



BACHAREL EM CIÊNCIA DA COMPUTAÇÃO

**VISUALIZAÇÃO DE MOLÉCULAS EM AMBIENTE IMERSIVO
UTILIZANDO *SMARTWATCH* COMO MECANISMO DE
ENTRADA E INTERAÇÃO**

JAMILLY LIMA SANTOS

Iporá, GO

2025



INSTITUTO FEDERAL GOIANO - CAMPUS IPORÁ
BACHAREL EM CIÊNCIA DA COMPUTAÇÃO

**VISUALIZAÇÃO DE MOLÉCULAS EM AMBIENTE IMERSIVO
UTILIZANDO *SMARTWATCH* COMO MECANISMO DE
ENTRADA E INTERAÇÃO**

JAMILLY LIMA SANTOS

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Instituto Federal Goiano - Campus Iporá, como requisito parcial para a obtenção do Grau de Bacharel em Ciência da Computação.

Orientador: Prof. Dr. MARCOS ALVES VIEIRA
Coorientador: Prof. Dr. THAMER HORBYLON NASCIMENTO

Iporá, GO

Dezembro, 2025



SERVIÇO PÚBLICO FEDERAL
MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
SECRETARIA DE EDUCAÇÃO PROFISSIONAL E TECNOLÓGICA
INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA GOIANO

TERMO DE CIÊNCIA E DE AUTORIZAÇÃO PARA DISPONIBILIZAR PRODUÇÕES TÉCNICO-CIENTÍFICAS NO REPOSITÓRIO INSTITUCIONAL DO IF GOIANO

Com base no disposto na Lei Federal nº 9.610/98, AUTORIZO o Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia Goiano, a disponibilizar gratuitamente o documento no Repositório Institucional do IF Goiano (RIIF Goiano), sem resarcimento de direitos autorais, conforme permissão assinada abaixo, em formato digital para fins de leitura, download e impressão, a título de divulgação da produção técnico-científica no IF Goiano.

Identificação da Produção Técnico-Científica (assinale com X)

- [] Tese
[] Dissertação
[] Monografia – Especialização
[] Artigo - Especialização
[X] TCC - Graduação
[] Artigo Científico
[] Capítulo de Livro
[] Livro
[] Trabalho Apresentado em Evento
[] Produção técnica. Qual: _____

Nome Completo do Autor: **Jamilly Lima Santos**

Matrícula: **2022105231940002**

Título do Trabalho: **Visualização de Moléculas em Ambiente Imersivo Utilizando Smartwatch Como Mecanismo de Entrada e Intereração**

Restrições de Acesso ao Documento [Preenchimento obrigatório]

Documento confidencial: **[X]** Não [] Sim, justifique:

Informe a data que poderá ser disponibilizado no RIIF Goiano:**02/02/2026**.

O documento está sujeito a registro de patente? **[X] Sim** [] Não

O documento pode vir a ser publicado como livro? [] Sim **[X] Não**

DECLARAÇÃO DE DISTRIBUIÇÃO NÃO-EXCLUSIVA

O/A referido/a autor/a declara que:



SERVIÇO PÚBLICO FEDERAL
MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
SECRETARIA DE EDUCAÇÃO PROFISSIONAL E TECNOLÓGICA
INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÉNCIA E TECNOLOGIA GOIANO

Ata nº 82/2025 - GE-IP/CMPIPR/IFGOIANO

ATA DA SESSÃO DE JULGAMENTO DO TRABALHO DE CURSO
DE JAMILLY LIMA SANTOS

Aos cinco dias do mês de dezembro de dois mil e vinte e cinco, às dezesseis horas e nove minutos, na Sala Multimeios do Instituto Federal Goiano – Campus Iporá, reuniu-se, em sessão pública, a banca examinadora designada na forma regimental pela Coordenação do Curso para julgar o trabalho de curso intitulado **“Visualização de Moléculas em Ambiente Imersivo Utilizando Smartwatch como Mecanismo de Entrada e Interação”**, apresentado pela acadêmica **Jamilly Lima Santos** como parte dos requisitos necessários à obtenção do grau de Bacharela em Ciência da Computação. A banca examinadora foi presidida pelo orientador do trabalho de curso, Professor Doutor Marcos Alves Vieira, tendo como membros o Professor Doutor Cleon Xavier Pereira Junior e a Professora Mestra Lais Cândido Rodrigues da Silva Lopes. Aberta a sessão, a acadêmica expôs seu trabalho. Em seguida, foi arguida pelos membros da banca e:

(**X**) tendo demonstrado suficiência de conhecimento e capacidade de sistematização do tema de seu trabalho de curso, a banca conclui pela **aprovação** da acadêmica.

() não tendo demonstrado suficiência de conhecimento e capacidade de sistematização do tema de seu trabalho de curso, a banca conclui pela **reprovação** da acadêmica.

Conforme avaliação individual de cada membro da banca, será atribuída a nota **7,0 (sete)** para fins de registro em histórico acadêmico.

Os trabalhos foram encerrados às dezessete horas e cinco minutos. Nos termos do Regulamento do Trabalho de Curso do Bacharelado em Ciência da Computação do Instituto Federal Goiano – Campus Iporá, lavrou-se a presente ata que, lida e julgada conforme, segue assinada pelos membros da banca examinadora.

(Assinado Eletronicamente)
Prof. Dr. Marcos Alves Vieira

(Assinado Eletronicamente)
Prof. Dr. Cleon Xavier Pereira Junior

(Assinado Eletronicamente)
Prof.ª Ma. Lais Cândido Rodrigues da Silva Lopes

JAMILLY LIMA SANTOS

VISUALIZAÇÃO DE MOLÉCULAS EM AMBIENTE IMERSIVO UTILIZANDO *SMARTWATCH* COMO MECANISMO DE ENTRADA E INTERAÇÃO

Trabalho de curso DEFENDIDO E APROVADO em ____ de _____ de _____, pela Banca Examinadora constituída pelos membros:

Dr. CLEON XAVIER PEREIRA JUNIOR
Instituto Federal Goiano

Ma. LAIS CANDIDO R. DA SILVA LOPES
Instituto Federal Goiano

Dr. MARCOS ALVES VIEIRA
Orientador

Dr. THAMER HORBYLON
NASCIMENTO
Coorientador

Iporá, GO

2025

Sistema desenvolvido pelo ICMC/USP
Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)
Sistema Integrado de Bibliotecas - Instituto Federal Goiano

S586s Silva, Alexandre da
Sistema de Reconhecimento de Espécies Importantes
da Piscicultura no Brasil / Alexandre da Silva;
orientador André da Cunha Ribeiro; co-orientador
Adriano Carvalho Costa. -- Rio Verde, 2021.
55 p.

TCC (Graduação em Ciência da Computação) --
Instituto Federal Goiano, Campus Rio Verde, 2021.

1. Redes Neurais Convolucionais. 2. Visão
Computacional. 3. Aprendizado de Máquina. 4.
Classificação de espécies de peixes. I. Cunha
Ribeiro, André da, orient. II. Carvalho Costa,
Adriano, co-orient. III. Título.

Responsável: Johnathan Pereira Alves Diniz - Bibliotecário-Documentalista CRB-1 nº2376

AGRADECIMENTOS

Quero expressar minha profunda gratidão aos meus professores Marcos Alves, orientador, e Thamer Horbylon, coorientador, cuja dedicação e paciência foram essenciais em cada etapa desta pesquisa. Ambos estiveram presentes em momentos dos quais as coisas não saíram como planejado, e foram muitos. Em diversas ocasiões, quando os ânimos eram baixos e parecia que nada daria certo, eles enxergavam além do problema e diziam, cabeça fria, façamos por partes!

Agradeço também a minha família, por muitas vezes optarem pela paciência quando eu precisava deixar os vários afazeres de casa para ficar no quarto e continuar solucionando os problemas encontrados, e ao meu pai, que me apoiou bastante durante todo processo.

Este trabalho carrega, além de um pouquinho do meu esforço, a confiança que todos vocês depositaram em mim, meu sincero agradecimento.

RESUMO

SANTOS, JAMILLY LIMA. **VISUALIZAÇÃO DE MOLÉCULAS EM AMBIENTE IMERSIVO UTILIZANDO SMARTWATCH COMO MECANISMO DE ENTRADA E INTERAÇÃO.** Dezembro, 2025. 27 f. Monografia – (Curso de Bacharelado em Ciência da Computação), Instituto Federal Goiano - Campus Iporá. Iporá, GO.

A compreensão de estruturas moleculares tridimensionais é um desafio recorrente no ensino de Química, especialmente porque muitos estudantes apresentam dificuldades em relacionar representações bidimensionais a modelos espaciais mais complexos. Essa limitação impacta a construção de conceitos fundamentais e pode restringir a capacidade de interpretar e manipular visualmente diferentes formas químicas. Nesse cenário, ferramentas que combinem interação gestual e visualização tridimensional oferecem alternativas relevantes para apoiar o desenvolvimento do raciocínio espacial e tornar o processo de aprendizagem mais significativo. Este trabalho apresenta o desenvolvimento e a avaliação de um sistema integrado que combina o reconhecimento de desenhos em *smartwatches* com a visualização tridimensional de moléculas em um ambiente de realidade virtual que apoie o ensino de Química. O *smartwatch* registra gestos desenhados pelo usuário, representando estruturas químicas simples, e envia as imagens a um servidor remoto em nuvem, responsável pela identificação do desenho por meio de uma Rede Neural Convolucional, após a identificação, a molécula correspondente é exibida em três dimensões em um ambiente de realidade virtual no smartphone, utilizando o Google Cardboard para visualização, possibilitando a exploração interativa da estrutura molecular por meio dos movimentos do pulso. A metodologia adotada incluiu pesquisa bibliográfica, desenvolvimento do protótipo e realização de um experimento com 11 participantes, sendo eles 4 professores e 7 estudantes de Licenciatura em Química. A avaliação do sistema foi conduzida por meio dos instrumentos *System Usability Scale* (SUS), responsável por obter uma média padronizada da aceitabilidade do sistema do ponto de vista funcional, e o *User Experience Questionnaire - Short Version* (UEQ-S), associado ao interesse, atratividade e percepção da solução proposta. Os resultados indicaram altos níveis de usabilidade e uma experiência de uso positiva, sugerindo que o sistema é funcional e adequado para apoiar a exploração de conteúdos abstratos por meio de gestos e visualização tridimensional. Esses achados contribuem para as discussões sobre o uso de tecnologias vestíveis e ambientes imersivos na educação, destacando seu potencial para enriquecer práticas de ensino. As conclusões do estudo apontam oportunidades de aprimoramento, como ampliar o conjunto de moléculas reconhecidas, aprimorar os algoritmos de processamento de imagem e realizar testes em contextos escolares reais a fim de avaliar o impacto pedagógico em maior escala.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Representação bidimensional e tridimensional da molécula de metanol (CH ₃ OH).	1
Figura 2 – Estágios que foram seguidos no desenvolvimento do trabalho.	10
Figura 3 – Imagem mostrando a comunicação de um dispositivo para outro.	13
Figura 4 – Exemplo de interação gestual no <i>smartwatch</i> para o desenho das letras. .	14
Figura 5 – Rotação da molécula no aplicativo de visualização ao girar com o pulso. .	14
Figura 6 – Molécula de etanol representada em três dimensões no aplicativo de visualização.	15
Figura 7 – Suporte físico construído artesanalmente para o Google Cardboard. . . .	16
Figura 8 – Médias atribuídas às questões do SUS pelos participantes.	19
Figura 9 – Médias das dimensões do UEQ-S obtidas no experimento.	21
Figura 10 – Comparação das pontuações do UEQ-S com as faixas de qualidade do <i>benchmark</i>	21

