

REALIDADE VIRTUAL EM ESTUDOS PROJETUAIS DE GEOMETRIA SOLAR E ILUMINAÇÃO NATURAL: OPORTUNIDADES E DESAFIOS PARA O ENSINO

VIRTUAL REALITY IN DESIGN STUDIES ON SOLAR GEOMETRY AND DAYLIGHTING: OPPORTUNITIES AND CHALLENGES FOR EDUCATION

João Victor de Souza Lima¹

Allan Jhonathan Mesiano²

César Imai³

Resumo

A aplicação da geometria solar e da iluminação natural no ensino de arquitetura enfrenta desafios de representação que podem ser atenuados pelas experiências imersivas proporcionadas pela realidade virtual (RV). Este estudo objetiva investigar a aplicação da RV para o ensino desses fenômenos no contexto do projeto arquitetônico, por meio de uma revisão de escopo que analisou 39 estudos sobre iluminação natural e realidade virtual, publicados entre 2015 e 2025 nas principais bases científicas. A análise qualitativa temática identificou duas vertentes: pesquisas que utilizam a RV para avaliar parâmetros arquitetônicos e condições ambientais, e aquelas que a aplicam como apoio ao processo projetual. Os resultados apontam que a RV amplia a compreensão dos efeitos da iluminação natural e contribui para a tomada de decisão, especialmente ao combinar métricas objetivas e percepções subjetivas. Persistem, contudo, barreiras de acesso que limitam sua adoção em larga escala e limitações técnicas quanto à representação de ofuscamento e adaptação de foco ocular. Por fim, evidencia-se a escassez de estudos que integrem a iluminação natural com a insolação e com a iluminação artificial, especialmente no contexto educacional.

Palavras-chave: realidade virtual; geometria solar; iluminação natural; ensino; projeto.

Abstract

The application of solar geometry and daylighting in architectural education faces representation challenges that may be mitigated by the immersive experiences provided by virtual reality (VR). This study aims to investigate the application of VR for teaching these phenomena within the context of the architectural design process through a scoping review that analyzed 39 studies on daylighting and virtual reality, published between 2015 and 2025 in major scientific databases. The qualitative thematic analysis identified two main strands: studies that use VR to evaluate architectural parameters and environmental conditions, and those that apply it as support for the design process. The results indicate that VR enhances the understanding of daylighting effects and supports decision-making, particularly by combining objective metrics with subjective perceptions. However, access barriers that limit large-scale

¹ Mestre em Arquitetura e Urbanismo, Universidade Estadual de Londrina (UEL), Londrina, Paraná, Brasil, joao.victorlima@uel.br; ORCID: 0000-0003-1089-4944.

² Graduado em Arquitetura e Urbanismo, Universidade Estadual de Londrina (UEL), Londrina, Paraná, Brasil, allan.jmesiano@uel.br; ORCID: 0009-0005-9198-4109.

³ Doutor em Arquitetura e Urbanismo, Universidade Estadual de Londrina (UEL), Londrina, Paraná, Brasil, cimai@uel.br; ORCID: 0000-0002-6959-4420

adoption persist, as well as technical limitations regarding the representation of glare and ocular focus adaptation. Finally, the review reveals a scarcity of studies that integrate daylighting with solar exposure and artificial lighting, particularly in educational contexts.

Keywords: virtual reality; solar geometry; daylighting; education; design.

1. Introdução

A incorporação das condições climáticas no processo de projeto arquitetônico é reconhecida como fundamental para alcançar eficiência energética, sustentabilidade e qualidade ambiental dos espaços. Estudos apontam que, diante da tendência de aumento do consumo de energia para resfriamento em cenários futuros, é necessário considerar variáveis climáticas desde as fases iniciais de concepção para mitigar demandas energéticas e melhorar o conforto dos usuários (Invidiata; Ghisi, 2016; Triana; Lamberts; Sassi, 2018). Nesse contexto, a geometria solar ocupa papel central, sobretudo em climas tropicais e subtropicais, onde o controle da radiação solar impacta diretamente tanto o conforto térmico quanto a redução da dependência de climatização artificial (Nunes; Giglio, 2022). Dentre os parâmetros relacionados à geometria solar, o sombreamento externo tem se mostrado especialmente relevante para reduzir a demanda por climatização, superando inclusive soluções tecnológicas aplicadas ao vidro (Cho; Yoo; Kim, 2014; Dias *et al.*, 2023; Lopes *et al.*, 2023).

Apesar de sua relevância, a aplicação da geometria solar e da iluminação natural no ensino e no processo projetual enfrenta desafios no âmbito da representação e integração ao processo projetual. A tradução do percurso solar aparente para uma lógica geométrica, como nas cartas solares, exige alto grau de abstração e dificulta a compreensão por parte dos estudantes, o que demanda recursos didáticos mais visuais que permitam as representações plásticas do problema, como heliodons e emulações físicas, com associação entre a sombra projetada pelo edifício e a posição aparente do sol no céu (Büttner; Santos, 2022; Pajek *et al.*, 2018). Por outro lado, a interoperabilidade limitada entre *softwares* de análise e a fragmentação dos resultados dificultam a integração prática desses parâmetros de projeto (Barrozo; Assis, 2023; Voivret; Bigot; Rivière, 2023). Muitos estudantes se sentem pouco preparados para aplicar conceitos de insolação em seus projetos, devido à complexidade dos métodos comumente utilizados, à baixa solicitação docente e à escassa integração desses conteúdos nos ateliês de projeto (Sancho-Salas; Flor; Fishel, 2024). Esse cenário é agravado pela ênfase em abordagens tradicionais centradas em física e geometria, com pouca conexão direta ao processo criativo e às decisões arquitetônicas (Boubekr; Lee, 2017; Fernandes, 2023; Sancho-Salas; Flor; Fishel, 2024). Essas limitações resultam em soluções superficiais, em que a incidência solar é tratada como módulo exterior, desconectada das decisões arquitetônicas centrais (Dervishaj; Gudmundsson, 2025). No âmbito da iluminação natural, essa compreensão se torna ainda mais complexa, pois além de compreender espacialmente a geometria da incidência solar, os estudantes precisam analisar as flutuações de iluminância decorrentes das soluções geométricas em diferentes épocas do ano (Scarazzato *et al.*, 2021; Zhao *et al.*, 2022).

Nesse contexto, as tecnologias imersivas surgem como oportunidade promissora para superar limitações da representação tradicional. A realidade virtual (RV), originalmente desenvolvida para o entretenimento, vem sendo crescentemente incorporada tanto no ensino quanto no processo de projeto arquitetônico (Hou *et al.*, 2024) por possibilitar experiências imersivas, ampliando a interação espacial e a compreensão de conceitos complexos (Andalib; Monsur, 2024; Kwak, 2023). Nesse sentido, a realidade virtual também pode ser compreendida como uma evolução das ferramentas de representação gráfica aplicadas ao

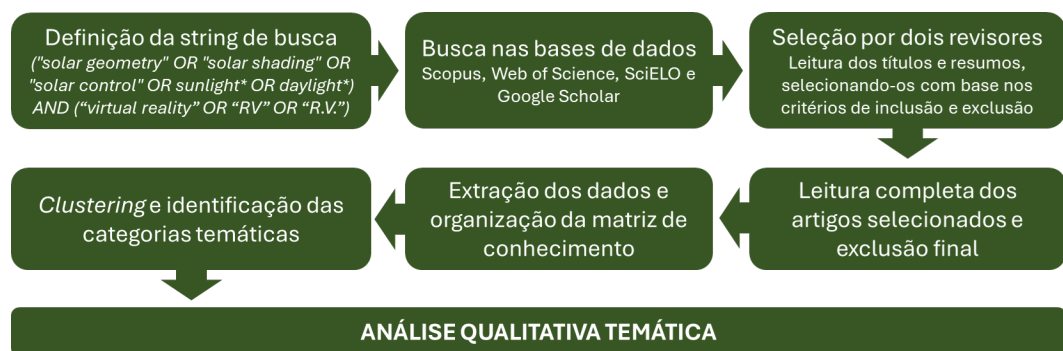
projeto arquitetônico, ampliando as possibilidades de visualização e interpretação espacial de fenômenos ambientais complexos. Pesquisas destacam seu potencial para aprimorar habilidades como criatividade, análise geométrica e visualização tridimensional, elementos essenciais para o ensino da geometria solar e da iluminação natural (Andalib; Monsur, 2024; Tang *et al.*, 2020). Além de favorecer a experimentação em tempo real, a RV oferece ambientes de simulação próximos ao mundo real, permitindo que estudantes percebam de forma intuitiva os efeitos da luz e da sombra sobre o espaço projetado (Hou *et al.*, 2024; Kwak, 2023). Essas evidências sugerem que o desafio da representação da insolação e da iluminação natural, marcado pela complexidade técnica e pela abstração geométrica, pode ser enfrentado com a integração da RV como ferramenta pedagógica e de apoio à decisão. Essa tecnologia tem potencial de transformar dados solares e lumínicos em experiências visuais e interativas, fortalecendo a conexão entre teoria, geometria, simulação e prática projetual.

