRA DE BLOQUEIO

Antes do processamento, devem ser disponibilizados e individualizados:

- arquivos de vídeo originais, sem recompressão desnecessária e com a faixa de áudio preservada;
- identificação inequívoca dos três vídeos como SVQ-A/Intro, SVQ-B/Equações e SVQ-C/Jogo;
- duração e timecode próprio de cada vídeo;
- versão vigente da metodologia, com unidades de registro, dimensões, regras decisórias e limites inferenciais;
- nomenclatura oficial dos casos, telas, módulos, categorias e arquivos;
- informação sobre a origem do áudio, a existência ou não de fala humana e eventuais interferências;

- critérios para repetição, equivalência funcional, saturação e seleção de frames;
- local destinado ao registro das decisões de validação do pesquisador.

A execução deve ser interrompida no caso de arquivo ausente, truncado, ilegível, inaudível quando o som for variável relevante, caso não identificável, incompatibilidade entre vídeo e metodologia ou impossibilidade de separar uma fonte sonora relevante. A ferramenta deve descrever o impedimento e não completar lacunas por analogia, probabilidade, conhecimento geral do simulador ou conteúdo de outro caso.

Quadro 22 – Inventário mínimo de entrada e controle técnico

Campo	Registro obrigatório	Validação
Identidade	nome do arquivo, código do caso, versão e origem	correspondência confirmada pelo pesquisador
Vídeo	duração, resolução, codec, taxa de quadros e integridade	reprodução integral ou inspeção técnica suficiente
Áudio	codec, canais, taxa de amostragem, continuidade e fonte declarada	escuta e confronto com eventos visuais
Localização	duração e timecode próprio de cada vídeo	evento conferido no vídeo correspondente
Metodologia	versão, dimensões e regras decisórias	versão aprovada pelo pesquisador
Execução IA	data, ChatGPT Pro, ChatGPT 5.6 Sol, esforço extra alto, modo Work	registro mantido no log da pesquisa

Fonte: elaboração própria (2026).

O inventário do Quadro 22 deve ser concluído antes da localização de eventos; campos desconhecidos são registrados como não informados, nunca presumidos.

3 UNIDADES, INVARIANTES E REGRAS DE CONTAGEM

Cada simulador funcional corresponde a um vídeo e constitui um caso: SVQ-A/Intro, SVQ-B/Equações e SVQ-C/Jogo. O vídeo é unidade de proveniência e localização; o simulador é unidade de análise; a categoria de ação ou evento é unidade de sistematização funcional. Um frame é evidência estática derivada e não substitui o evento audiovisual integral.

- Timecodes são endereços de localização e auditoria. A ordem global dos cliques ou dos campos acessados não indica preferência, importância, dificuldade, progressão conceitual ou hierarquia de resultados.
- A temporalidade analítica relevante é a relação interna ao evento: estado anterior → ação → resposta audiovisual → estado resultante. Evidências não consecutivas podem integrar a mesma categoria quando forem funcionalmente equivalentes.
- Cliques repetidos que, em condição comparável, produzem a mesma resposta visual e sonora são colapsados em uma única categoria. A repetição documenta estabilidade, mas não aumenta a contagem substantiva.
- Uma variante somente é aberta quando muda a função, o estado do sistema, a resposta audiovisual, a fonte sonora relevante ou o limite interpretativo.
- Contagens descrevem diversidade ou cobertura de categorias validadas, não qualidade didática, aprendizagem, motivação, desempenho ou eficácia.
- Nenhuma categoria pode ser criada fora das unidades e dimensões previstas na metodologia vigente.

4 FLUXO OPERACIONAL DA ANÁLISE PRELIMINAR

A execução é organizada em ciclos com portas de validação. A ferramenta não deve avançar de uma fase para a seguinte quando o pesquisador rejeitar o inventário, a segmentação, as definições operacionais ou a suficiência das evidências. O Quadro seguinte apresenta o fluxo mínimo.