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Itens do questionário SUS e indicação de questões positivas (↑) e negativas (↓).	18
Tabela 2 – Classificação adjetiva do SUS e resultado obtido neste estudo.	19
Tabela 3 – Itens do questionário UEQ-S.	20

SUMÁRIO

1 – INTRODUÇÃO	1
1.1 Objetivos	2
1.1.1 Objetivos Gerais	3
1.1.2 Objetivos Específicos	3
1.2 Estrutura do Trabalho	3
2 – REVISÃO DA LITERATURA E TRABALHOS RELACIONADOS	4
2.1 O Ensino de Química: Fundamentos e Práticas do Ensino Tradicional	4
2.2 As Tecnologias no Processo de Ensino e Aprendizagem	5
2.3 Ambientes de Realidade Virtual	6
2.4 Tecnologias Vestíveis e a Integração do <i>Smartwatch</i> e da Realidade Virtual no Ensino de Química	7
2.5 Google Cardboard como ferramenta de visualização em Ambiente Virtual .	8
3 – MATERIAIS E MÉTODOS	10
3.1 Pesquisa Bibliográfica	10
3.2 Identificação do Problema	10
3.3 Desenvolvimento do Sistema	11
3.4 Testes Experimentais	11
3.5 Conclusão e Avaliação dos Resultados	11
4 – RESULTADOS E DISCUSSÕES	12
4.1 Protótipo	12
4.1.1 Visão Geral do Protótipo	12
4.1.2 Reconhecimento e Processamento da Interação	13
4.1.3 Desenvolvimento do Protótipo	15
4.1.4 Interação com o Ambiente Virtual	15
4.1.5 Google Cardboard	16
4.2 Experimento e Resultados	16
4.2.1 <i>System Usability Scale</i> (SUS)	17
4.2.2 <i>User Experience Questionnaire - Short Version</i> (UEQ-S)	19
5 – CONCLUSÃO	23
Referências	25

1 INTRODUÇÃO

Compreender e visualizar estruturas moleculares em três dimensões é fundamental para uma melhor assimilação de conteúdos no ensino de Química (ATKINS; JONES; LAVERMAN, 2018; STOWE et al., 2020), sendo essencial para o entendimento de atributos espaciais complexos, tais como a forma das moléculas, os ângulos e as ligações. Sendo assim, a utilidade da realidade virtual no âmbito educacional tem se mostrado reiteradamente comprovada como um recurso auxiliar para intensificar essa percepção tridimensional, concedendo ao aprendiz o poder de manusear e investigar modelos abstratos de maneira envolvente (MEDEIROS et al., 2021; FOMBONA-PASCUAL; FOMBONA; VÁZQUEZ-CANO, 2022). Contudo, os métodos de ensino convencionais ainda se apoiam massivamente em figuras planas de duas dimensões e materiais impressos (TABER, 2009), os quais frequentemente falham em reproduzir fielmente a natureza tridimensional das estruturas químicas. O entrave principal está na conversão mental de uma imagem plana para um objeto com volume, um obstáculo cognitivo que impacta negativamente a compreensão da reatividade e das forças entre moléculas. Noções como os diferentes arranjos espaciais de cadeias carbônicas, por exemplo, demandam que o estudante consiga imaginar a movimentação e a localização precisa de aglomerados atômicos no espaço, algo que as representações em duas dimensões dificilmente conseguem ilustrar de modo claro (ATKINS; JONES; LAVERMAN, 2018; STOWE et al., 2020). Essa restrição pode impedir o aprimoramento da noção espacial dos discentes, prejudicando sua assimilação e consequentemente menor absorção do conteúdo (FOMBONA-PASCUAL; FOMBONA; VICENTE, 2022). A Figura 1 ilustra as diferenças entre as representações em duas dimensões (2D) e três dimensões (3D), evidenciando a necessidade de abordagens que favoreçam a visualização espacial das moléculas.

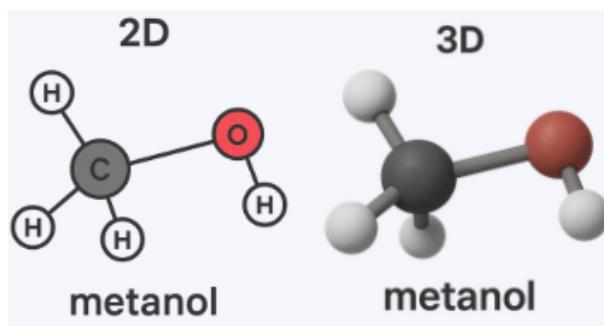


Figura 1 – Representação bidimensional e tridimensional da molécula de metanol (CH_3OH).

Neste cenário, a Realidade Virtual (RV) destaca-se como uma ferramenta útil, pois seu isolamento sensorial permite o controle direto de modelos tridimensionais, fornecendo noção de profundidade e possibilidades de interação essenciais para a compreensão da forma molecular. Contudo, apesar dessas vantagens, análises recentes da literatura, como a de (FALAH; AQA, 2024), apontam que a adoção consolidada da RV no contexto educacional ainda enfrenta desafios significativos. Os autores ressaltam que, embora a tecnologia aumente o engajamento e a clareza conceitual, a necessidade de óculos específicos, softwares com licenças e suporte computacional avançado cria barreiras à sua ampla disseminação no ambiente educacional. Assim, iniciativas que combinem alto nível de imersão e participação

ativa do estudante permanecem incomuns fora de ambientes de pesquisa. A disseminação em larga escala é restringida pelos altos custos e pela complexidade técnica envolvida (RADIANTI et al., 2020). Superar esses entraves econômicos e operacionais é fundamental para ampliar o acesso a metodologias ativas e a ferramentas tecnológicas contemporâneas, especialmente em escolas com recursos limitados (RODRIGUES, 2023).

Diante desse problema, é necessária a criação de opções tecnológicas que sejam, ao mesmo tempo, mais econômicas e funcionais. Este trabalho introduz um sistema que emprega o Google Cardboard¹ como suporte para visualização em RV móvel, uma opção prática que converte celulares em dispositivos de imersão. A opção pelo Cardboard é fundamentada precisamente em sua relação custo-benefício favorável e na adaptação com a grande quantidade de *smartphones* em uso (NASCIMENTO et al., 2017), tornando a RV instantaneamente disponível. Somado a isso, a utilização de *smartwatches* como periférico de entrada propicia uma forma nova de interação, possibilitando que o utilizador desenhe caracteres que simbolizam átomos diretamente no mostrador do relógio. A partir desse reconhecimento de gestos, os desenhos produzidos no mostrador do *smartwatch* são enviados a um servidor em nuvem, onde são processados por um modelo de reconhecimento previamente desenvolvido (AMORIM et al., 2025), o qual é responsável por identificar o símbolo químico manuscrito. Uma vez identificado o caractere, os componentes correspondentes são adicionados ao cenário virtual para construir a molécula em três dimensões.

O diferencial deste trabalho não reside apenas no uso do *smartwatch* como dispositivo de entrada, mas principalmente na forma como a interação contínua possibilita a manipulação dinâmica das moléculas no ambiente virtual. Os desenhos realizados na tela sensível ao toque do *smartwatch* são coletados e analisados por um algoritmo de reconhecimento responsável por identificar os símbolos atômicos, enquanto os gestos e coordenadas enviados em tempo real permitem a movimentação, rotação e exploração espacial das estruturas moleculares no universo virtual. Essa estratégia explora a eficiência de comandos contínuos em *smartwatches* para operar em contextos de realidade virtual, promovendo uma interação mais fluida e natural entre o usuário e os modelos tridimensionais (NASCIMENTO et al., 2023; AMARAL et al., 2024).

Fundamentado nessas premissas, este trabalho apresenta uma plataforma dinâmica, caracterizada pela adaptação contínua do conteúdo visualizado a partir da interação do usuário, integrando dispositivos portáteis e vestíveis para a exibição de estruturas moleculares tridimensionais em ambientes imersivos (MEDEIROS et al., 2021; RADIANTI et al., 2020). A cada símbolo desenhado no *smartwatch*, o sistema processa a informação e atualiza a visualização correspondente, permitindo que as moléculas sejam apresentadas de forma interativa e responsiva (MIN; JEON; KIM, 2019; VARELA; THOMPSON; ROSCH, 1992). Dessa forma, a solução proposta demonstra como diferentes tecnologias podem ser incorporadas de maneira fluida ao contexto educacional, aproximando o uso de recursos digitais do cotidiano do estudante (MORAN, 2015; VALENTE, 2019).

1.1 Objetivos

A seguir, os objetivos que orientaram o desenvolvimento do trabalho são apresentados, incluindo dois objetivos gerais, que expressam sua finalidade central e objetivos específicos que detalham as etapas necessárias para alcançá-la.

¹ <<https://arvr.google.com/cardboard/>>

1.1.1 Objetivos Gerais

- Desenvolver um sistema que permita a construção e a visualização de estruturas moleculares em realidade virtual a partir de símbolos desenhados em *smartwatch*.
- Avaliar a usabilidade e a experiência do usuário do sistema desenvolvido no contexto do ensino de Química.

1.1.2 Objetivos Específicos

- Desenvolver um módulo de interação em *smartwatch* capaz de capturar letras desenhadas na tela e enviá-las ao sistema.
- Integrar a entrada de dados do *smartwatch* ao servidor em nuvem que executa o sistema de reconhecimento de caracteres manuscritos baseado em Rede Neural Convolucional (*Convolutional Neural Network – CNN*).
- Implementar um módulo de visualização em realidade virtual para renderizar moléculas tridimensionais a partir dos símbolos reconhecidos.
- Implementar um canal de comunicação direta entre o *smartwatch* e a aplicação Unity, destinado ao envio de coordenadas e comandos gestuais para a manipulação das moléculas no ambiente virtual.
- Estabelecer a comunicação entre *smartwatch*, servidor e *smartphone*, garantindo uma arquitetura distribuída funcional e estável.
- Realizar testes experimentais para avaliar o funcionamento, o desempenho e a estabilidade do sistema em condições reais de uso.
- Aplicar instrumentos de avaliação de usabilidade e de experiência do usuário para analisar a percepção dos participantes quanto à eficácia e ao potencial educacional da solução.

1.2 Estrutura do Trabalho

O restante deste trabalho está organizado da seguinte forma: o Capítulo 2 apresenta a revisão de literatura, discutindo os fundamentos teóricos que embasam a pesquisa e explorando o uso de tecnologias imersivas no ensino de Química. No Capítulo 3, são detalhados os métodos adotados, contemplando as etapas de desenvolvimento do sistema, os procedimentos experimentais e os critérios de avaliação. No Capítulo 4, os resultados obtidos são descritos e analisados, com ênfase nas percepções dos participantes do experimento, registradas por meio dos questionários aplicados. Por fim, o Capítulo 5 reúne as conclusões do estudo, destacando as contribuições alcançadas e sugerindo caminhos para investigações futuras.

2 REVISÃO DA LITERATURA E TRABALHOS RELACIONADOS

Este capítulo tem como objetivo apresentar os fundamentos teóricos e pesquisas que sustentam este estudo, abordando as transformações no ensino de Química diante das inovações tecnológicas emergentes. Busca-se compreender como os modelos tradicionais vêm sendo desafiados por novas metodologias e identificar o papel das tecnologias imersivas e vestíveis na construção de práticas pedagógicas mais interativas e significativas.