Diante disso, o objetivo desta pesquisa é investigar as oportunidades oferecidas pela realidade virtual para o ensino de geometria solar e iluminação natural no contexto do projeto arquitetônico, com ênfase na superação dos desafios de representação e na potencial melhoria do processo de aprendizagem dos estudantes de arquitetura e urbanismo.

2. Método

Este estudo adota o método da revisão de escopo, que mapeia sistematicamente a literatura disponível sobre um tema com o objetivo de identificar as principais abordagens, lacunas e tendências em determinado campo de estudo, estabelecendo uma base conceitual que apoie futuras pesquisas (Peters *et al.*, 2020). Essa abordagem é recomendada especialmente em áreas emergentes, como é o caso do uso da realidade virtual como ferramenta de análise e de apoio ao processo projetual, no âmbito da iluminação natural e da geometria solar. A figura 1 apresenta a síntese gráfica das etapas da revisão de escopo, descritas a seguir.

Figura 1: Síntese gráfica das etapas da revisão de escopo



Fonte: Dos autores, 2025

A pergunta de pesquisa foi estruturada com base nos elementos do modelo PCC (População, Conceito, Contexto), como recomendado por Peters *et al.* (2020): “Quais são as oportunidades e tendências para o uso da realidade virtual em estudos de insolação, sombreamento e iluminação natural, no contexto do processo projetual e no ensino em Arquitetura?”. No processo de busca, priorizou-se a maior abrangência possível, dentro dos limites de tempo e recursos disponíveis, com registro sistemático das estratégias adotadas, de acordo com as recomendações do protocolo PRISMA-ScR, específico para revisões de escopo

(Tricco *et al.*, 2018). A *string* abaixo foi aplicada nas bases *Scopus* e *Web of Science* (campos *title*, *abstract* e *keywords*), *SciELO* (sem filtros de busca) e *Google Scholar* (apenas pelo campo *title*, por inexistência das opções *abstract* e *keywords*), no intervalo de 2015 a 2025:

String: ("solar geometry" OR "solar shading" OR "solar control" OR sunlight OR daylight*) AND ("virtual reality" OR "RV" OR "R.V.")*

A seleção foi realizada por meio da leitura dos títulos e resumos, com base nos seguintes critérios de inclusão:

- Trabalhos que abordam a Realidade Virtual para estudos de geometria solar, sombreamento e/ou iluminação natural, no ensino em Arquitetura e Urbanismo e/ou no contexto do processo projetual.
- Textos acadêmicos completos e *open access*, em português, inglês ou espanhol.
- A triagem dos artigos foi feita com base nos seguintes critérios de exclusão:
- Artigos com foco no desenvolvimento de tecnologia ou componentes de *hardware* (7 estudos excluídos).
- Artigos de outras áreas como ciências da terra, meio ambiente e astronomia (13 estudos excluídos).
- Artigos com foco em saúde, onde a RV é utilizada como uma ferramenta para diagnóstico ou reabilitação (9 estudos excluídos, um deles após a leitura completa).
- Artigos que abordam a simulação, mas sem o uso da RV como ferramenta para a experiência do usuário (2 estudos excluídos, um deles após a leitura completa).
- Artigos que não utilizam realidade virtual por meio de *head-mounted displays* (HMDs), empregando outras tecnologias imersivas ou abordando tópicos divergentes que utilizam a mesma sigla (RV) (3 estudos excluídos, um deles após a leitura completa).
- Artigos que se voltam à avaliação do conforto ambiental, segurança viária ou comportamento de pedestres em espaços externos e urbanos (4 estudos excluídos, dois deles após a leitura completa).
- Resumos expandidos não inéditos na seleção realizada (2 estudos excluídos após a leitura completa).

A divergência de seleção entre os autores foi de 5 artigos. Todos os 46 artigos selecionados foram submetidos a leitura completa, quando novas exclusões foram realizadas. Os resultados da seleção seguem apresentados na tabela 1.

Tabela 1: Síntese da triagem e seleção dos artigos para a revisão de escopo

Base	Artigos totais	Open Access	Artigos duplicados	Artigos excluídos	Artigos selecionados	Elegíveis após a leitura completa
<i>Scopus</i>	162	58	0	26	32	30
<i>Web of Science</i>	97	46	33	6	7	6
<i>Google Scholar</i>	8	8	2	0	6	3
<i>SciELO</i>	2	2	0	1	1	0
TOTAL	269	114	35	33	46	39

Fonte: Dos autores, 2025

Para os 39 artigos finais, foi construída uma planilha de extração de dados, com 28 tópicos relevantes para a questão de pesquisa (dentre eles: objetivos, estratégias metodológicas e principais descobertas). Os dados extraídos foram organizados em uma matriz de conhecimento, seguida de *clustering* para a identificação de padrões recorrentes entre as publicações. Por fim, foi realizada uma análise qualitativa temática, discutindo as informações emergentes de acordo com suas categorias temáticas (Peters *et al.*, 2020).

3. Resultados e Discussão

Pela análise qualitativa temática foi possível identificar duas principais vertentes de pesquisa: estudos que investigam a influência de parâmetros arquitetônicos e condições ambientais na percepção dos usuários (20 artigos), e estudos que exploram a aplicabilidade da realidade virtual para o apoio à tomada de decisão, integrada ou não a outras ferramentas (19 artigos). As próximas seções discutirão essas duas vertentes e as tendências referentes aos *softwares* mais utilizados.

3.1. Avaliação de Parâmetros Arquitetônicos e Condições Ambientais (Vertente 1)

Esta vertente utiliza a realidade virtual como instrumento de análise científica, sem investigar sua aplicabilidade como apoio à tomada de decisão (Quadro 1). Nela aparecem, em sua maioria, os estudos que testam a influência de parâmetros arquitetônicos específicos, como fachadas, aberturas, materiais e envelopes, na percepção lumínica dos usuários. Em menor quantidade e, em alguns casos, de forma complementar, estão os estudos que investigam a reação dos usuários a diferentes condições ambientais, como tipo de céu, contexto espacial, variações de luminosidade e preferências regionais.