Quadro 23 – Fases, produtos provisórios e portas de validação

Fase	Produto preliminar	Porta de validação humana
0. Preparação	inventário dos três vídeos e log de execução	aprovação da identidade e integridade do corpus
1. Localização	candidatos de evento em cada vídeo	confirmação dos eventos e descarte de transições irrelevantes
2. Descrição	estado, ação, resposta visual, som e estado resultante	conferência literal no trecho original

Fase	Produto preliminar	Porta de validação humana
3. Agrupamento	categorias provisórias e equivalências entre repetições	aplicação das definições e regras de fusão/desdobramento
4. Evidenciação	timecodes e frames candidatos	aprovação da suficiência e representatividade
5. Sistematização	quadros, tabelas e gráficos descritivos candidatos	validação da base e dos limites de leitura
6. Consolidação	banco preliminar com rastreabilidade	assinatura ou registro expresso das decisões do pesquisador

Fonte: elaboração própria (2026).

As portas do Quadro 23 devem gerar um registro de decisão. A ausência de manifestação humana mantém o produto no estatuto preliminar.

5 MATRIZ DE CODIFICAÇÃO AUDIOVISUAL

Cada linha da matriz representa uma categoria funcional ou uma variante sustentada por mudança comprovável. A descrição deve separar observação e interpretação. A evidência negativa exige condições técnicas que permitam observar a ausência; quando isso não for possível, utiliza-se “inconclusivo”.

Quadro 24 – Campos obrigatórios da matriz de eventos audiovisuais

Bloco	Campos	Regra de preenchimento
Proveniência	arquivo, caso, tela/módulo, identificador	usar nomes estáveis e únicos
Localização	vídeo e timecode correspondente	usar apenas como endereço documental
Evento	estado anterior, ação, resposta audiovisual, estado resultante	descrever antes de interpretar
Visual	elementos presentes, alteração, permanência e legibilidade	distinguir interface, representação química e efeito decorativo
Som	fonte, presença/ausência/inconclusivo, descrição, sincronização e função provisória	não contar emissões repetidas como novas categorias
Codificação	unidade de registro, dimensão, categoria e justificativa	usar apenas categorias autorizadas pela metodologia
Evidência	timecodes representativos, frame(s) candidato(s) e notas técnicas	preservar vínculo com o arquivo original
Validação	estatuto, decisão humana, correção, data e justificativa	sem aprovação, manter como preliminar

Fonte: elaboração própria (2026).

Os campos do Quadro 24 formam o banco mínimo. Informações adicionais podem ser incluídas, desde que não alterem as unidades e não misturem dado observado com inferência.

6 PROTOCOLO ESPECÍFICO PARA O CANAL SONORO

O som é examinado como elemento do evento multimodal e descritor transversal das dimensões previstas, não como nova dimensão. A unidade de interesse é a categoria de ação ou evento em que o som comparece, e não a soma de cliques, impulsos acústicos ou segundos de áudio. A forma de onda e o espectrograma podem auxiliar a localização e a discriminação técnica, mas não substituem a escuta contextual nem demonstram, isoladamente, função didática.

Para cada candidato, a ferramenta deve localizar a ação e o efeito visual, escutar uma janela anterior e posterior suficiente, comparar repetições equivalentes e registrar se o som antecede, coincide ou sucede a mudança. Em seguida, propõe função provisória e limite inferencial. Quando um som de comando e um som de avaliação estiverem temporalmente acoplados e não puderem ser separados, o episódio deve permanecer integrado e a ambiguidade deve ser registrada.

Quadro 25 – Categorias funcionais provisórias para descrição do som

Função descritiva	Evidência mínima	Limite obrigatório
Confirmação operacional	som sincronizado à efetivação de comando comparável	não atribuir conteúdo químico sem mapeamento demonstrado
Feedback avaliativo	forma sonora diferenciada convergente com erro, acerto ou julgamento visual	não inferir aprendizagem, emoção ou motivação do usuário
Orientação/alerta	som associado a aviso, disponibilidade, bloqueio ou mudança de percurso	distinguir orientação funcional de mera saliência
Progressão/recompensa	som associado a avanço, pontuação, estrelas, encerramento ou retorno	tratar a analogia de jogo como hipótese de design, não efeito psicológico comprovado
Complementação	som acrescenta informação não recuperável apenas pela imagem	explicitar qual informação é acrescentada

Função descritiva	Evidência mínima	Limite obrigatório
Redundância	som repete confirmação já suficientemente visível	redundância não equivale automaticamente a inutilidade
Sem função demonstrável	emissão audível sem relação estável com evento pertinente	manter no controle técnico, sem forçar código
Inconclusivo	fonte, recorte ou associação insuficiente	solicitar verificação humana ou novo registro

Fonte: elaboração própria (2026).