Inicialmente, discute-se o ensino de Química sob uma perspectiva tradicional, destacando suas bases históricas e metodológicas, bem como as limitações na relação entre teoria e prática e na compreensão de fenômenos químicos. Em seguida, analisam-se as transformações provocadas pelas Tecnologias da Informação e Comunicação (TIC), que vêm reconfigurando as formas de ensinar e aprender. As TIC, quando integradas de forma pedagógica, favorecem o protagonismo do aluno e promovem aprendizagens mais dinâmicas e colaborativas.

Posteriormente, é explorado o papel da realidade virtual (RV) no ensino de Química, evidenciando seu potencial de imersão e interação para representar conceitos abstratos, como ligações e reações químicas. Também é abordado o uso de tecnologias vestíveis, em especial o *smartwatch*, como ferramenta educativa capaz de se integrar a ambientes virtuais, permitindo interação gestual e controle de objetos 3D.

Por fim, destaca-se a integração entre o *smartwatch* e a realidade virtual como uma oportunidade para criar ecossistemas educacionais híbridos e imersivos. Essa convergência entre tecnologia e pedagogia representa um avanço para o ensino de Química, ao unir experimentação, interatividade e aprendizagem significativa.

2.1 O Ensino de Química: Fundamentos e Práticas do Ensino Tradicional

A química é uma ciência que busca compreender “as transformações de matéria e energia envolvidas nesses processos, relacionando o mundo macroscópico — o que vemos e tocamos — ao mundo submicroscópico, composto por átomos e moléculas” (ATKINS; JONES; LAVERMAN, 2018). Essa natureza complexa requer estratégias que permitam aos alunos transitar entre os níveis macroscópico, simbólico e submicroscópico, o que nem sempre ocorre em modelos tradicionais de ensino baseados na repetição e memorização de fórmulas e equações.

Nesse sentido, o ensino tradicional tende a privilegiar a dimensão simbólica da química, enfatizando cálculos estequiométricos, nomenclatura e equações de balanceamento, em detrimento da compreensão de fenômenos reais e do raciocínio molecular que os sustenta. Para (ATKINS; JONES; LAVERMAN, 2018), “a verdadeira aprendizagem em química ocorre quando os alunos conseguem conectar o comportamento observável das substâncias com suas estruturas internas invisíveis”. No entanto, essa conexão raramente é alcançada por meio de aulas puramente expositivas, que não promovem o desenvolvimento de habilidades cognitivas de ordem superior, como análise, interpretação e modelagem.

Historicamente, o ensino tradicional de química tem se baseado em uma combinação de exposição teórica com aulas expositivas, demonstrações em sala de aula e atividades laboratoriais estruturadas. Tais estratégias continuam sendo utilizadas para organizar amplos conjuntos de conteúdo (leis, modelos, nomenclatura) e apresentar procedimentos laboratoriais. Porém, seu uso, embora eficiente para a transmissão de conteúdo, nem sempre garante uma compreensão conceitual profunda sem mediação e integração com as

representações e atividades dos alunos. Muitas vezes se mostra insuficiente para promover a compreensão significativa e contextualizada dos fenômenos químicos (TABER, 2009).

O laboratório escolar, considerado um elemento essencial do ensino tradicional de química, é frequentemente utilizado apenas como um espaço para confirmação de teorias, em vez de um ambiente para investigação científica. Em muitos casos, os experimentos são conduzidos de forma prescritiva, seguindo padrões fixos que reduzem a autonomia do aluno e limitam o desenvolvimento do pensamento científico. Essa crítica é reforçada por (TABER, 2009), que afirma que “a mera observação de experimentos não garante que os alunos compreendam os modelos teóricos subjacentes”.

A Base Nacional Comum Curricular (BRASIL, 2018), também reconhece essa limitação, propondo uma abordagem para o ensino de ciências que vá além da mera transmissão de conteúdo, fomentando o desenvolvimento da curiosidade, da investigação e da argumentação científica. Portanto, o ensino contemporâneo de química deve transcender o modelo tradicional, incorporando práticas que conectem teoria e prática, linguagem e fenômenos, conteúdo e contexto social.

Por fim, embora o ensino tradicional tenha contribuído para a sistematização do conhecimento químico, carece de estratégias que promovam a compreensão conceitual profunda e o empoderamento do aluno. Como argumentam (ATKINS; JONES; LAVERMAN, 2018), o ensino de química deve levar os alunos a “questionar o mundo ao seu redor, compreender as transformações da matéria e perceber a relevância social e ambiental da ciência química”, promovendo uma aprendizagem que combine conhecimento, reflexão e responsabilidade científica.

2.2 As Tecnologias no Processo de Ensino e Aprendizagem

A sociedade contemporânea é influenciada pelo progresso tecnológico, em que a informação circula rapidamente, de forma digitalizada e globalizada, sendo frequentemente chamada de “era do conhecimento”. Conforme aponta o relatório da Organização para a Cooperação e Desenvolvimento Econômico (*Organisation for Economic Co-operation and Development - OECD*), vivemos em uma fase em que as tecnologias digitais e a conectividade remodelam os processos de ensino e aprendizagem, ampliando os fluxos de conhecimento além dos limites tradicionais (OECD, 2023).

O indivíduo está socialmente inserido em um ambiente historicamente construído e, por isso, é simultaneamente produto e produtor dessa cultura. O contexto em que vive constitui uma importante fonte de conhecimento e experiência para seu desenvolvimento integral. Nesse sentido, o estudo de (BOGIANNIDIS; SOUTHCOTT; GINDIDIS, 2023), ao investigar o espaço físico-digital ocupado por estudantes, evidencia que a intersecção entre os mundos físico e digital reorganiza as formas de aprender e de participar socialmente.

Nessa perspectiva, é fundamental que as experiências de vida dos alunos sejam reconhecidas e valorizadas no processo educacional, pois contribuem de maneira significativa para a construção de novos conhecimentos. O avanço tecnológico das últimas décadas tem transformado profundamente o cenário educacional, possibilitando novas formas de ensinar e aprender mediadas por ferramentas digitais. As Tecnologias da Informação e Comunicação (TIC) ampliaram o acesso ao conhecimento e potencializaram metodologias de ensino baseadas na interatividade, colaboração e na construção ativa do saber (SIMÓN-SÁNCHEZ; FERNÁNDEZ-SÁNCHEZ, 2023).

De acordo com (MORAN, 2015), as tecnologias digitais, quando integradas de forma pedagógica e reflexiva, contribuem para o desenvolvimento da autonomia, da

criatividade e do protagonismo dos estudantes, tornando o processo de aprendizagem mais dinâmico e significativo.

Portanto, as tecnologias estão transformando o mundo e, portanto, devem ser consideradas de forma consistente no contexto educacional. É fundamental compreender que seu desenvolvimento e uso ocorrem em um contexto permeado por valores e interesses diversos, que nem sempre beneficiam toda a população. Isso evidencia o alerta da Organização das Nações Unidas para a Educação, a Ciência e a Cultura (UNESCO), que aponta que as competências digitais e o acesso equitativo ainda são grandes desafios globais (UNESCO, 2023). Portanto, é responsabilidade da educação orientar, formar e preparar os alunos para compreender, interagir e sobreviver criticamente em uma sociedade cada vez mais tecnológica e globalizada.

2.3 Ambientes de Realidade Virtual

A realidade virtual (RV) tem se consolidado como uma das tecnologias mais promissoras para o ensino de ciências, sobretudo na área de Química, ao proporcionar ambientes imersivos, interativos e tridimensionais que permitem a visualização de fenômenos invisíveis ao olhar humano. Essa tecnologia rompe as barreiras tradicionais da sala de aula ao permitir que o estudante explore estruturas moleculares, reações químicas e processos atômicos em escala nanométrica, de forma segura, intuitiva e visualmente detalhada. Ao simular o ambiente laboratorial, a RV favorece o aprendizado experencial, permitindo que conceitos abstratos sejam compreendidos por meio da ação e da experimentação (FOMBONA-PASCUAL; FOMBONA; VÁZQUEZ-CANO, 2022; GUNGOR et al., 2022).

Pesquisas recentes demonstram que a integração de ambientes de realidade virtual no ensino de Química tem potencial para aumentar o engajamento, reduzir a ansiedade e melhorar a autoconfiança dos estudantes em atividades laboratoriais. O estudo conduzido por (GUNGOR et al., 2022) revelou que alunos que participaram de experiências em um laboratório virtual apresentaram níveis mais baixos de ansiedade e maior motivação quando comparados a métodos tradicionais. Essa melhoria é atribuída ao caráter interativo e seguro do ambiente VR, que elimina riscos físicos e incentiva a exploração ativa do conhecimento científico.

A RV também desempenha um papel fundamental na promoção do raciocínio espacial e da compreensão de estruturas complexas, habilidades essenciais na Química moderna. Como apontam (FOMBONA-PASCUAL; FOMBONA; VÁZQUEZ-CANO, 2022), os ambientes tridimensionais possibilitam uma representação mais precisa das geometrias moleculares, orbitais eletrônicos e ligações químicas, elementos que muitas vezes são difíceis de compreender por meio de representações bidimensionais em livros didáticos. Dessa forma, o estudante pode “entrar” em um espaço molecular, observar a disposição dos átomos e compreender as relações estruturais de maneira mais concreta e significativa.

Outro avanço relevante refere-se ao uso de laboratórios virtuais (*Virtual Reality Laboratories – VRLs*), que têm se consolidado como alternativas viáveis para o ensino experimental em escolas e universidades. (GURULOO; OSMAN, 2024) realizaram uma revisão sistemática que evidencia o crescimento expressivo das publicações sobre VRLs na última década, especialmente a partir de 2021. Segundo os autores, os laboratórios virtuais possibilitam a realização de experimentos que, em contextos tradicionais, podem ser inviabilizados por limitações financeiras, estruturais ou de segurança, além de favorecerem o desenvolvimento de competências cognitivas e procedimentais, contribuindo para uma aprendizagem mais abrangente e consistente.

Contudo, a adoção desses ambientes ainda enfrenta desafios, como a necessidade de infraestrutura adequada, formação de professores e disponibilidade de dispositivos compatíveis. Muitos estudos destacam que o custo de equipamentos de realidade virtual e a limitação de desempenho gráfico podem afetar a implementação em larga escala. Ainda assim, o avanço de tecnologias móveis e dispositivos vestíveis como os *smartwatches* tem contribuído para a democratização da RV, oferecendo novas formas de controle gestual e interação com o ambiente virtual (AMIRBEKOVA; SHERTAYEVA; MIRONOVA, 2024).

A convergência entre realidade virtual, gamificação e metaverso educacional também tem ganhado destaque nas pesquisas mais recentes. Ambientes gamificados em VR aplicados ao ensino de ligações químicas e estrutura da matéria mostraram-se eficazes para aumentar a motivação e o desempenho acadêmico dos estudantes. De acordo com (RAHMAN et al., 2024), o uso de jogos educativos em ambientes imersivos proporciona uma experiência mais envolvente, promovendo a aprendizagem ativa e colaborativa. Tais estratégias alinharam-se às metodologias ativas contemporâneas, nas quais o estudante é colocado como protagonista do processo de construção do conhecimento.

Os estudos de (AMIRBEKOVA; SHERTAYEVA; MIRONOVA, 2024) reforçam que o uso combinado de realidade virtual e aumentada potencializa o entendimento de conceitos abstratos, como reações químicas e propriedades periódicas, ao oferecer visualizações interativas e manipulação direta dos objetos virtuais. Essa imersão favorece a aprendizagem multimodal, pois integra estímulos visuais, espaciais e cinestésicos, ampliando a retenção de conteúdo e a significação do aprendizado.