Quadro 1: Síntese da vertente de pesquisa 1 (avaliação de parâmetros)

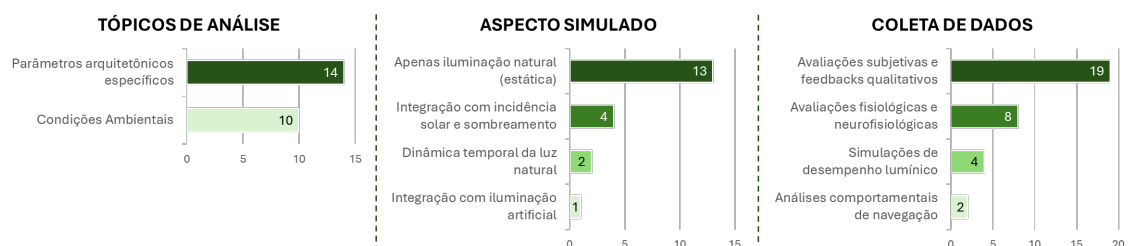
Números dos Artigos (Avaliação de Parâmetros)		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	
Tópicos de Análise	Parâmetros arquitetônicos específicos	x	x	x		x	x		x	x		x	x	x	x	x	x				x	
	Condições ambientais				x	x		x			x						x	x	x	x	x	
Aspecto Simulado	Apenas iluminação natural (estática)	x	x	x	x	x	x	x	x							x	x	x	x	x	x	
	Dinâmica temporal da luz natural											x										x
	Integração com incidência solar e sombreamento												x	x	x	x						
	Integração com iluminação artificial									x												
Técnicas de Coleta de Dados	Avaliações subjetivas e feedbacks qualitativos	x	x	x	x	x	x	x	x	x		x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x
	Análises comportamentais de navegação										x											
	Avaliações fisiológicas e neurofisiológicas	x		x		x	x	x				x									x	x
	Simulações de desempenho lumínico										x			x		x				x		

1. Abd-Alhamid; Kent; Wu, 2024; 2. Ahmed et al., 2022; 3. Chamilothoni et al., 2019; 4. Chamilothoni et al., 2022a; 5. Chamilothoni et al., 2022b; 6. Chinazzo et al., 2021; 7. Cho; Karmann; Andersen, 2025; 8. Flor et al., 2021; 9. Heydarian et al., 2017; 10. Karmann et al., 2023; 11. Kong et al., 2022; 12. Maksoud et al., 2023; 13. Marzouk; Elsharkawy; Mahmoud, 2022; 14. Mirdamadi; Zomorodian; Tahsildoost, 2023; 15. Moscoso et al., 2022; 16. Moscoso et al., 2021; 17. Payedar-Ardakani et al., 2024a; 18. Payedar-Ardakani et al., 2024b; 19. Rodriguez et al., 2021; 20. Zhang et al., 2024.

Fonte: Dos autores, 2025

Para facilitar a leitura dos padrões identificados na literatura, os resultados foram sintetizados graficamente na figura 2, apresentando a incidência de estudos em cada categoria de análise. Os resultados indicam predominância de estudos voltados à avaliação de parâmetros arquitetônicos específicos, como dimensões e configurações de aberturas ou elementos de sombreamento, em comparação com análises focadas em condições ambientais mais amplas. Em relação aos aspectos simulados, observa-se forte concentração em cenários de iluminação natural estática, enquanto abordagens que consideram a dinâmica temporal da luz natural ou a integração com iluminação artificial aparecem com menor frequência. Quanto às técnicas de coleta de dados, destaca-se o uso predominante de avaliações subjetivas e *feedbacks* qualitativos dos usuários, seguido por estudos que incorporam avaliações fisiológicas ou neurofisiológicas. Em contraste, métodos baseados em simulação de desempenho lumínico ou análise comportamental de navegação são menos recorrentes, indicando que grande parte das investigações se concentra na percepção subjetiva dos ambientes simulados.

Figura 2: Incidência de estudos em cada categoria de análise na vertente 1 (avaliação de parâmetros)



NOTA: as categorias não são mutuamente exclusivas; um mesmo artigo pode ser contabilizado em mais de uma categoria de análise.

Fonte: Dos autores, 2025

3.1.1 Aspectos simulados pela Realidade Virtual

Nesta vertente, os aspectos simulados pela realidade virtual se dividem em:

- **Apenas iluminação natural (estática):** estudos que avaliam apenas a iluminação natural estática diante de parâmetros construtivos ou ambientais,

seja pela análise objetiva (níveis de iluminância) ou por percepções subjetivas. Representa a tendência majoritária da amostra (Abd-Alhamid; Kent; Wu, 2024; Ahmed *et al.*, 2022; Chamilothoni *et al.*, 2019; Chamilothoni *et al.*, 2022a; 2022b; Chinazzo *et al.*, 2021; Cho; Karmann; Andersen, 2025; Flor *et al.*, 2021; Moscoso *et al.*, 2022; Moscoso *et al.*, 2021; Payedar-Ardakani *et al.*, 2024a; Payedar-Ardakani *et al.*, 2024b; Zhang *et al.*, 2024).

- **Dinâmica temporal da luz natural:** estudos que também consideram a mudança da luz ao longo do tempo (Karmann *et al.*, 2023; Rodriguez *et al.*, 2021) destacando a importância do fator temporal na qualidade da iluminação e na percepção dos usuários (mesmo que ainda não considerem a influência direta da incidência solar).
- **Integração com incidência solar e sombreamento:** estudos que associam iluminação natural com insolação, trajetória solar e estratégias de sombreamento (Kong *et al.*, 2022; Maksoud *et al.*, 2023; Marzouk; Elsharkawy; Mahmoud, 2022; Mirdamadi; Zomorodian; Tahsildoost, 2023). Consistindo em uma minoria dos estudos, aprofundam a relação entre incidência solar e desempenho lumínico, diante de parâmetros ambientais e/ou arquitetônicos específicos.
- **Integração com iluminação artificial:** categoria composta por um único estudo que avalia as preferências dos usuários quanto a iluminação natural proporcionada por diversas configurações de persianas em complementaridade com variações de iluminação artificial (Heydarian *et al.*, 2017).

3.1.2 Técnicas de coleta de dados

Nesta vertente, as técnicas de coleta de dados se dividem em:

- **Avaliações subjetivas e *feedbacks* qualitativos:** grande parte dos trabalhos usa a realidade virtual para manipular variáveis arquitetônicas (tamanho de janelas, geometrias de fachadas, condições de céu, envelopes, aberturas) e coletar percepções dos usuários. Os dados qualitativos vêm de questionários, auto-relatos ou preferências declaradas (Abd-Alhamid; Kent; Wu, 2024; Ahmed *et al.*, 2022; Chamilothoni *et al.*, 2019; Chamilothoni *et al.*, 2022b; Chinazzo *et al.*, 2021; Cho; Karmann; Andersen, 2025; Heydarian *et al.*, 2017; Kong *et al.*, 2022; Payedar-Ardakani *et al.*, 2024b; Zhang *et al.*, 2024). Nesses estudos, os usuários são inseridos em cenários virtuais e convidados a avaliar conforto, qualidade da vista, preferências por fachadas ou janelas, atributos emocionais ou restauradores. É a estratégia mais difundida, pois fornece dados diretos de aceitação e experiência, fundamentais para informar a qualidade dos parâmetros ambientais e projetuais.
- **Análises comportamentais de navegação, atenção e saliência visual:** dois artigos dessa vertente utilizam as técnicas de *eye-tracking* (rastreamento ocular) e *head-tracking* (rastreamento dos movimentos da cabeça) para compreender o comportamento visual dos usuários diante de diferentes condições de iluminação (Cho; Karmann; Andersen, 2025; Karmann *et al.*, 2023). Isso permite análises de saliência e atenção visual, identificação de foco em áreas de interesse, padrões de navegação e desempenho em tarefas, revelando comportamentos espontâneos dos

usuários em resposta à iluminação natural e ampliando a compreensão para além da percepção declarada.

- **Avaliações fisiológicas e neurofisiológicas:** um subconjunto de trabalhos vai além do auto-relato e coleta respostas do corpo para reforçar a confiabilidade dos achados (Chamilothori *et al.*, 2019; Chamilothori *et al.*, 2022b; Chinazzo *et al.*, 2021; Cho; Karmann; Andersen, 2025; Karmann *et al.*, 2023; Kong *et al.*, 2022; Payedar-Ardakani *et al.*, 2024a; Payedar-Ardakani *et al.*, 2024b; Zhang *et al.*, 2024). Esse grupo mostra uma preocupação em capturar efeitos não conscientes, como estresse, excitação fisiológica e atividade cerebral diante de diferentes condições de iluminação natural. A força dessa abordagem está em complementar a avaliação subjetiva da percepção dos participantes com indicadores objetivos, ampliando a robustez dos resultados.
- **Simulações de desempenho lumínico:** técnica utilizada por alguns estudos para confrontar os resultados de percepção da iluminação natural com dados quantitativos, permitindo a identificação de padrões e enriquecendo a discussão sobre os parâmetros projetuais (Heydarian *et al.*, 2017; Maksoud *et al.*, 2023; Mirdamadi; Zomorodian; Tahsildoost, 2023; Payedar-Ardakani *et al.*, 2024a).