As funções do Quadro 25 são descritores provisórios e somente integram o banco validado após confronto humano com o evento completo.

7 SELEÇÃO E PRODUÇÃO DE FRAMES REPRESENTATIVOS

A ferramenta deve produzir um conjunto reduzido de frames candidatos capaz de documentar o fato analisado sem converter a ilustração em decoração. O frame selecionado precisa sustentar uma afirmação identificável no texto ou no quadro de dados. Quando o fenômeno for uma mudança, um único frame final pode ser insuficiente; devem ser propostos um par antes/depois ou uma composição claramente identificada. Quando a evidência central for sonora, a imagem deve ser acompanhada de timecode e descrição do som, pois o frame não torna o áudio visível.

Quadro 26 – Critérios de seleção, descarte e documentação de frames

Decisão	Critério	Registro exigido
Selecionar	legibilidade, pertinência analítica, representatividade e vínculo inequívoco com a categoria	arquivo, caso, timecode, evento e justificativa
Usar par	a evidência depende da diferença entre estado anterior e posterior	timecodes de ambos os estados e ordem explicitada
Recortar	o detalhe é ilegível na tela integral	preservar original; informar recorte; não ocultar contexto necessário
Descartar	duplicação, borramento, cursor obstruindo, transição incompleta ou elemento sem função	motivo de descarte no log
Substituir	frame mais nítido documenta a mesma categoria funcional	manter ligação com a ocorrência validada

Decisão	Critério	Registro exigido
Bloquear	imagem gerada, reencenada, sem proveniência ou incompatível com o vídeo	não usar como evidência empírica

Fonte: elaboração própria (2026).

A decisão documentada no Quadro 26 deve acompanhar cada figura candidata. A legenda final identifica SVQ, módulo ou tela, categoria e aspecto evidenciado; a fonte informa que se trata de frame extraído do corpus audiovisual pelo pesquisador.

Os arquivos de imagem devem receber identificador estável, preferencialmente no padrão SVQ-CASO_EVENTO_TEMPO_ESTADO.png. A extração deve manter proporção e resolução suficientes, evitar filtros de embelezamento e conservar uma cópia do frame integral. Setas, caixas e ampliações são admitidas apenas como anotação editorial transparente, sem alterar o conteúdo empírico.

8 QUADROS, TABELAS E GRÁFICOS

A forma de apresentação deve ser escolhida pela natureza do dado. Quadros organizam conteúdo predominantemente textual e qualitativo; tabelas apresentam valores numéricos em linhas e colunas comparáveis; gráficos tornam relações numéricas validadas mais legíveis. A ferramenta deve propor a forma e justificar a escolha, mas o pesquisador aprova a base e a apresentação.

Quadro 27 – Regra decisória para produtos de sistematização

Produto	Usar quando	Não usar para
Quadro	categorias, definições, evidências, funções, limites e comparação qualitativa	simular precisão quantitativa inexistente
Tabela	há valores validados, denominadores explícitos e bases comparáveis	misturar cliques brutos, durações desiguais ou categorias não equivalentes
Gráfico de barras	comparar cobertura de categorias distintas entre casos com regra comum	transformar diversidade em ranking de qualidade
Matriz/ mapa de presença	mostrar presença, ausência ou condição inconclusiva por categoria e caso	substituir a justificativa qualitativa
Linha temporal	representar a microtemporalidade dentro de um evento	atribuir importância à ordem global da gravação

Produto	Usar quando	Não usar para
Sem gráfico	a relação é puramente qualitativa ou a base não é comparável	preencher espaço ou produzir efeito visual

Fonte: elaboração própria (2026).