Enfim, os ambientes de realidade virtual representam uma evolução pedagógica relevante para o ensino de Química, permitindo que os estudantes passem de uma postura passiva para uma atuação ativa e exploratória. A visualização tridimensional, o controle gestual e a integração com tecnologias vestíveis contribuem para a criação de um ecossistema educacional imersivo e motivador, alinhado às demandas contemporâneas de ensino e aprendizagem.

2.4 Tecnologias Vestíveis e a Integração do *Smartwatch* e da Realidade Virtual no Ensino de Química

A evolução das tecnologias vestíveis e dos ambientes imersivos tem transformado a forma como os seres humanos interagem com sistemas computacionais, permitindo que o corpo se torne parte ativa da interface digital. Entre essas tecnologias, o *smartwatch* destaca-se pela portabilidade, pelo conjunto de sensores integrados e pela capacidade de se conectar de forma ubíqua a outros dispositivos, aproximando-se da visão de computação pervasiva descrita por (WEISER, 1999). No ensino de Química, essas características abrem caminho para experiências educacionais mais interativas, contextualizadas e multimodais.

A combinação entre *smartwatch* e realidade virtual cria um ecossistema no qual gestos naturais realizados no pulso podem manipular objetos tridimensionais, ativar visualizações e controlar elementos do ambiente imersivo. Essa forma de interação se articula diretamente com os princípios da cognição incorporada, segundo os quais o aprendizado emerge da integração entre corpo, mente e ambiente (VARELA; THOMPSON; ROSCH, 1992). Ao desenhar, tocar ou gesticular no relógio para manipular moléculas virtuais, o estudante articula percepção, ação e raciocínio químico de maneira intuitiva e significativa.

Do ponto de vista pedagógico, a utilização de interfaces gestuais em dispositivos vestíveis tem se mostrado eficaz para ampliar o engajamento e favorecer a retenção cognitiva. Estudos como (MIN; JEON; KIM, 2019) e (STOWE et al., 2020) demonstram que ambientes

imersivos que envolvem manipulação corporal promovem melhor compreensão espacial, aspecto essencial para o estudo de modelos moleculares. No caso da Química, a possibilidade de rotacionar moléculas, observar ligações e explorar estruturas tridimensionais em tempo real auxilia na construção de significados sobre relações atômicas e processos químicos.

Ao integrar sensores tátteis e reconhecimento de gestos com a visualização 3D possibilitada pela realidade virtual, o *smartwatch* deixa de ser apenas um dispositivo acessório e passa a atuar como um controlador de experiências imersivas. A arquitetura proposta em pesquisas recentes (NASCIMENTO et al., 2023; AMARAL et al., 2024) demonstra que o *smartwatch* é capaz de captar movimentos, desenhos ou símbolos e enviá-los, por meio de rede sem fio, a um servidor responsável pelo processamento, que pode identificar letras, mapear gestos ou acionar a representação tridimensional correspondente no ambiente virtual. No caso específico deste trabalho, o reconhecimento das letras manuscritas utilizou o modelo proposto por (AMORIM et al., 2025), integrado ao servidor em nuvem para classificar os símbolos desenhados no *smartwatch*. Essa arquitetura visa distribuir as demandas computacionais, reduzir o consumo energético no dispositivo vestível e garantir a responsividade do ambiente virtual.

Essa integração também atende às demandas contemporâneas por metodologias ativas, que colocam o estudante como protagonista do processo de aprendizagem. Ao desenhar o símbolo de um elemento químico no *smartwatch* e visualizar imediatamente sua representação molecular no ambiente RV, o aluno vivencia uma abordagem de aprender fazendo (*learning-by-doing*), interagindoativamente com o conhecimento científico (MORAN, 2015). Essa perspectiva é reforçada por (VALENTE, 2019), que defende que tecnologias digitais devem ir além da simples substituição de ferramentas tradicionais, promovendo experiências de aprendizagem mais ricas, personalizadas e engajadoras.

Além disso, o uso do *smartwatch* como interface corporal favorece a naturalidade da interação, pois exige gestos simples e oferece *feedback* visual imediato, tornando a interação intuitiva para estudantes com diferentes níveis de familiaridade tecnológica e potencialmente útil para públicos com limitações nas interações tradicionais de teclado e mouse. Essa característica contribui para transformar os ambientes de realidade virtual em espaços mais sensoriais. A integração entre *smartwatch* e realidade virtual no ensino de Química representa uma convergência entre tecnologia, corpo e aprendizagem, uma vez que transforma gestos em ações imersivas e visualizações científicas interativas, rompendo com a linearidade das práticas tradicionais e inaugurando um paradigma de ensino mais exploratório, sensorial e significativo.

2.5 Google Cardboard como ferramenta de visualização em Ambiente Virtual

O Google Cardboard¹ é uma plataforma RV desenvolvida pelo Google com o objetivo de ampliar o acesso a experiências imersivas por meio de dispositivos móveis. Baseado no uso de um smartphone acoplado a uma estrutura com lentes ópticas, o Cardboard permite a visualização de ambientes tridimensionais e em 360 graus, reduzindo significativamente os custos associados quando comparado a dispositivos dedicados (Android Developers, 2025).

No contexto educacional, a ferramenta tem sido explorado como uma alternativa viável para a implementação de ambientes imersivos em instituições com possível infraestrutura tecnológica limitada. Estudos apontam que a utilização da realidade virtual baseada em dispositivos móveis pode aumentar o engajamento dos estudantes, (RADIANI et

¹ <<https://arvr.google.com/cardboard/>>

al., 2020), além de favorecer a motivação e contribuir para a compreensão de conceitos abstratos, especialmente na área de Química.

Um dos principais desafios associados ao uso do Cardboard refere-se aos métodos de interação e entrada de dados, uma vez que interfaces tradicionais, como teclado e mouse, não são adequadas a ambientes imersivos. Nesse cenário, pesquisas têm investigado o uso de dispositivos alternativos, como sensores gestuais e tecnologias vestíveis, visando tornar a interação mais natural e intuitiva (COBAN; BOLAT; GOKSU, 2022).

Nesse contexto, destaca-se o trabalho de (NASCIMENTO et al., 2017), que propõe um método de entrada de texto para ambientes de realidade virtual móvel utilizando *smartwatches* e reconhecimento contínuo de gestos integrados ao Google Cardboard. A proposta demonstra o potencial dos dispositivos vestíveis como interfaces corporais para interação em ambientes imersivos, evidenciando que o uso de gestos desenhados no *smartwatch* pode substituir dispositivos tradicionais de entrada, ampliando a usabilidade da realidade virtual.

De forma mais ampla, a literatura aponta que soluções quando associadas a estratégias pedagógicas bem definidas, podem promover aprendizagens mais ativas e significativas. Segundo (RADIANTI et al., 2020), a efetividade da RV no ensino está menos associada à sofisticação do hardware e mais à forma como a tecnologia é integrada ao processo educativo.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

Neste capítulo serão apresentados os procedimentos metodológicos que orientaram a realização da pesquisa, desde o levantamento bibliográfico até o desenvolvimento, testes experimentais para validação da solução proposta. A metodologia foi estruturada em cinco fases interdependentes: pesquisa bibliográfica, identificação do problema, desenvolvimento do sistema, testes experimentais e avaliação dos resultados. A Figura 2 ilustra a sequência metodológica do trabalho, contemplando a integração entre investigação teórica, implementação técnica e análise empírica.

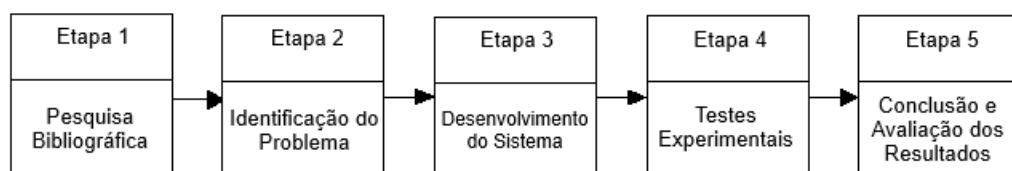


Figura 2 – Estágios que foram seguidos no desenvolvimento do trabalho.

3.1 Pesquisa Bibliográfica

A pesquisa bibliográfica foi conduzida com o objetivo de consolidar a base teórica necessária para orientar as etapas seguintes. Foram analisados estudos relacionados ao ensino de Química, metodologias pedagógicas, dificuldades de aprendizagem e ao uso de tecnologias digitais como recursos de apoio didático. A revisão incluiu produções acadêmicas sobre visualização tridimensional, simulações interativas e ferramentas digitais aplicadas à Educação em Ciências.

A partir desse levantamento, foi possível identificar lacunas e necessidades atuais do ensino de Química, especialmente no que se refere à compreensão de estruturas moleculares e processos abstratos, fomentando as etapas de identificação do problema e desenvolvimento da solução tecnológica.

3.2 Identificação do Problema

Com base na análise bibliográfica, foi realizada a identificação do problema, que motivou a construção da solução. Foram avaliadas as dificuldades enfrentadas pelos estudantes no entendimento de estruturas tridimensionais, ligações químicas e geometria molecular, especialmente em contextos escolares com limitações de infraestrutura experimental.

A partir desse diagnóstico, foi formulada a hipótese de que uma abordagem imersiva apoiada por dispositivos vestíveis e realidade virtual poderia contribuir para melhorar a visualização espacial, favorecer a participação ativa do aluno e enriquecer o processo de ensino-aprendizagem em Química.

3.3 Desenvolvimento do Sistema

O sistema desenvolvido envolve dois aplicativos complementares que funcionam de maneira integrada: um aplicativo para *smartwatch*, executando o sistema operacional Wear OS, e um aplicativo para *smartphone*, utilizado para visualização em realidade virtual com o uso do Google Cardboard. O aplicativo do *smartwatch* foi projetado para capturar letras desenhadas na tela por meio de toques, convertendo cada traço em uma imagem que é enviada ao servidor em nuvem. Nesse servidor, a identificação dos símbolos utiliza o classificador desenvolvido por (AMORIM et al., 2025), responsável por interpretar os caracteres manuscritos enviados pelo relógio. O aplicativo do *smartphone*, por sua vez, recebe a resposta do servidor, identifica qual molécula corresponde ao símbolo desenhado e renderiza seu modelo tridimensional no ambiente imersivo.

Além desse fluxo principal de reconhecimento, o sistema também implementa um segundo fluxo de comunicação direta entre o *smartwatch* e a aplicação Unity, executada no *smartphone*. Esse fluxo é destinado exclusivamente ao envio de coordenadas e comandos gestuais, permitindo a manipulação interativa das moléculas tridimensionais, como rotação e movimentação, sem a necessidade de processamento adicional no servidor. Dessa forma, o *smartwatch* atua tanto como dispositivo de entrada simbólica quanto como controlador gestual do ambiente virtual.

A fase de desenvolvimento foi organizada em três módulos principais: entrada no *smartwatch*, processamento em servidor na nuvem e visualização em ambiente de realidade virtual. Essa estrutura modular foi escolhida por permitir a distribuição do processamento entre dispositivos com capacidades distintas: o *smartwatch* ficou responsável pela captura dos desenhos e pelo envio das imagens e coordenadas, enquanto o servidor concentrou o reconhecimento das letras. Já o módulo de visualização, executado diretamente no *smartphone*, é responsável pela renderização tridimensional das moléculas e pela integração com o Google Cardboard, garantindo viabilidade técnica e acesso ao ambiente de realidade virtual.

3.4 Testes Experimentais

Após a implementação, o sistema foi submetido a testes guiados por *frameworks* consolidados de usabilidade e experiência do usuário. Esses testes avaliaram a precisão do reconhecimento dos símbolos, a estabilidade da comunicação entre os módulos e a coerência da visualização tridimensional, utilizando diferentes moléculas para verificar a consistência entre a entrada no *smartwatch*, o processamento no servidor e a exibição no ambiente virtual.