3.1.3 Descobertas, *insights* e lacunas

Nesta vertente, as principais descobertas, *insights* e lacunas se dividem em:

- **Impacto da geometria das fachadas e janelas na percepção e no desempenho:** variações nos padrões de fachada e no número, tamanho e cor de superfícies envidraçadas influenciam diretamente os atributos subjetivos (agradabilidade, excitação, complexidade, satisfação e até percepção térmica) e as respostas fisiológicas (como frequência cardíaca), com maior peso que condições ambientais externas (tipo de céu, contexto social), porém de forma não linear: janelas médias muitas vezes são preferidas em relação a janelas grandes demais, não bastando maximizar área envidraçada, mas sim equilibrar entrada de luz, conforto visual e desempenho térmico e energético (Abd-Alhamid; Kent; Wu, 2024; Chamilothori *et al.*, 2019; Chamilothori *et al.*, 2022a; 2022b; Chinazzo *et al.*, 2021; Flor *et al.*, 2021; Heydarian *et al.*, 2017; Kong *et al.*, 2022; Mirdamadi; Zomorodian; Tahsildoost, 2023; Moscoso *et al.*, 2022; Moscoso *et al.*, 2021; Zhang *et al.*, 2024).
- **Condições de céu, dinâmica solar e variações temporais da luz:** em comparação com condições estáticas, a simulação de céu claro/nublado, percurso solar **aparente**, variações temporais e dinâmicas da luz modulam fortemente a percepção, preferências, engajamento e desempenho em tarefas cognitivas, mesmo que se preservem certos padrões de atenção visual (Cho; Karmann; Andersen, 2025; Karmann *et al.*, 2023; Moscoso *et al.*, 2021; Payedar-Ardakani *et al.*, 2024a; Payedar-Ardakani *et al.*, 2024b; Rodriguez *et al.*, 2021).
- **Validação do uso da realidade virtual:** apesar de não ser o foco de análise para essa vertente de pesquisa, um número significativo de estudos consolidou a VR como ferramenta para testar variáveis ambientais complexas em condições controladas, com controle experimental inédito e já é validado como método confiável para percepção visual e estudos de iluminação, apesar de possuir interatividade ainda pouco explorada e limitações na reprodução fidedigna de brilho, luminância extrema e ofuscamento (Chamilothori *et al.*, 2022a; Cho; Karmann; Andersen, 2025; Flor *et al.*,

2021; Karmann *et al.*, 2023; Maksoud *et al.*, 2023; Marzouk; Elsharkawy; Mahmoud, 2022; Mirdamadi; Zomorodian; Tahsildoost, 2023; Moscoso *et al.*, 2022; Moscoso *et al.*, 2021; Scorpio *et al.*, 2021; Zhang *et al.*, 2024).

- **Restrições técnicas da realidade virtual:** os *headsets* apresentam uma faixa limitada de luminância e iluminância, que não reproduzem brilho excessivo e ofuscamento, além de um *tone-mapping* estático que não simula a adaptação visual real (Chamilothori *et al.*, 2022a; Moscoso *et al.*, 2022; Moscoso *et al.*, 2021; Payedar-Ardakani *et al.*, 2024a; Payedar-Ardakani *et al.*, 2024b). Além disso, a exposição reduzida para evitar *VR sickness* limita a observação de efeitos cognitivos, emocionais e fisiológicos em médio e longo prazo (Abd-Alhamid; Kent; Wu, 2024; Chamilothori *et al.*, 2019; Cho; Karmann; Andersen, 2025; Payedar-Ardakani *et al.*, 2024a;).
- **Integração entre métricas objetivas e avaliações subjetivas:** constata-se a convergência entre métricas físicas (iluminância, contraste, etc) e percepções subjetivas (agradabilidade, conforto, restauração), porém de forma ainda limitada, considerando que reflexões internas, materiais e cores afetam fortemente a percepção, mas escapam a métricas puramente físicas. Os estudos sugerem que a combinação de simulação quantitativa com imersão qualitativa em RV é o caminho mais promissor para o projeto, ensino e pesquisa aplicada (Kong *et al.*, 2022; Marzouk; Elsharkawy; Mahmoud, 2022; Mirdamadi; Zomorodian; Tahsildoost, 2023; Payedar-Ardakani *et al.*, 2024a; Payedar-Ardakani *et al.*, 2024b).

3.2 Apoio ao Processo Projetual (Vertente 2)

Esta vertente utiliza a realidade virtual como instrumento de apoio à tomada de decisão, integrada ou não a outras tecnologias digitais. A ênfase não está na influência de parâmetros ambientais e de projeto na percepção do usuário, mas na validação de *softwares* e *workflows* para simulação, análise e apoio à decisão. São trabalhos voltados para a instrumentação do processo projetual, medindo desempenho por simulação performativa (iluminância e eficiência energética) e coletando *feedbacks* qualitativos de usabilidade (Quadro 2).

Quadro 2: Síntese da vertente de pesquisa 2 (apoio ao processo projetual)

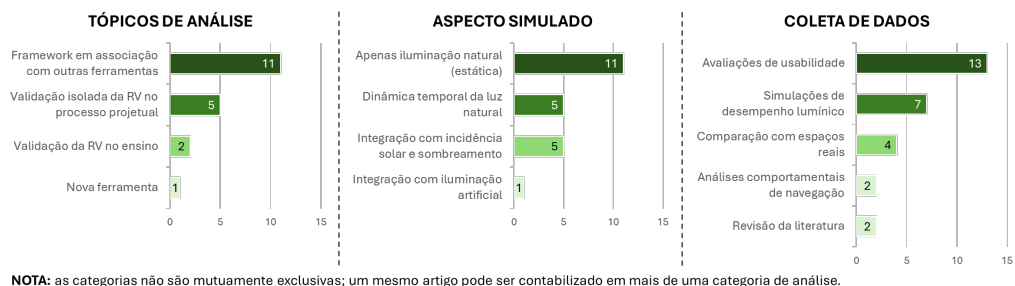
Números dos Artigos (Apoio ao Processo Projetual)		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	
Tópicos de Análise	Validação isolada da RV no processo projetual		x	x								x							x	x	
	Framework em associação com outras ferramentas	x			x		x	x	x	x				x	x	x	x	x			
	Nova ferramenta											x									
	Validação da RV no ensino					x						x									
Aspecto Simulado	Apenas iluminação natural (estática)	x	x	x		x	x			x		x	x	x	x						x
	Dinâmica temporal da luz natural				x				x		x						x	x			
	Integração com incidência solar e sombreamento								x		x							x	x		x
	Integração com iluminação artificial								x												
Técnicas de Coleta de Dados	Avaliações de usabilidade	x		x		x	x	x		x	x	x	x	x	x	x	x				x
	Análises comportamentais de navegação				x												x				
	Simulações de desempenho lumínico	x					x	x	x				x		x						x
	Comparação com espaços reais		x	x									x								x
	Revisão da literatura																			x	x

1. Akin *et al.*, 2021; 2. Atié *et al.*, 2022; 3. Chamilothori; Wienold; Andersen, 2019; 4. Fathy *et al.*, 2023; 5. Gunasagaran *et al.*, 2024; 6. Hegazy; Yasufuku; Abe, 2021; 7. Huang; Wang; Zhou, 2024; 8. Izmirlioglu; Sozer, 2025; 9. Kemkomnerd; Tirapas, 2024; 10. Keshavarzi; Caldas; Santos, 2021; 11. Kojima *et al.*, 2023; 12. Lei *et al.*, 2023; 13. Moscoso; Nazari; Matusiak, 2022; 14. Natephra *et al.*, 2017; 15. Rockcastle; Chamilothori; Andersen, 2017; 16. Sait *et al.*, 2019; 17. Scorpio *et al.*, 2023; 18. Scorpio *et al.*, 2021; 19. Zeng; Zhang, 2023.