Conforme o Quadro 27, qualquer gráfico deve partir apenas de categorias validadas e distintas. O título informa a relação apresentada; eixos e unidades são nomeados; a nota informa critérios de inclusão, exclusão de repetições e denominador; a fonte identifica o corpus e a validação do pesquisador. Percentuais só são admitidos quando o universo é definido e comparável. Não se calcula significância estatística para bases descritivas que não sustentem inferência.

9 VALIDAÇÃO HUMANA, INCERTEZA E AUDITORIA

A validação deve ser realizada sobre o arquivo audiovisual original, e não somente sobre frames, transcrições, espectrogramas ou saídas textuais da ferramenta. Para cada linha, o pesquisador registra uma das decisões: aceita; aceita com correção; funde; desdobra; rejeita; ou mantém inconclusiva. A justificativa é obrigatória nas quatro últimas situações e sempre que houver alteração de categoria, função sonora ou frame.

A confiança expressa pela ferramenta não substitui evidência. Termos como provável, aparente ou possivelmente devem ser convertidos em pendência verificável ou retirados. Divergências entre texto, frame e áudio exigem retorno ao trecho integral. Se a ambiguidade persistir, preserva-se o estatuto inconclusivo.

Quadro 28 – Lista de verificação para validação pelo pesquisador

Pergunta de controle	Registro de decisão
O arquivo e o caso foram corretamente identificados?	sim / não / corrigido
O timecode recupera o evento descrito?	sim / não / novo localizador
Estado, ação, resposta e resultado estão separados?	sim / não / correção
A fonte sonora e sua relação com a imagem foram verificadas?	sim / não / inconclusivo
Repetições equivalentes foram colapsadas?	sim / não / regra aplicada
A categoria pertence à metodologia vigente?	sim / não / rejeitada

Pergunta de controle	Registro de decisão
A interpretação excede o observável?	não / sim, reformulada
O frame sustenta o fato e mantém o contexto necessário?	sim / não / substituído
Tabela ou gráfico usa base comparável e denominador explícito?	sim / não / retirado
A decisão final e sua autoria humana foram registradas?	sim / pendente

Fonte: elaboração própria (2026).

A execução somente é encerrada quando todos os itens aplicáveis do Quadro 28 possuem decisão registrada. Linhas pendentes não podem sustentar afirmações conclusivas.

10 INSTRUÇÃO MESTRE EXECUTÁVEL

O bloco a seguir pode ser fornecido ao ChatGPT em conjunto com os vídeos e a metodologia. Os campos entre colchetes devem ser preenchidos pelo pesquisador. A instrução não autoriza edição ou redação da dissertação.

Atue como ferramenta de apoio à análise preliminar audiovisual. Trabalhe exclusivamente com os três vídeos [SVQ-A], [SVQ-B] e [SVQ-C] e com a [METODOLOGIA APROVADA]. Registre a execução como ChatGPT Pro, modelo ChatGPT 5.6 Sol, esforço extra alto, modo Work, na data [DATA]. Primeiro, produza o inventário técnico e interrompa se houver material ausente, ilegível, inaudível ou caso não identificável. Depois, segmente os casos e localize categorias candidatas pela sequência interna estado anterior → ação → resposta audiovisual → estado resultante. Trate timecodes somente como localizadores; não atribua importância à ordem global dos cliques. Colapse todos os cliques repetidos que, em condição comparável, gerem a mesma resposta visual e sonora; use repetições apenas como comprovação de estabilidade. Para cada categoria provisória, registre vídeo, caso, tela ou módulo, timecode, ação, efeito visual, presença/ausência/inconclusão do som, fonte sonora, descrição, sincronização, função provisória, limite, unidade de registro, dimensão autorizada e justificativa. Não crie dimensão, índice ou efeito pedagógico não previsto na metodologia. Não infira aprendizagem, motivação, emoção, desempenho ou comportamento de usuário. Selecione frames candidatos somente quando sustentarem um fato identificado: forneça timecode, justificativa e indique se é necessário par antes/depois. Não gere nem reencene imagens empíricas. Proponha quadros para dados qualitativos, tabelas para valores comparáveis e gráficos apenas quando houver base numérica válida, denominador explícito e ganho real de legibilidade. Nunca use frequência bruta de cliques, emissões sonoras ou duração do vídeo como medida de qualidade. Entregue: (1) inventário; (2) matriz preliminar; (3) lista de repetições colapsadas; (4) log de incertezas; (5) catálogo de frames candidatos; (6) quadros, tabelas e gráficos candidatos com notas metodológicas; e (7) formulário de decisões para o pesquisador. Identifique todas as saídas como PRELIMINARES — AGUARDANDO APRECIÇÃO E VALIDAÇÃO DO PESQUISADOR.