3.5 Conclusão e Avaliação dos Resultados

Por fim, os resultados foram avaliados considerando critérios de interatividade, confiabilidade técnica e potencial pedagógico, com base em instrumentos consolidados de análise de usabilidade e experiência do usuário. Também foi examinada a viabilidade do sistema como ferramenta educacional complementar e sua aplicabilidade em contextos escolares interessados na integração de tecnologias digitais ao ensino de Química.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Este capítulo apresenta o desenvolvimento do protótipo do sistema e o experimento realizado com usuários, com o objetivo de verificar seu funcionamento em condições reais de uso. São descritos os componentes que compõem o sistema, incluindo o aplicativo para *smartwatch*, o servidor responsável pelo reconhecimento e identificação das moléculas, a comunicação direta entre *smartwatch* e *smartphone* para o envio de coordenadas e movimentação da molécula e o ambiente de visualização em realidade virtual. Esses elementos atuam de forma integrada para constituir um fluxo contínuo desde os gestos do estudante até a exibição tridimensional da estrutura molecular. Além do detalhamento técnico dos dispositivos utilizados e das etapas de captura, processamento e visualização, o capítulo discute o comportamento do protótipo durante os testes, com destaque para a estabilidade da comunicação e a usabilidade percebida pelos participantes.

4.1 Protótipo

A construção do protótipo teve como objetivo reunir os elementos necessários para testar a proposta do sistema, permitindo avaliar o comportamento dos dispositivos, do servidor e do ambiente de visualização em uso contínuo durante uma atividade prática de ensino de Química. Essa estrutura possibilitou verificar tanto o funcionamento individual de cada módulo quanto a integração entre eles, incluindo a transmissão de informações, as variações no desenho produzido pelo estudante, a estabilidade da comunicação com o servidor e a exibição tridimensional da molécula no dispositivo móvel.

Nesta seção, o protótipo é apresentado a partir de seus componentes e respectivas funções no sistema, abrangendo os mecanismos de captura da entrada, processamento dos dados e visualização, bem como as condições de operação observadas.

4.1.1 Visão Geral do Protótipo

O protótipo foi estruturado para que o estudante inicie a interação desenhando no relógio as letras que representam o símbolo químico. Essa etapa inicia-se no Samsung Galaxy Watch 4, dispositivo utilizado como módulo de entrada e que operou com sistema Wear OS, processador Dual-Core de 1.18 GHz, 1.5 GB de memória RAM, tela Super AMOLED de 1.4 polegadas, conectividade Wi-Fi, além de sensores como acelerômetro e giroscópio, responsáveis pela precisão da captura dos traços desenhados pelo estudante e por fazer a molécula girar no ambiente de realidade virtual. Após o registro da letra, a imagem é enviada ao módulo de processamento, que foi executado em um servidor configurado no Google Colaboratory, ou Colab¹. Esse ambiente disponibilizou CPU virtual e acesso à internet por túneis HTTPS por meio do Ngrok², possibilitando a execução contínua do modelo de reconhecimento implementado em Python com o framework Flask³ e uma Rede Neural Convolucional.

Com a letra identificada, o fluxo prossegue para o módulo de visualização, desenvolvido no Unity Engine 3D⁴ e executado em um *smartphone* POCO X5 5G. Esse dispositivo

¹ <<https://colab.google/>>

² <<https://ngrok.com/>>

³ <<https://flask.palletsprojects.com/>>

⁴ <<https://unity.com/>>

operou com Android 12, processador Qualcomm Snapdragon 695, 6 GB de memória RAM, 128 GB de armazenamento interno, tela AMOLED de 6.67 polegadas e sensores como giroscópio e acelerômetro, permitindo a exibição da molécula no Google Cardboard e o giro da molécula através dos movimentos do pulso do usuário. A finalidade principal desse fluxo é permitir que o usuário relate o símbolo químico à sua estrutura espacial utilizando um procedimento que combina gesto, processamento e visualização. O protótipo foi estruturado para apoiar o aprendizado ao oferecer acesso a modelos moleculares em três dimensões, contribuindo para a compreensão de formas, ligações e arranjos estruturais que não são observáveis em materiais bidimensionais. A Figura 3 mostra como esses dispositivos estão interligados.

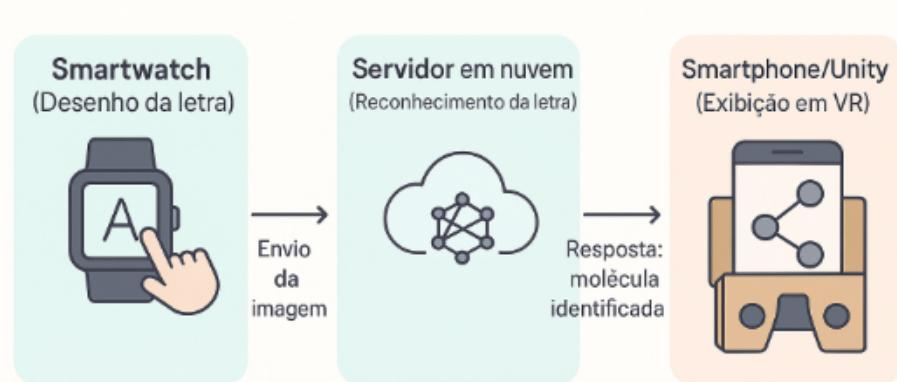


Figura 3 – Imagem mostrando a comunicação de um dispositivo para outro.

4.1.2 Reconhecimento e Processamento da Interação

O reconhecimento do símbolo químico desenhado no *smartwatch* constituiu a etapa central de articulação entre a interação do usuário e a visualização tridimensional. Após o desenho ser capturado como imagem, o arquivo é enviado ao servidor em nuvem, responsável por realizar o pré-processamento e classificá-lo utilizando uma Rede Neural Convolucional previamente desenvolvida (AMORIM et al., 2025) e treinada para identificar letras manuscritas.

A interação no relógio ocorre de forma direta, o usuário utiliza o dedo para traçar a letra desejada sobre a tela, realizando movimentos livres em diferentes direções. Esses gestos representam a etapa de entrada do sistema, permitindo que o estudante desenhe caracteres químicos de maneira manual, como se estivesse escrevendo no próprio dispositivo. A Figura 4 ilustra esse processo, destacando a possibilidade de deslocamento do traço para cima, para baixo, para a esquerda e para a direita durante o desenho.



Figura 4 – Exemplo de interação gestual no *smartwatch* para o desenho das letras.

O sistema dá suporte ao reconhecimento de quinze moléculas, todas pertencentes ao conjunto de compostos sem isomeria estrutural relevante:

- Ácido Sulfúrico (H_2SO_4)
- Água (H_2O)
- Amônia (NH_3)
- Dióxido de Enxofre (SO_2)
- Etanol (C_2H_6O)
- Formaldeído (CH_2O)
- Gás Carbônico (CO_2)
- Hexafluoreto de Enxofre (SF_6)
- Íon Amônia (NH_4^+)
- Metano (CH_4)
- Metanol (CH_3OH)
- Oxigênio (O_2)
- Sulfato (SO_4^{2-})
- Sulfeto de Hidrogênio (H_2S)
- Trifluoreto de Boro (BF_3)

Além do reconhecimento realizado pelo servidor, o sistema também utiliza uma segunda forma de comunicação independente da nuvem, destinada ao envio contínuo das coordenadas de movimento do pulso do usuário. Essa transmissão direta entre o *smartwatch* e o aplicativo de visualização no *smartphone* não passa pelo servidor, pois é utilizada exclusivamente para atualizar a orientação da molécula conforme o usuário movimenta o pulso. Dessa forma, o usuário consegue girar a molécula exibida no aplicativo ao movimentar o pulso que está usando o *smartwatch*, como exemplifica a Figura 5.

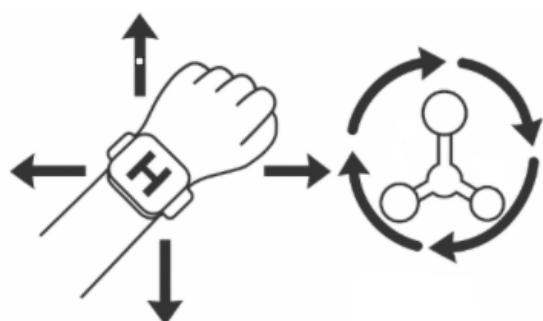


Figura 5 – Rotação da molécula no aplicativo de visualização ao girar com o pulso.

4.1.3 Desenvolvimento do Protótipo

O desenvolvimento do protótipo ocorreu de forma progressiva e orientada pela integração gradual entre os módulos. Inicialmente, a interface do *smartwatch* foi construída para garantir que os desenhos fossem capturados de modo consistente, assegurando que o usuário conseguisse registrar o símbolo químico de forma clara, reduzindo dificuldades na etapa de entrada e facilitando a associação entre gesto e representação química. Em seguida, o servidor em nuvem foi estruturado para receber as imagens enviadas, processá-las e classificá-las, de acordo com um modelo de reconhecimento previamente desenvolvido (AMORIM et al., 2025). Por fim, o aplicativo de visualização foi adaptado para interpretar corretamente as respostas enviadas pelo servidor, gerar e atualizar automaticamente as moléculas tridimensionais a partir dos modelos pré-configurados, oferecendo ao usuário a possibilidade de observar a organização espacial dos átomos e compreender aspectos estruturais que não são evidentes em materiais bidimensionais.

Ao longo de todo o processo, ajustes sucessivos foram realizados para melhorar a estabilidade da comunicação entre os dispositivos, otimizar o tempo de resposta e aprimorar a renderização no ambiente RV, com o objetivo de reduzir interrupções e tornar a experiência mais contínua para o usuário. Esse caráter iterativo foi essencial para garantir que o sistema funcionasse como uma cadeia integrada, na qual cada etapa dependia do sucesso da anterior, formando assim um fluxo contínuo entre o gesto inicial e a percepção visual no ambiente imersivo.

4.1.4 Interação com o Ambiente Virtual

A interação com o ambiente virtual ocorreu por meio do aplicativo instalado diretamente no *smartphone*, que, acoplado ao Google Cardboard, funcionou como o dispositivo responsável pela visualização tridimensional. Assim que o servidor conclui o reconhecimento da letra, o aplicativo de visualização carrega a molécula correspondente e a posiciona no espaço tridimensional para exploração visual. A Figura 6 apresenta a molécula de etanol sendo identificada no ambiente virtual. A rotação da molécula pode ser realizada por meio dos movimentos naturais do pulso, captados pelo giroscópio do *smartwatch*, permitindo uma observação imersiva das ligações químicas, das geometrias moleculares e da distribuição espacial dos átomos.

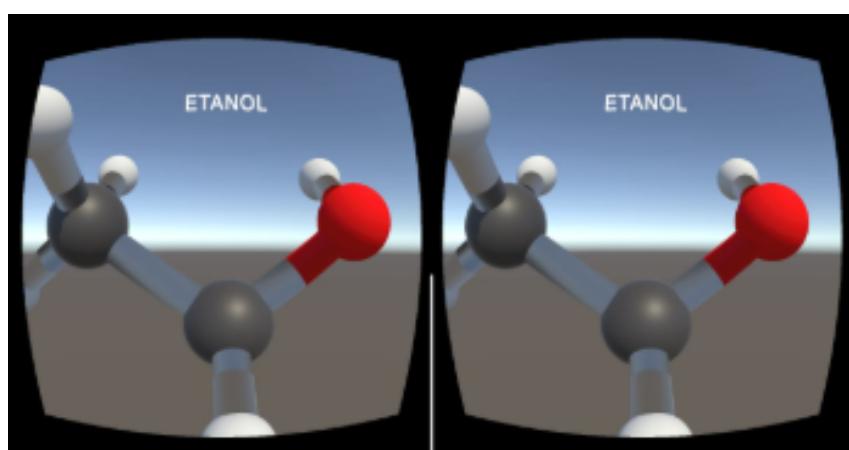


Figura 6 – Molécula de etanol representada em três dimensões no aplicativo de visualização.