Fonte: Dos autores, 2025

A figura 3 apresenta em cada categoria de análise do conjunto os estudos que exploram a RV como apoio ao processo. Neles é possível observar a predominância de abordagens em que a tecnologia é utilizada em associação com outras ferramentas de análise ou modelagem, enquanto investigações que buscam validar o uso da realidade virtual de forma isolada são menos frequentes. Em relação aos aspectos simulados, mantém-se a predominância de cenários baseados em iluminação natural estática, embora haja maior presença de estudos que consideram a dinâmica temporal da luz natural e a integração com incidência solar e sombreamento. Contudo, os estudos que investigam a integração com a iluminação artificial continuam escassos. Quanto às técnicas de coleta de dados, destacam-se avaliações de usabilidade, seguidas por simulações de desempenho lumínico e comparações com ambientes reais, indicando um interesse crescente em avaliar o potencial da realidade virtual como ferramenta de apoio à análise e à tomada de decisão no processo projetual.

Figura 3: Incidência de estudos em cada categoria de análise na vertente 2 (apoio ao processo projetual)



NOTA: as categorias não são mutuamente exclusivas; um mesmo artigo pode ser contabilizado em mais de uma categoria de análise.

Fonte: Dos autores, 2025

3.2.1 Tópicos de análise

Os tópicos de análise para essa vertente são:

- **Validação da realidade virtual no processo projetual:** estudos que se dedicam para a incorporação isolada da realidade virtual no processo projetual, avaliando sua usabilidade no processo, porém sem associação com o ensino (Atié *et al.*, 2022; Chamilothoni; Wienold; Andersen, 2019; Kojima *et al.*, 2023; Scorpio *et al.*, 2023; Scorpio *et al.*, 2021).
- **Frameworks em associação com outras ferramentas:** estudos que propõem *frameworks* associando a RV com outras ferramentas digitais, como ferramentas de *Building Information Modelling* (BIM) (Akin *et al.*, 2021; Gunasagaran *et al.*, 2024; Huang; Wang; Zhou, 2024; Izmirliglu; Sozer, 2025; Lei *et al.*, 2023; Natephra *et al.*, 2017), *softwares* de análise de desempenho (Izmirliglu; Sozer, 2025; Sait *et al.*, 2019; Zeng; Zhang, 2023), Digital Twin para coleta de dados dos usuários finais em tempo real (Kemkomnerd; Tirapas, 2024), renderizações HDR 360° (Rockcastle; Chamilothoni; Andersen, 2017; Zeng; Zhang, 2023), imagens estereoscópicas projetadas em tela para experiências coletivas (Moscoso; Nazari; Matusiak, 2022), *Machine Learning* (Fathy *et al.*, 2023) e *softwares* de renderização em tempo real, como o D5 Render (Lei *et al.*, 2023) e os motores de jogos Unreal Engine (Hegazy; Yasufuku; Abe, 2021; Izmirliglu; Sozer, 2025; Natephra *et al.*, 2017) e Unity 3D (Akin *et al.*, 2021; Sait *et al.*, 2019; Zeng; Zhang, 2023).

- **Nova ferramenta:** um único artigo (Keshavarzi; Caldas; Santos, 2021) que desenvolve uma ferramenta (*RadVR*) para simulação da iluminação natural atrelada ao percurso solar aparente, avaliando-a no contexto do ensino.
- **Validação da realidade virtual no ensino:** estudos que se dedicam à incorporação da realidade virtual no ensino de arquitetura e iluminação natural, avaliando seu impacto na aprendizagem, desempenho e engajamento dos alunos (Gunasagaran *et al.*, 2024; Keshavarzi; Caldas; Santos, 2021). Gunasagaran *et al.* (2024) utilizam a RV em associação com ferramenta BIM, como meio de exploração espacial, buscando entender vantagens, desvantagens e aceitação dos estudantes no aprendizado de arquitetura. Já Keshavarzi, Caldas e Santos (2021), embora se concentrem no desenvolvimento da ferramenta RadVR, também incluem estudantes como público-alvo, validando a ferramenta como recurso de ensino. Vale ressaltar o pequeno número de pesquisas que exploram a realidade virtual para estudos de iluminação natural no contexto do ensino – outras pesquisas da primeira vertente utilizam estudantes como participantes, porém sem objetivos pedagógicos (Heydarian *et al.*, 2017; Kong *et al.*, 2022; Maksoud *et al.*, 2023; Zhang *et al.*, 2024).

3.2.2 Aspectos simulados pela Realidade Virtual (vertente 2)

Nesta vertente, os aspectos simulados pela realidade virtual se dividem em:

- **Apenas iluminação natural (estática):** categoria com o maior número de estudos, reúne aqueles que incorporam a iluminação natural imersiva no processo de projeto, porém sem considerar suas variações dinâmicas e temporais, ou a influência direta da radiação solar (Akin *et al.*, 2021; Atié *et al.*, 2022; Chamilothoni; Wienold; Andersen, 2019; Gunasagaran *et al.*, 2024; Hegazy; Yasufuku; Abe, 2021; Kemkomnerd; Tirapas, 2024; Kojima *et al.*, 2023; Lei *et al.*, 2023; Moscoso; Nazari; Matusiak, 2022; Natephra *et al.*, 2017; Scorpio *et al.*, 2021).
- **Dinâmica temporal da luz natural:** estudos que também consideram a mudança da luz ao longo do tempo, mas ainda sem associação com a influência direta da radiação solar (Fathy *et al.*, 2023; Izmirliglu; Sozer, 2025; Keshavarzi; Caldas; Santos, 2021; Rockcastle; Chamilothoni; Andersen, 2017; Sait *et al.*, 2019).
- **Integração com incidência solar e sombreamento:** estudos que associam iluminação natural com insolação, trajetória solar e estratégias de sombreamento (Huang; Wang; Zhou, 2024; Keshavarzi; Caldas; Santos, 2021; Sait *et al.*, 2019; Scorpio *et al.*, 2023; Zeng; Zhang, 2023). Em alguns casos, também consideram a variação temporal da luz natural, não considerando a incidência solar como variável estática (Keshavarzi; Caldas; Santos, 2021; Sait *et al.*, 2019). Evidencia-se o pequeno número de estudos que fazem essa integração, especialmente se for considerada a elevada influência da incidência solar nos estudos de iluminação natural.
- **Integração com iluminação artificial:** estudo que articula a iluminação natural e sua complementaridade com a iluminação artificial no processo projetual.

Constituindo uma minoria evidente, permite resultados mais realistas com os padrões de utilização dos ambientes (Izmirlıoglu; Sozer, 2025).