11 PACOTE DE SAÍDA E NOMENCLATURA

- 01_inventario_tecnico: três vídeos, casos, metadados e condição do áudio;
- 02_matriz_preliminar_eventos: uma linha por categoria ou variante funcional;
- 03_repeticoes_colapsadas: ocorrências usadas somente para confirmar estabilidade;
- 04_incertezas_e_bloqueios: fonte ambígua, trecho insuficiente, conflito ou dado ausente;
- 05_catalogo_frames: miniatura ou nome, timecode, categoria, justificativa e decisão humana;
- 06_produtos_descritivos: quadros, tabelas e gráficos candidatos com base e notas;
- 07_log_validacao_pesquisador: decisão, correção, data, justificativa e versão;
- 08_banco_validado: somente linhas expressamente aprovadas pelo pesquisador.

Os identificadores devem permanecer estáveis entre os arquivos. Recomenda-se o padrão CASO-CATEGORIA-VARIANTE para categorias e CASO-CATEGORIA-TIMECODE-ESTADO para frames. Qualquer renomeação deve constar do log de decisões, preservando a correspondência com a versão anterior.

12 PROIBIÇÕES E LIMITES DE USO

- Não tratar a saída da IA como análise final, validação independente, parecer de especialista ou decisão do pesquisador.
- Não redigir automaticamente capítulos ou seções da dissertação a partir deste protocolo.
- Não inventar ações, telas, sons, reações, categorias, timecodes, frames, referências ou resultados ausentes do corpus.
- Não transferir evidência entre SVQ-A, SVQ-B e SVQ-C.
- Não contar cliques equivalentes como novas evidências nem interpretar duração ou ordem de navegação como resultado.

- Não declarar sonificação de conceito químico sem mapeamento estável entre variável/conteúdo e parâmetro sonoro.
- Não inferir aprendizagem, motivação, emoção, intenção, estratégia ou eficácia sem dados próprios de participantes e desenho compatível.
- Não selecionar frame apenas por apelo visual; toda figura deve ilustrar uma evidência citada e validada.
- Não produzir gráfico quando quadro ou texto descreve melhor uma relação qualitativa.
- Não ocultar incertezas, divergências, limitações técnicas ou decisões de correção humana.

13 REGISTRO DE VERSÃO E DECLARAÇÃO DE VALIDAÇÃO

Versão do protocolo: 1.0. Ambiente informado: ChatGPT Pro; modelo ChatGPT 5.6 Sol; esforço de raciocínio extra alto; modo Work. Finalidade: análise preliminar dos vídeos e sistematização de evidências. Responsabilidade final: pesquisador.

Declaração a ser preenchida pelo pesquisador: “Examinei as saídas preliminares produzidas com apoio deste protocolo, confrontei-as com os arquivos audiovisuais originais e registrei as decisões de aceitação, correção, fusão, desdobramento, rejeição ou manutenção como inconclusiva. Reconheço que a responsabilidade pelas categorias validadas, pelas interpretações e pelo uso acadêmico dos dados é humana e permanece comigo.”

Pesquisador: _____ Data: _____
 ____/____/____
 Versão do banco validado: _____
 Assinatura/registro: _____

ANEXOS

ANEXO A — SIMULADOR “BALANCEAMENTO DE EQUAÇÕES QUÍMICAS” DO PHET

PhET Interactive Simulations. Disponível em:
https://phet.colorado.edu/pt_BR/simulations/balancing-chemical-equations. Acesso
em: 3 set. 2026.