A simplicidade desse modo de interação, que não exige controladores adicionais ou interfaces complexas, permite que o protótipo possa ser executado em dispositivos

pessoais dos estudantes, mantendo a experiência possível mesmo em contextos com recursos limitados.

4.1.5 Google Cardboard

O Google Cardboard⁵ ocupou um papel fundamental, pois foi o dispositivo que permitiu transformar o *smartphone* em um visor de realidade virtual capaz de exibir as moléculas em três dimensões. Sua adoção possibilitou que a experiência de RV fosse realizada como recurso de baixo custo, uma vez que o próprio suporte físico foi feito a mão, artesanalmente, e utilizando apenas o celular e eliminando a necessidade de equipamentos especializados. Essa característica favorece a implementação do sistema em contextos educacionais variados, sem depender de laboratórios ou infraestrutura avançada. A Figura 7 apresenta o molde construído.

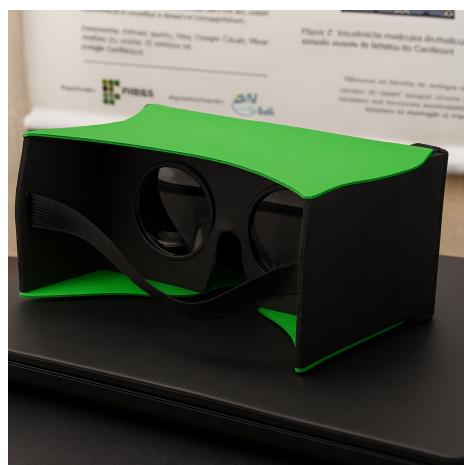


Figura 7 – Suporte físico construído artesanalmente para o Google Cardboard.

Ao ser acoplado ao *smartphone*, o Cardboard permitiu que o aplicativo de visualização utilizasse os sensores do aparelho para ajustar o campo de visão conforme o movimento do *smartwatch* no pulso do usuário. Essa forma de navegação possibilita observar a molécula em diferentes ângulos apenas movendo o pulso, reforçando a relação entre movimento e compreensão espacial. A exibição imersiva proporcionada pelo Cardboard contribui para a exploração visual da molécula identificada pelo sistema.

4.2 Experimento e Resultados

Para avaliar a usabilidade e a experiência de uso do sistema proposto, foi realizado um experimento com 11 participantes, com idades entre 19 e 41 anos, dos quais 7 eram estudantes e 4 eram professores do curso de Licenciatura em Química. A diversidade da amostra permitiu analisar o protótipo sob diferentes perspectivas acadêmicas, tanto de futuros docentes quanto de docentes já atuantes no ensino. Além da identificação de perfil, os participantes foram questionados sobre sua familiaridade com interação natural por meio de gestos em dispositivos vestíveis. Três deles relataram não possuir qualquer experiência com esse tipo de interação, três se classificaram como iniciantes, três possuíam experiência intermediária e apenas dois apresentaram experiência avançada. Essa heterogeneidade foi um fator importante para avaliar o sistema diante de distintos níveis de fluência tecnológica.

⁵ <<https://arvr.google.com/cardboard/>>

Ressalta-se que a participação no experimento ocorreu de forma voluntária, sem qualquer obrigatoriedade ou vínculo com avaliação acadêmica. Todos os participantes foram convidados a colaborar espontaneamente, podendo desistir da atividade a qualquer momento, sem prejuízo. As respostas obtidas nos questionários foram registradas de forma anônima, garantindo a privacidade e confidencialidade das informações coletadas, buscando respeitar os princípios éticos fundamentais e recomendados.

Antes do início do experimento, os participantes receberam uma explicação padronizada sobre o funcionamento do sistema e sobre os gestos necessários para a interação no *smartwatch*. Foi orientado que o envio do desenho parcial fosse realizado pressionando um dedo sobre a tela, enquanto o envio final para reconhecimento da letra e identificação da molécula fosse feito com o gesto de dois dedos, garantindo assim consistência no fluxo de interação. Essa padronização inicial foi fundamental para evitar variações na execução dos comandos e para assegurar que todos os usuários realizassem as mesmas ações ao longo do teste.

Da mesma forma, para garantir homogeneidade na avaliação, todos os participantes desenharam as mesmas três moléculas: água (H_2O), amônia (NH_3) e etanol (C_2H_6O). A escolha dessas moléculas seguiu o critério de complexidade crescente, permitindo observar como os usuários lidavam tanto com gestos simples quanto com gestos um pouco mais elaborados, mantendo ao mesmo tempo comparabilidade entre os resultados.

Após a etapa de desenho e envio dos gestos ao servidor, cada participante visualizou a molécula correspondente no ambiente de realidade virtual utilizando o suporte do Google Cardboard. Durante essa etapa, eles puderam rotacionar e manipular o modelo tridimensional movendo naturalmente o pulso, explorando a estrutura da molécula de maneira interativa e intuitiva.

Para o registro das respostas dos questionários aplicados, foi adotada uma escala Likert de 1 a 10, na qual valores mais altos indicam avaliações mais positivas. Essa escolha buscou oferecer maior sensibilidade na coleta das percepções dos participantes, permitindo distinguir o uso do sistema, além de facilitar a interpretação para usuários com distintos perfis de familiaridade tecnológica.

Ao final da atividade prática, todos os participantes responderam ao questionário *System Usability Scale* (SUS) (BROOKE, 1995) e ao *User Experience Questionnaire - Short Version* (UEQ-S) (SCHREPP; HINDERKS; THOMASCHEWSKI, 2017). A aplicação conjunta desses instrumentos permitiu avaliar simultaneamente a usabilidade objetiva e a experiência subjetiva proporcionadas pelo sistema.

4.2.1 *System Usability Scale* (SUS)

A Tabela 1 apresenta as dez questões utilizadas no questionário *System Usability Scale* (SUS) aplicado aos participantes, enquanto a Figura 8 apresenta as médias atribuídas a cada item. Para interpretar esses resultados, utiliza-se também a classificação qualitativa proposta por (BANGOR, 2009), que auxilia na compreensão do quanto aceitável ou intuitivo um sistema é percebido pelos usuários. Na sequência, é apresentada a análise individual de cada questão considerando as respostas dos 11 participantes, 7 alunos e 4 professores.

Tabela 1 – Itens do questionário SUS e indicação de questões positivas (↑) e negativas (↓).

Nº	Perguntas	Tipo
Q1	Eu utilizaria o sistema para visualizar e explorar conteúdos de Química no meu dia a dia.	↑
Q2	Acho o sistema desnecessariamente complexo.	↓
Q3	Achei o sistema intuitivo e fácil de usar.	↑
Q4	Acho que precisaria da ajuda de uma pessoa com conhecimento técnico para utilizar o método.	↓
Q5	Acho que as diversas funções do sistema estão bem integradas.	↑
Q6	Acho que o sistema apresenta muita inconsistência.	↓
Q7	Imagino que as pessoas aprenderão a usar este sistema rapidamente.	↑
Q8	Achei o sistema muito complicado de usar.	↓
Q9	Eu me senti confiante em usar o sistema.	↑
Q10	Precisei aprender várias coisas antes de usar o sistema.	↓

A Q1, que avalia a frequência de uso do sistema pelo usuário, obteve média 8,63, indicando grande disposição em adotar a ferramenta em atividades reais. Esse valor mostra que os participantes perceberam o sistema como útil e aplicável. Na Q2, que afirma que o sistema seria desnecessariamente complexo, apresentou média 8,86. Por ser uma afirmação negativa, esse resultado demonstra que os usuários não consideraram o sistema complexo, e sim simples e direto. A Q3, referente à facilidade de uso, recebeu média 9,09, uma das mais altas do conjunto, reforçando que a interação foi vista como intuitiva e pouco exigente cognitivamente.

Já a Q4, que avalia a necessidade de ajuda técnica, apresentou a menor média entre todas as questões (5,00). Apesar de indicar que alguns usuários sentiram necessidade de uma orientação inicial para compreender o funcionamento do sistema, isso não comprometeu a experiência geral. Pelo contrário, a pontuação sugere que, após um breve momento de familiarização, os participantes conseguiram utilizar o sistema de forma autônoma, o que é esperado em interfaces que dependem de gestos ou novas formas de interação. Assim, mesmo com essa demanda inicial por suporte, a usabilidade percebida permaneceu elevada. A Q5, que aborda a integração das funções, atingiu média 8,63, mostrando que os participantes perceberam coerência e continuidade no processo de desenhar, enviar e visualizar a molécula.

A Q6, que trata da presença de inconsistências, apresentou média 9,54, uma das maiores do questionário. Como é uma questão negativa, esse valor indica que os participantes praticamente não perceberam falhas ou comportamentos inesperados. A Q7, que questiona se outras pessoas aprenderiam a usar o sistema rapidamente, recebeu média 9,32, revelando percepção de aprendizado rápido. Na Q8, que afirma que o sistema é complicado, também obteve 9,32, reforçando que os usuários não consideraram o sistema difícil de utilizar. A Q9, que avalia a confiança do usuário durante o uso, apresentou média 9,32, indicando que os participantes se sentiram seguros ao interagir com o *smartwatch* e o ambiente virtual. Por fim, a Q10, que afirma que seria necessário aprender muitas coisas antes de usar o sistema, obteve a maior média do conjunto (9,77). Isso demonstra que os participantes perceberam o sistema como fácil de compreender e utilizar, não exigindo conhecimento prévio substancial.

Além das questões oficiais, uma pergunta adicional foi incluída para avaliar a intenção de uso pedagógico: “Eu utilizaria este sistema em minhas aulas”. Dos 11 participantes, 11 responderam que sim, e apenas 1 aluno respondeu que não, justificando

que não atuará no ensino de Química futuramente. Esse resultado reforça o potencial educacional da ferramenta, indicando que sua adoção é percebida como viável e relevante no contexto de ensino.

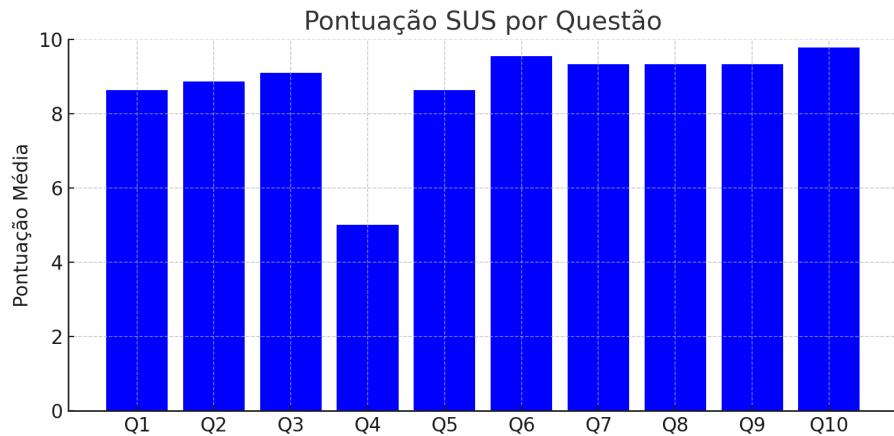


Figura 8 – Médias atribuídas às questões do SUS pelos participantes.