É possível constatar que a maior parte dos estudos utilizam a realidade virtual como ferramenta de exploração, visualização e simulação de alternativas nas etapas iniciais e de concepção do projeto, como avaliação da volumetria, aberturas e preferências dos usuários antes do desenvolvimento do projeto (Atié *et al.*, 2022; Gunasagaran *et al.*, 2024; Hegazy; Yasufuku; Abe, 2021; Huang; Wang; Zhou, 2024; Kemkomnerd; Tirapas, 2024; Keshavarzi; Caldas; Santos, 2021; Kojima *et al.*, 2023; Lei *et al.*, 2023; Moscoso; Nazari; Matusiak, 2022; Rockcastle; Chamilothoni; Andersen, 2017; Sait *et al.*, 2019). Também com um peso importante está o grupo de estudos que a utilizam nas etapas de desenvolvimento, como forma de testar, ajustar e comparar soluções projetuais já relacionadas ao *layout* interno, sombreamento, ergonomia e qualidade espacial (Fathy *et al.*, 2023; Huang; Wang; Zhou, 2024; Izmirlıoglu; Sozer, 2025; Moscoso; Nazari; Matusiak, 2022; Natephra *et al.*, 2017; Rockcastle; Chamilothoni; Andersen, 2017; Scorpio *et al.*, 2023; Scorpio *et al.*, 2021; Zeng; Zhang, 2023). Uma menor parte dos estudos utiliza a RV para avaliar soluções finais, em etapas avançadas do projeto, porém nunca exclusivamente nelas (Chamilothoni; Wienold; Andersen, 2019; Fathy *et al.*, 2023; Huang; Wang; Zhou, 2024; Izmirlıoglu; Sozer, 2025; Kemkomnerd; Tirapas, 2024; Natephra *et al.*, 2017; Scorpio *et al.*, 2023; Zeng; Zhang, 2023). Destaca-se, contudo, um dos estudos que utiliza a RV nas três etapas, constituindo um ciclo longitudinal de imersão no decorrer do processo projetual (Huang; Wang; Zhou, 2024).

3.2.3 Técnicas de coleta de dados

Nesta vertente, as técnicas de coleta de dados se dividem em:

- **Avaliações de usabilidade:** sendo utilizadas pela maioria dos estudos (Akin *et al.*, 2021; Chamilothoni; Wienold; Andersen, 2019; Gunasagaran *et al.*, 2024; Hegazy; Yasufuku; Abe, 2021; Huang; Wang; Zhou, 2024; Kemkomnerd; Tirapas, 2024; Keshavarzi; Caldas; Santos, 2021; Kojima *et al.*, 2023; Lei *et al.*, 2023; Moscoso; Nazari; Matusiak, 2022; Natephra *et al.*, 2017; Rockcastle; Chamilothoni; Andersen, 2017; Zeng; Zhang, 2023) consistem na aplicação de questionários e outros instrumentos aos usuários para investigar o desempenho da realidade virtual (e das demais tecnologias digitais associadas) para os estudos de iluminação, assim como a aceitação, sentimento de presença e sintomas físicos percebidos por eles.
- **Análises comportamentais de navegação, atenção e saliência visual:** nesta vertente, também foram identificados dois artigos que utilizam as técnicas de *eye-tracking* e *head-tracking* para compreender o comportamento visual dos usuários nos cenários imersivos, porém, nesse caso, com o objetivo de compreender aspectos de usabilidade não rastreáveis por questionários, como a faixa de foco preferencial dos usuários (Rockcastle; Chamilothoni; Andersen, 2017), ou de treinar modelos de *Machine Learning* (Fathy *et al.*, 2023).
- **Simulações de desempenho lumínico:** avaliação de melhoria do desempenho lumínico dos modelos arquitetônicos alterados pelos participantes que utilizaram a tecnologia imersiva para as análises e tomadas de decisão (Akin *et al.*, 2021; Huang; Wang; Zhou, 2024; Izmirlıoglu; Sozer, 2025; Lei *et al.*, 2023) ou comparação/associação entre aspectos lumínicos percebidos (subjetivos) e

simulados (objetivos) (Hegazy; Yasufuku; Abe, 2021; Lei *et al.*, 2023; Natephra *et al.*, 2017; Zeng; Zhang, 2023).

- **Comparação com espaços reais:** medição das variáveis lumínicas de ambientes reais para comparação com os resultados fornecidos pelas tecnologias de realidade virtual, em modelagens equivalentes. Os resultados permitem avaliar sua precisão e validar sua utilização como instrumento de apoio ao projeto, isoladamente (Atié *et al.*, 2022; Chamilothoni; Wienold; Andersen, 2019; Kojima *et al.*, 2023) ou em associação com outras tecnologias digitais (Sait *et al.*, 2019).
- **Revisões da literatura:** estudos que se dedicam a mapear o estado da arte sobre o uso da RV como instrumento de apoio ao processo projetual. Scorpio *et al.* (2023) revisam estudos que utilizam RV imersiva para avaliação de preferências e desempenho em iluminação, discutindo métodos e limitações tecnológicas. Já Scorpio *et al.* (2021) fazem uma revisão mais ampla sobre aplicações da RV em estudos de iluminação, tanto natural quanto artificial. Ambos os estudos consolidam tendências, destacam oportunidades, definem lacunas e apontam direções futuras, especialmente na integração metodológica entre métricas objetivas e experiências subjetivas.

3.2.4 Descobertas, *insights* e lacunas

Nesta vertente, as principais descobertas, *insights* e lacunas se dividem em:

- **Confiabilidade da realidade virtual:** a RV reproduz de forma satisfatória atributos perceptivos (níveis de iluminância, contrastes e saliência visual) quando comparada a experiências reais ou a métodos tradicionais, embora limitações técnicas ainda persistam. As diferenças identificadas são pequenas e aceitáveis, sendo mais críticas em luminâncias muito altas (*glare*) ou em observações de vistas mais distantes. Quanto à operabilidade de navegação, constata-se que os usuários exploram principalmente uma faixa horizontal de cerca de 45° dentro do campo visual total. A confiabilidade metodológica está em evolução, havendo forte tendência para padronização e integração de métricas perceptivas com as computacionais. Isso corrobora com a ideia de que a RV pode ser aplicada tanto em pesquisa quanto em ensino e projeto, desde suas fases iniciais, como ferramenta complementar às simulações tradicionais (Akin *et al.*, 2021; Atié *et al.*, 2022; Chamilothoni; Wienold; Andersen, 2019; Fathy *et al.*, 2023; Hegazy; Yasufuku; Abe, 2021; Keshavarzi; Caldas; Santos, 2021; Kojima *et al.*, 2023; Lei *et al.*, 2023; Moscoso; Nazari; Matusiak, 2022; Natephra *et al.*, 2017; Rockcastle; Chamilothoni; Andersen, 2017; Sait *et al.*, 2019; Scorpio *et al.*, 2023; Scorpio *et al.*, 2021).
- **Subjetividade do suporte imersivo:** a realidade virtual permite captar impressões subjetivas, emocionais e comportamentais difíceis de medir em simulações convencionais. A inclusão ativa dos usuários (estudantes, pacientes, arquitetos) em ambientes imersivos gera processos de projeto mais humanizados, enriquecendo a otimização de soluções de iluminação natural (Akin *et al.*, 2021; Chamilothoni; Wienold; Andersen, 2019; Gunasagaran *et al.*, 2024; Hegazy; Yasufuku; Abe, 2021; Kemkomnerd; Tirapas, 2024; Lei *et al.*, 2023; Zeng; Zhang, 2023).

- **Integração com *frameworks* digitais:** Sistemas híbridos (BIM + RV, *softwares* de análise de desempenho + RV, motores de jogos + RV) viabilizam simulações de iluminação e eficiência energética e em tempo real. Essa integração permite análises mais realistas, conectando dados objetivos (métricas de desempenho) com percepções subjetivas. Os resultados apontam um caminho promissor para *workflows* colaborativos, interoperabilidade de ferramentas e apoio à decisão arquitetônica centrada no usuário (Akin *et al.*, 2021; Huang; Wang; Zhou, 2024; Izmirliglu; Sozer, 2025; Kemkomnerd; Tirapas, 2024; Keshavarzi; Caldas; Santos, 2021; Lei *et al.*, 2023; Natephra *et al.*, 2017; Sait *et al.*, 2019).
- **Interatividade e dinâmica temporal:** com o suporte de alguns *softwares*, os usuários podem manipular horário do dia, abertura de janelas, dispositivos de sombreamento, ou navegar livremente no espaço. Isso amplia a análise para contextos reais de uso, conectando a iluminação natural com insolação, sombreamento, ventilação e percepção de vistas externas (Hegazy; Yasufuku; Abe, 2021; Huang; Wang; Zhou, 2024; Izmirliglu; Sozer, 2025; Keshavarzi; Caldas; Santos, 2021; Lei *et al.*, 2023; Sait *et al.*, 2019; Zeng; Zhang, 2023).
- **Restrições técnicas da realidade virtual:** a tecnologia ainda apresenta faixa dinâmica restrita, brilho/luminância insuficiente, *glare* mal representado, campo de visão limitado, *tone-mapping* estático e fidelidade parcial da luz difusa, o que não reproduz com precisão altos contrastes, brilho extremo (ofuscamento), saliência visual e percepção dinâmica real do olho humano para diferentes distâncias (ajuste focal), comprometendo a fidelidade da experiência (Akin *et al.*, 2021; Atié *et al.*, 2022; Chamilothon; Wienold; Andersen, 2019; Keshavarzi; Caldas; Santos, 2021; Natephra *et al.*, 2017; Rockcastle; Chamilothon; Andersen, 2017; Scorpio *et al.*, 2023; Scorpio *et al.*, 2021).
- **Interoperabilidade pouco explorada no fluxo de projeto:** a integração prática entre os *softwares* de modelagem, renderização e imersão ainda é pouco explorada, de modo que a RV ainda é usada mais como instrumento de visualização do que de apoio interativo à tomada de decisão durante o processo projetual (Akin *et al.*, 2021; Huang; Wang; Zhou, 2024; Natephra *et al.*, 2017).
- **Barreiras de popularização:** a adoção em larga escala na prática profissional e no ensino ainda encontra barreiras práticas e econômicas, como o tempo necessário para o aprendizado e familiarização com o ambiente imersivo, custos de hardwares e *softwares*, e dependência de modelos 3D complexos que podem desestimular a adesão por parte de estudantes e profissionais de arquitetura (Fathy *et al.*, 2023; Gunasagaran *et al.*, 2024; Huang; Wang; Zhou, 2024; Kemkomnerd; Tirapas, 2024).

3.3 *Softwares* e Equipamentos Utilizados

O quadro 3 apresenta as ferramentas de modelagem, renderização, simulação de iluminação, *engines* de realidade virtual e dispositivos de visualização utilizados nos estudos analisados. Não foram contabilizados os artigos de revisão bibliográfica (Scorpio *et al.*, 2023; 37. Scorpio *et al.*, 2021) e aqueles que não utilizam modelagem 3D, apenas fotografias panorâmicas em 360° (Abd-Alhamid; Kent; Wu, 2024; Atié *et al.*, 2022; 9. Chinazzo *et al.*, 2021; Cho; Karmann;

Andersen, 2025; Flor *et al.*, 2021; Kojima *et al.*, 2023; Rodriguez *et al.*, 2021).

Quadro 3: Síntese dos softwares e equipamentos utilizados nos estudos analisados

Números dos Artigos	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30
Modelagem	Revit	x	x					x		x	x	x		x				x						x						
	Rhinceros			x	x	x	x	x							x		x	x	x		x	x	x	x	x	x	x	x	x	
	3ds Max								x	x										x					x					
	SketchUp																x													x
Renderização e Simulação de Iluminação	Enscape	x						x								x														
	D5 Render																x													
	V-Ray								x											x										
	Radiance			x	x	x	x	x					x		x						x	x	x	x	x	x	x	x	x	x
Engines VR	Unity		x		x	x	x	x		x	x		x		x			x		x	x	x	x		x	x	x	x	x	x
	Unreal Engine								x			x		x										x						
	IrisVR																			x										
Headsets de Realidade Virtual	HTC Vive	x	x						x		x						x	x		x					x	x		x	x	
	Oculus / Meta			x	x	x	x	x	x				x	x	x					x	x	x	x	x			x		x	
	Outros HMDs								x		x	x						x												

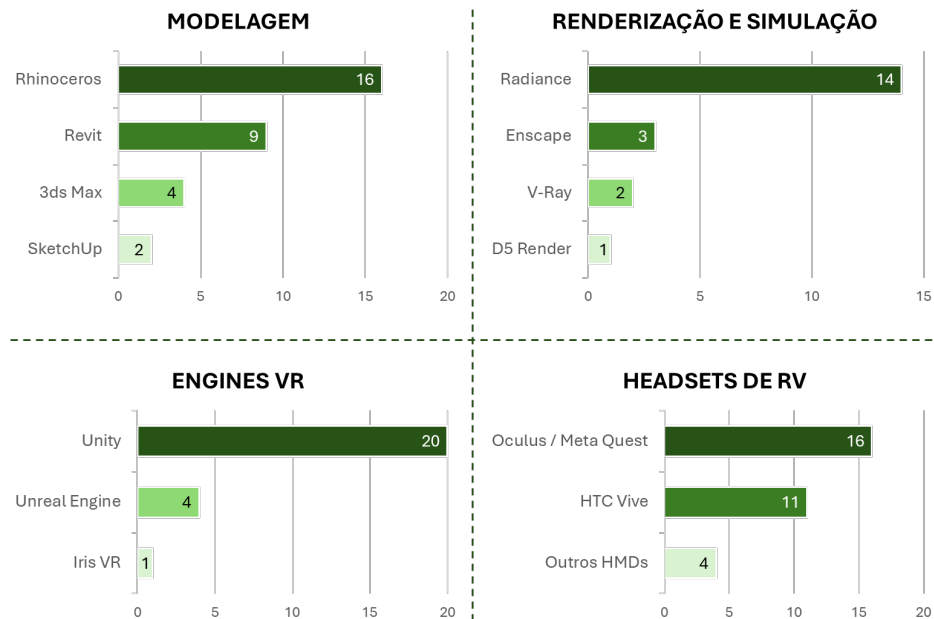
1. Ahmed et al., 2022; 2. Akin et al., 2021; 3. Chamilothoni et al., 2019; 4. Chamilothoni et al., 2022a; 5. Chamilothoni et al., 2022b; 6. Chamilothoni; Wienold; Andersen, 2019; 7. Fathy et al., 2023; 8. Gunasagaran et al., 2024; 9. Hegazy; Yasufuku; Abe, 2021; 10. Heydarian et al., 2017; 11. Huang; Wang; Zhou, 2024; 12. Izmirlioglu; Sozer, 2025; 13. Karmann et al., 2023; 14. Kemkomner; Tirapas, 2024; 15. Keshavarzi; Caldas; Santos, 2021; 16. Kong et al., 2022; 17. Lei et al., 2023; 18. Maksoud et al., 2023; 19. Marzouk; Elsharkawy; Mahmoud, 2022; 20. Mirdamadi; Zomorodian; Tahsildoost, 2023; 21. Moscoso et al., 2022; 22. Moscoso et al., 2021; 23. Moscoso; Nazari; Matusiak, 2022; 24. Natephra et al., 2017; 25. Payedar-Ardakani et al., 2024a; 26. Payedar-Ardakani et al., 2024b; 27. Rockcastle; Chamilothoni; Andersen, 2017; 28. Sait et al., 2019; 29. Zeng; Zhang, 2023; 30. Zhang et al., 2024.

Fonte: Dos autores, 2025

Os resultados sintetizados nos gráficos da figura 4 evidenciam a incidência de uso dessas ferramentas nas diferentes etapas do fluxo tecnológico empregado nos estudos. No que se refere à modelagem tridimensional, observa-se predominância do *Rhinceros*, seguido pelo *Revit*. Outras ferramentas aparecem com menor frequência, como *3ds Max* e *SketchUp*. Além dessas ferramentas, alguns estudos empregam ambientes de modelagem paramétrica, especialmente por meio do *Grasshopper*, uma extensão do *Rhinceros* (Fathy *et al.*, 2023; Keshavarzi; Caldas; Santos, 2021; Marzouk; Elsharkawy; Mahmoud, 2022; Zeng; Zhang, 2023). Ainda no *Grasshopper*, alguns estudos utilizam os *plugins Ladybug* e *Honeybee* para análises de desempenho (Heydarian *et al.*, 2017; Lei *et al.*, 2023; Maksoud *et al.*, 2023; Payedar-Ardakani *et al.*, 2024a). Esses fluxos computacionais permitem integrar modelagem paramétrica, simulação de desempenho e visualização em realidade virtual.