No conjunto, as médias apresentadas na Figura 8 mostram que os participantes avaliaram o sistema como fácil e consistente, alinhando-se às categorias mais positivas da escala qualitativa de usabilidade descrita por (BANGOR, 2009), que propõem uma escala adjetiva que traduz as pontuações numéricas do SUS em descrições qualitativas, permitindo interpretar a experiência do usuário de maneira mais intuitiva. Conforme mostra a Tabela 2, a pontuação obtida neste estudo enquadra o sistema na categoria *Excellent* (excelente), indicando um alto nível de usabilidade percebida pelos participantes.

Tabela 2 – Classificação adjetiva do SUS e resultado obtido neste estudo.

0–25	<i>Worst Imaginable</i> (pior imaginável)
26–39	<i>Poor</i> (ruim)
40–52	<i>OK</i> (regular)
53–73	<i>Good</i> (bom)
74–85	<i>Excellent</i> (excelente)
86–100	<i>Best Imaginable</i> (melhor imaginável)
Pontuação obtida neste estudo	<i>Excellent</i> (excelente)

4.2.2 User Experience Questionnaire - Short Version (UEQ-S)

A Tabela 3 apresenta os oito itens do *User Experience Questionnaire - Short Version* (UEQ-S) utilizados na avaliação, estruturados em forma de diferenciais semânticos que vão de -3 a $+3$, permitindo medir tanto a Qualidade Pragmática (relacionada à facilidade, clareza e eficiência) quanto a Qualidade Hedônica (ligada à atratividade e interesse do usuário ao interagir com o sistema). As médias atribuídas pelos participantes a cada um dos itens estão apresentadas na Figura 8, permitindo analisar a experiência subjetiva de forma detalhada.

Tabela 3 – Itens do questionário UEQ-S.

Item	Par de Adjetivos	Item	Par de Adjetivos
I1	Obstrutivo / Construtor	I5	Chato / Empolgante
I2	Complicado / Fácil	I6	Desinteressante / Interessante
I3	Ineficiente / Eficiente	I7	Convencional / Original
I4	Confuso / Claro	I8	Comum / Pioneiro

Os quatro primeiros itens compõem a dimensão Qualidade Pragmática, que avalia o quanto o sistema auxilia o usuário e o quanto funcional ele se mostra. O item I1 obteve média 2,9, indicando que os participantes perceberam o sistema como altamente favorável ao suporte das atividades, facilitando a realização das tarefas. Esse valor revela que o fluxo de interação, composto por desenhar o gesto, enviá-lo e visualizar a molécula, foi visto como bem conduzido pela interface. No item I2, a média 2,2 demonstra que os participantes avaliaram o sistema como fácil de usar, mesmo com diferentes níveis de experiência prévia com *smartwatches*. A execução dos gestos, o envio das imagens e a visualização das moléculas foram percebidos como ações simples e pouco exigentes cognitivamente. O item I3 apresentou média 2,5, indicando que o sistema foi percebido como eficiente, respondendo de forma ágil e consistente ao reconhecimento dos desenhos e à manipulação das moléculas. Esse resultado reforça a fluidez operacional entre *smartwatch*, servidor e ambiente virtual. No item I4, foi registrada média 2,0, mostrando que o sistema foi considerado claro, com compreensão suficiente para guiar o usuário durante a atividade. Embora esta seja a menor média da dimensão pragmática, ainda assim indica percepção de clareza acima do padrão esperado para tecnologias baseadas em gestos.

Os demais itens pertencem à dimensão Qualidade Hedônica, que avalia aspectos relacionados ao prazer e ao envolvimento do usuário. O item I5 obteve média 2,6, revelando que os usuários consideraram a experiência empolgante, especialmente por combinar *smartwatch*, desenho gestual e visualização imersiva em realidade virtual. O item I6 obteve média 3,0, a maior entre todos os itens do UEQ-S. Isso evidencia que a solução foi vista como altamente interessante, despertando curiosidade pela forma diferenciada de interação e pela visualização tridimensional das moléculas. Já o item I7, com média 2,5, mostra que os usuários perceberam o sistema como uma proposta distinta dos recursos normalmente utilizados em sala de aula, especialmente quando comparado a métodos tradicionais de ensino de Química. Por fim, o item I8 registrou média 2,0, indicando que o sistema foi percebido como uma solução tecnologicamente avançada, embora um pouco menos marcante que os itens ligados ao interesse e empolgação.

A síntese dessas dimensões é apresentada na Figura 9, que reúne os valores médios da Qualidade Pragmática (2,409), da Qualidade Hedônica (2,523) e da média geral (2,466). Esses valores representam o desempenho agregado do sistema e servem como ponto de partida para comparação com o *benchmark* internacional definido para o UEQ-S.

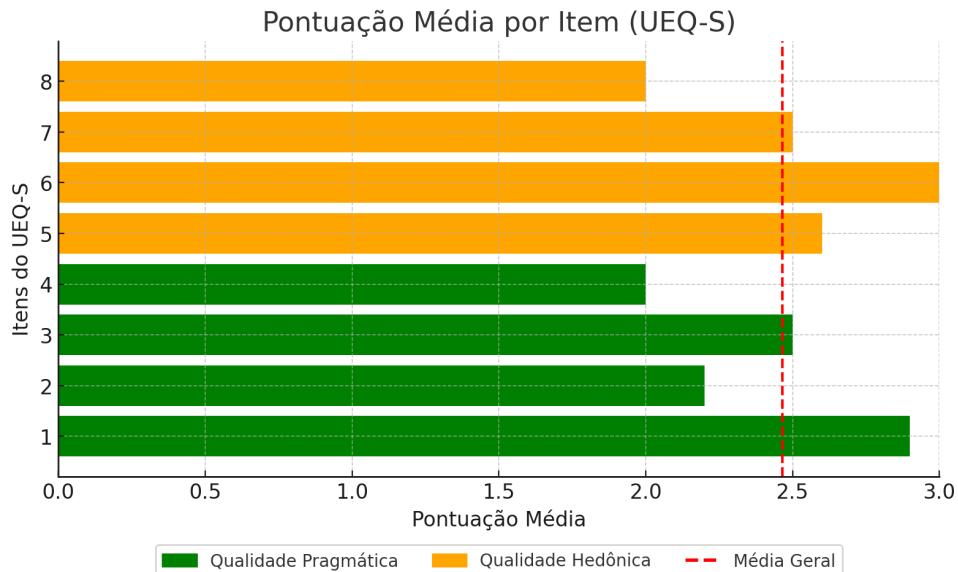


Figura 9 – Médias das dimensões do UEQ-S obtidas no experimento.

A Figura 10 apresenta o gráfico utilizado no UEQ-S para comparar o desempenho de um sistema com as faixas de qualidade estabelecidas no *benchmark*. Essas faixas, denominadas Limite Inferior, Ruim, Abaixo da Média, Acima da Média, Bom e Excelente, são representadas por camadas coloridas, o que permite visualizar rapidamente a posição de cada dimensão em relação aos resultados de centenas de estudos anteriores.

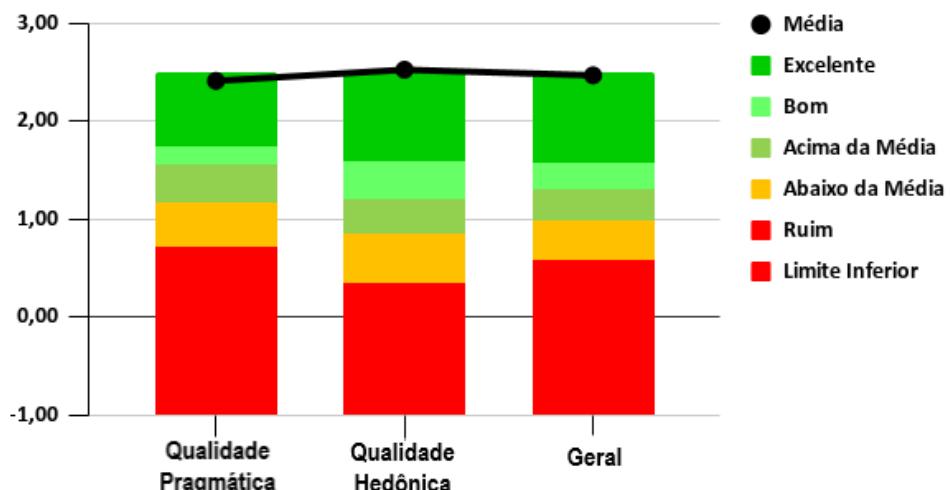


Figura 10 – Comparação das pontuações do UEQ-S com as faixas de qualidade do *benchmark*.

Ao analisar o gráfico da Figura 10, observa-se que tanto a Qualidade Pragmática quanto a Qualidade Hedônica situam-se dentro da faixa Excelente, ultrapassando amplamente os limiares superiores de referência. A média acompanha esse desempenho, também posicionada dentro da categoria Excelente. Esse resultado indica que, considerando um conjunto amplo de produtos avaliados com o UEQ-S, o sistema desenvolvido se encontra entre os 10% melhores em termos de experiência do usuário.

No *benchmark* oficial do UEQ-S, valores acima de 1,50 já são considerados “Acima da Média”, enquanto pontuações superiores a 1,80 entram no intervalo Bom e pontuações

acima de 2,00 pertencem à faixa “Excelente”. No caso deste estudo, todas as dimensões ultrapassam com folga o valor de 2,0, evidenciando que o sistema proporciona uma experiência extremamente positiva tanto nos aspectos funcionais, como facilidade, clareza e eficiência, quanto nos aspectos hedônicos, como a forma não convencional de interação.

Essa comparação permite concluir que a solução proposta não apenas atende aos requisitos de usabilidade e experiência, mas se destaca quando comparada a outros sistemas avaliados internacionalmente com o UEQ-S. A combinação entre desenho gestual, envio automatizado ao servidor e visualização imersiva em realidade virtual mostrou-se eficaz e envolvente para os participantes, independentemente do nível de familiaridade tecnológica declarado inicialmente.

Assim, os resultados do *benchmark* reforçam que o sistema possui maturidade e potencial para uso real em ambientes educacionais, oferecendo uma experiência que vai além do mínimo aceitável e aproxima-se do desempenho observado em tecnologias de referência.

De forma integrada, os resultados obtidos pelo SUS e pelo UEQ-S convergem para a mesma conclusão: o sistema apresenta boa usabilidade e proporciona uma experiência de uso positiva. No SUS, a pontuação global enquadrou o sistema na categoria *Excellent* da escala adjetiva, indicando que os participantes consideraram a solução fácil e funcional. No UEQ-S, tanto a Qualidade Pragmática quanto a Qualidade Hedônica ficaram dentro da faixa Excelente do *benchmark*, superando com folga os valores típicos observados em outros sistemas avaliados. Enquanto o SUS evidencia que o sistema é sólido, eficiente e intuitivo do ponto de vista da usabilidade, o UEQ-S complementa essa análise ao mostrar que a experiência é também envolvente e distinta dos métodos tradicionais.

5 CONCLUSÃO

Este trabalho apresentou a concepção, implementação e avaliação de um sistema integrado para reconhecimento de desenhos em *smartwatches* e visualização tridimensional de moléculas em realidade virtual. A solução foi desenvolvida com foco na viabilidade técnica e na integração entre diferentes dispositivos, utilizando um *smartwatch* com WearOS para captura dos gestos, um servidor remoto para processamento dos desenhos e um ambiente imersivo baseado em Google Cardboard para exibir as estruturas moleculares em 3D, combinando desenho gestual, reconhecimento automatizado e manipulação espacial por sensores iniciais para explorar conceitos fundamentais de Química.

Os resultados obtidos no experimento com 11 participantes, incluindo 7 estudantes e 4 professores da área de Química com diferentes níveis de familiaridade tecnológica, demonstram que o sistema foi bem recebido e facilmente compreendido após uma breve orientação inicial. A análise pelo SUS (*System Usability Scale*) revelou médias elevadas para quase todas as questões, indicando percepção de consistência, facilidade de uso e fluidez no fluxo de interação.

De forma complementar, o UEQ-S (*User Experience Questionnaire - Short Version*) reforçou essa avaliação positiva. Tanto a Qualidade Pragmática quanto a Qualidade Hedônica apresentaram valores que posicionam o sistema no patamar mais alto do *benchmark* internacional, mostrando que a solução não apenas funciona adequadamente do ponto de vista operacional, mas também desperta interesse e engajamento, aspectos essenciais em aplicações educacionais imersivas.

Além disso, a pergunta adicional sobre a adoção pedagógica demonstrou alto potencial de aplicabilidade prática: 10 dos 11 participantes afirmaram que utilizariam a ferramenta em suas aulas, e apenas um aluno respondeu que não, justificando que não atuaria na química futuramente, indicando que o sistema é percebido como útil, viável e relevante para o contexto do ensino de Química.

De forma integrada, os resultados do SUS e do UEQ-S mostram que o sistema apresenta alta usabilidade e uma experiência de uso muito positiva. No SUS, os participantes destacaram a facilidade e consistência do fluxo de interação, enquanto no UEQ-S as dimensões funcional e hedônica também foram bem avaliadas. Assim, ambos os instrumentos se complementam ao confirmar que a proposta oferece uma experiência sólida e adequada ao contexto educacional.

Diante desses resultados, conclui-se que a integração entre *smartwatch*, reconhecimento de desenho e realidade virtual representa uma abordagem promissora para atividades didáticas envolvendo estruturas moleculares. A qualidade da experiência relatada pelos participantes e a aceitação demonstrada ao longo do experimento confirmam que o sistema possui maturidade para ser utilizado em contextos educacionais e servir como base para futuras pesquisas e aprimoramentos.

Além disso, pesquisas futuras podem focar-se em expandir o conjunto de moléculas reconhecidas, aprimorar os algoritmos de processamento de imagem, integrar novos tipos de gestos ou sensores do smartwatch e avaliar o sistema em contextos educacionais reais, investigando seu impacto na aprendizagem e no engajamento dos estudantes.

Como possibilidade adicional de evolução, modelos de linguagem de grande escala (*Large Language Models – LLMs*) poderiam ser incorporados como uma camada pedagógica complementar, permitindo que o sistema ofereça explicações em linguagem natural sobre as moléculas visualizadas, responda dúvidas conceituais dos estudantes e atue como um

tutor interativo dentro do ambiente imersivo.

Referências

- AMARAL, L. et al. Interactive educational game for chemistry in virtual reality with user gesture interactions via smartwatches. In: *Symposium on Virtual and Augmented Reality*. ACM, 2024. (SVR 2024), p. 294–298. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1145/3691573.3691610>>. Citado 2 vezes nas páginas 2 e 8.
- AMIRBEKOVA, E.; SHERTAYEVA, N.; MIRONOVA, E. Teaching chemistry in the metaverse: the effectiveness of using virtual and augmented reality for visualization. *Frontiers in Education*, v. 8, p. 1184768, 2024. Citado na página 7.
- AMORIM, E. et al. Enhancing chemistry education: Evaluating methods for classifying hand-drawn molecules and generating 3d visualizations. In: *2025 IEEE 49th Annual Computers, Software, and Applications Conference (COMPSAC)*. IEEE, 2025. p. 105–110. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1109/COMPSAC65507.2025.00022>>. Citado 5 vezes nas páginas 2, 8, 11, 13 e 15.
- Android Developers. *Visão geral dos dispositivos dedicados*. 2025. <<https://developer.android.com/work/dedicated-devices>>. Última atualização em 26 jul. 2025. Acesso em: 2025. Citado na página 8.
- ATKINS, P.; JONES, L.; LAVERMAN, L. *Principles of Chemistry: Questioning Modern Life and the Environment*. Porto Alegre: Bookman Publishing, 2018. Citado 3 vezes nas páginas 1, 4 e 5.
- BANGOR, P. T. K. e. J. T. M. A. Determinando o significado das pontuações individuais do sus: adicionando uma escala de classificação adjetiva. *Journal of Usability Studies archive*, v. 4, p. 114–123, 2009. Disponível em: <<https://api.semanticscholar.org/CorpusID:7812093>>. Citado 2 vezes nas páginas 17 e 19.
- BOGIANNIDIS, N.; SOUTHCOTT, J.; GINDIDIS, M. An exploration of the possible educational opportunities and the challenges at the intersection of the physical and digital worlds occupied by 10–14 year-old students. *Smart Learning Environments*, v. 10, 2023. Citado na página 5.
- BRASIL. *Base Nacional Comum Curricular: Educação é a Base*. Brasília: [s.n.], 2018. Ministério da Educação. Disponível em <https://basenacionalcomum.mec.gov.br/>. Citado na página 5.
- BROOKE, J. Sus: A quick and dirty usability scale. *Usability Eval. Ind.*, v. 189, 11 1995. Citado na página 17.
- COBAN, M.; BOLAT, Y. I.; GOKSU, I. The potential of immersive virtual reality to enhance learning: A meta-analysis. *Educational Research Review*, v. 36, p. 100452, 2022. ISSN 1747-938X. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1747938X22000215>>. Citado na página 9.
- FALAH, S. A. A. A.; AQA, R. F. S. A. Effects of virtual and augmented reality in chemistry education: Systematic literature review. *Technology*, v. 7, n. 1, 2024. Citado na página 1.

- FOMBONA-PASCUAL, A.; FOMBONA, J.; VÁZQUEZ-CANO, E. Vr in chemistry, a review of scientific research on advanced atomic/molecular visualization. *Chemistry Education Research and Practice*, v. 23, n. 2, p. 300–312, 2022. Citado 2 vezes nas páginas 1 e 6.
- FOMBONA-PASCUAL, A.; FOMBONA, J.; VICENTE, R. Augmented reality, a review of a way to represent and manipulate 3d chemical structures. *Journal of Chemical Information and Modeling*, ACS Publications, v. 62, n. 8, p. 1863–1872, 2022. Citado na página 1.
- GUNGOR, A. et al. The use of virtual reality in a chemistry lab and its impact on students' self-efficacy, interest, self-concept and laboratory anxiety. *Eurasia Journal of Mathematics, Science and Technology Education*, v. 18, n. 3, 2022. Citado na página 6.
- GURULOO, T. N. M.; OSMAN, K. Integrating virtual reality laboratories (vrls) in chemistry education: A systematic literature review. *International Journal of Education*, v. 15, n. 4, p. 1–?, 2024. Citado na página 6.
- MEDEIROS, M. A. C. d. et al. Virtual reality applied to chemistry teaching. *Brazilian Journal of Development*, v. 7, n. 6, p. 61770–61785, Jun. 2021. Citado 2 vezes nas páginas 1 e 2.
- MIN, J.; JEON, S.; KIM, Y. Wearable user interfaces for smart education: The effect of gesture-based interaction on learning and engagement. *Sensors*, v. 19, n. 19, p. 4189, 2019. Citado 2 vezes nas páginas 2 e 7.
- MORAN, J. M. Active methodologies for innovative education. In: BACICH, L.; MORAN, J. M. (Ed.). *Active methodologies for innovative education: A theoretical-practical approach*. Porto Alegre: Penso, 2015. p. 15–33. Citado 3 vezes nas páginas 2, 5 e 8.
- NASCIMENTO, T. H. et al. Mazevr: Immersion and interaction using google cardboard and continuous gesture recognition on smartwatches. In: *The 28th International ACM Conference on 3D Web Technology*. ACM, 2023. (Web3D '23), p. 1–5. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1145/3611314.3615912>>. Citado 2 vezes nas páginas 2 e 8.
- NASCIMENTO, T. H. et al. Method for text input with google cardboard: An approach using smartwatches and continuous gesture recognition. In: *2017 19th Symposium on Virtual and Augmented Reality (SVR)*. [S.l.: s.n.], 2017. p. 223–226. Citado 2 vezes nas páginas 2 e 9.
- OECD. *OECD digital education outlook 2023*. Paris Cedex, France: Organization for Economic Co-operation and Development (OECD), 2023. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1787/c74f03de-en>>. Citado na página 5.
- RADIANTI, J. et al. A systematic review of immersive virtual reality applications for higher education: Design elements, lessons learned, and research agenda. *Computers Education*, v. 147, p. 103778, 2020. ISSN 0360-1315. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0360131519303276>>. Citado 2 vezes nas páginas 2 e 9.
- RAHMAN, H. et al. Game-based learning in metaverse: Virtual chemistry classroom for chemical bonding for remote education. *Education and Information Technologies*, Springer

- Science and Business Media LLC, v. 29, n. 15, p. 19595–19619, mar. 2024. ISSN 1573-7608. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1007/s10639-024-12575-5>>. Citado na página 7.
- RODRIGUES, A. F. Economic feasibility of virtual reality technologies in education: Challenges and solutions. *Education and Information Technologies*, v. 28, n. 1, p. 73–88, 2023. Citado na página 2.
- SCHREPP, M.; HINDERKS, A.; THOMASCHEWSKI, J. Design and evaluation of a short version of the user experience questionnaire (ueq-s). *International Journal of Interactive Multimedia and Artificial Intelligence*, v. 4, p. 103, 01 2017. Citado na página 17.
- SIMÓN-SÁNCHEZ, M.-T.; FERNÁNDEZ-SÁNCHEZ, M.-R. Emerging technologies for a digital education project: A systematic review on augmented reality and cultural-historical heritage. *Education in the Knowledge Society (EKS)*, Ediciones Universidad de Salamanca, v. 24, p. e30613, nov. 2023. ISSN 2444-8729. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.14201/eks.30613>>. Citado na página 5.
- STOWE, R. L. et al. Impact of maintaining assessment emphasis on three-dimensional learning as organic chemistry moved online. *Journal of Chemical Education*, American Chemical Society (ACS), v. 97, n. 9, p. 2408–2420, ago. 2020. ISSN 1938-1328. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1021/acs.jchemed.0c00757>>. Citado 2 vezes nas páginas 1 e 7.
- TABER, K. S. *Progressing science education*. 2009. ed. Dordrecht, Netherlands: Springer, 2009. (Contemporary Trends and Issues in Science Education). Citado 2 vezes nas páginas 1 e 5.
- UNESCO. *Global Education Monitoring Report 2023: Technology in education: A tool on whose terms?* GEM Report UNESCO, 2023. ISBN 9789231006098. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.54676/UZQV8501>>. Citado na página 6.
- VALENTE, J. A. *Digital technologies and the construction of a new learning culture*. Campinas: Unicamp, 2019. Citado 2 vezes nas páginas 2 e 8.
- VARELA, F. J.; THOMPSON, E.; ROSCH, E. *The embodied mind: Cognitive science and human experience*. [S.l.]: MIT press, 1992. Citado 2 vezes nas páginas 2 e 7.
- WEISER, M. The computer for the 21 st century. *ACM SIGMOBILE Mobile Computing and Communications Review*, Association for Computing Machinery (ACM), v. 3, n. 3, p. 3–11, jul. 1999. ISSN 1931-1222. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1145/329124.329126>>. Citado na página 7.