Quanto às ferramentas de renderização e simulação, destaca-se o uso do *Radiance*, identificado em 14 estudos para a simulação fisicamente baseada da iluminação. O *software* também aparece associado a fluxos de análise de desempenho lumínico baseados em atributos quantitativos da luz natural (Natephra *et al.*, 2017; Payedar-Ardakani *et al.*, 2024a). Em contraste, motores de renderização voltados à visualização arquitetônica aparecem com menor incidência, como *Enscape*, *V-Ray* e *D5 Render*. Nas *engines* de realidade virtual, observa-se forte predominância do *Unity*, enquanto o *Unreal Engine* aparece em menor número de casos e o *IrisVR* é identificado apenas em um deles. Esse padrão indica ampla adoção do *Unity* em pesquisas acadêmicas que integram realidade virtual e avaliação de iluminação natural em modelos arquitetônicos.

Figura 4: Incidência de uso dos softwares e equipamentos nos estudos analisados



NOTA: as categorias não são mutuamente exclusivas; um mesmo artigo pode ser contabilizado em mais de uma categoria de análise.

Fonte: Dos autores, 2025

Em relação aos dispositivos de visualização, os HMDs da linha Oculus/Meta constituem o equipamento mais recorrente, seguidos pelos dispositivos HTC Vive. Outros *headsets* de realidade virtual não especificados aparecem em menor frequência.

Os resultados sugerem que a maior parte dos estudos analisados adota fluxos computacionais híbridos, combinando ferramentas distintas para modelagem tridimensional, simulação de iluminação e visualização em realidade virtual. Observa-se, particularmente, a recorrência de pipelines que integram modelagem paramétrica em Rhinoceros, simulação física da iluminação por meio do Radiance e visualização imersiva na engine de realidade virtual Unity. A predominância de engines de realidade virtual voltadas à renderização em tempo real sugere um crescente interesse em explorar ambientes imersivos como suporte à análise e à tomada de decisão em projeto, especialmente em estudos relacionados à percepção da iluminação natural e às respostas dos usuários aos ambientes simulados.

4 Conclusão

A revisão realizada evidenciou que a realidade virtual tem se mostrado uma ferramenta promissora tanto para a investigação científica da percepção ambiental quanto para o apoio ao processo projetual em arquitetura. No entanto, é evidente a escassez de estudos que integram as condições de iluminação natural com os aspectos de insolação, sombreamento e integração com a iluminação artificial, assim como aqueles que desenvolvem esses estudos no ensino de arquitetura.

Os estudos que utilizam a RV para avaliar parâmetros arquitetônicos e condições ambientais demonstram seu potencial em aprofundar a compreensão sobre os efeitos da geometria das fachadas, aberturas e variações temporais da luz natural na experiência dos usuários. No entanto, é recorrente a identificação de limitações técnicas na reprodução

fidedigna da iluminação, especialmente quanto aos aspectos de luminância, o que disfarça os efeitos de ofuscamento, e de *tone-mapping* estático, que limitam a simulação de ajuste de foco ocular, especialmente para objetos observados a longas distâncias. Também são identificadas limitações operacionais, especialmente no que diz respeito ao tempo de exposição reduzida ao ambiente imersivo, para se evitar o mal-estar dos usuários.

Já as pesquisas voltadas à integração da realidade virtual em fluxos de projeto e ensino apontam para sua capacidade de ampliar a visualização, interatividade e apoio à tomada de decisão, o que é potencializado quando a tecnologia é associada a outras ferramentas digitais, como BIM, motores de jogos e *softwares* de simulação de desempenho. Aqui, destacam-se como fragilidades, além das mesmas limitações técnicas apontadas anteriormente, a complexa interoperabilidade entre *softwares* e as barreiras de acesso econômico e tecnológico, que restringem a adoção em larga escala no ensino e na prática profissional.

Os resultados indicam que a combinação de métricas objetivas e percepções subjetivas em ambientes imersivos representa uma direção consistente para ampliar as possibilidades de representação da geometria solar e da iluminação natural no contexto do processo projetual, aproximando análise ambiental, visualização espacial e tomada de decisão em arquitetura. No contexto educacional, a realidade virtual demonstrou um papel relevante como ferramenta pedagógica em disciplinas de projeto arquitetônico e conforto ambiental. A possibilidade de visualizar, em escala real e de forma imersiva, os efeitos da iluminação natural e da insolação permite que os estudantes compreendam com maior clareza relações geométricas e espaciais tradicionalmente apresentadas de forma abstrata em cartas solares e diagramas bidimensionais. Dessa forma, a RV pode contribuir para aproximar conteúdos técnicos do processo criativo de projeto, favorecendo estratégias didáticas baseadas em experimentação espacial e análise visual dos fenômenos lumínicos.

Como perspectivas para pesquisas futuras, destaca-se a necessidade de estudos que integrem de forma mais consistente a iluminação natural com a insolação, o sombreamento e a iluminação artificial em ambientes imersivos, além de maior ênfase em contextos educacionais. Em paralelo, avanços tecnológicos relacionados à fidelidade luminosa, representação de ofuscamento e adaptação visual podem ampliar ainda mais o potencial da realidade virtual como ferramenta de análise e apoio ao processo projetual.

Referências

ABD-ALHAMID, F.; KENT, M.; WU, Y. Assessment of window size and layout impact on a view quality perception in a virtual reality environment. **LEUKOS**, v. 20, n. 3, p. 239–260, 2024. DOI: 10.1080/15502724.2023.2262148

AHMED, K. G.; OMAR, M. M.; MEGAHED, M.; ALAZEEZI, S. A. Involving young Emirati women in the pre-occupancy evaluation of “modern” housing designs: simple versus advanced participatory tools. **SAGE Open**, v. 12, n. 2, p. 1–14, abr.–jun. 2022. DOI: 10.1177/21582440221094613

AKIN, S.; ERGUN, O.; SURER, E.; DINO, I. G. An immersive performative architectural design tool with daylighting simulations: a building information modeling-based approach. **Engineering Construction and Architectural Management**, v. 28, n. 4, p. 1319–1344, 28 abr. 2021. DOI: 10.1108/ECAM-07-2020-0562

ANDALIB, S. Y.; MONSUR, M. Co-Created Virtual Reality (VR) Modules in Landscape Architecture Education: A Mixed Methods Study Investigating the Pedagogical Effectiveness of VR. **Educ. Sci.** 14, 553, 2024. DOI: 10.3390/educsci14060553

ATIÉ, M.; VIGIER, T.; EYMOND, F.; DROZD, C.; LABAYRADE, R.; SIRET, D.; SUTTER, Y. Towards a calibrated 360° stereoscopic HDR image dataset for architectural lighting studies. In: **Proceedings of the 1st Workshop on Photorealistic Image and Environment Synthesis for Multimedia Experiments (PIES-ME 2022)**. Lisboa, 2022. p. 19–25. DOI: 10.1145/3552482.3556554

BARROZO, S. C. P.; ASSIS, E. S. de. Análise climática aplicada ao ensino de conforto térmico na graduação. In: **ENCONTRO NACIONAL DE CONFORTO NO AMBIENTE CONSTRUÍDO**, 17., 2023, São Paulo. Anais [...]. São Paulo: [s.n.], 2023. p. 1-10.

BOUBEKRI, M.; LEE, J. A comparison of four daylighting metrics in assessing the daylighting performance of three shading systems. **Journal of Green Building**, v. 12, n. 3, p. 39-53, 2017.

BÜTTNER, S. B.; SANTOS, F. M. de M. O ensino de Conforto Térmico: uma busca por métodos mais integrados com as práticas projetuais. In: AMORIM, Cláudia Naves David et al. (orgs.). **Inovações e tendências no ensino e pesquisa em conforto ambiental e sustentabilidade do ambiente construído**. Cuiabá: UnB; UFMT, 2022. p. 14-25.

CHAMILOTHORI, K.; CHINAZZO, G.; WIENOLD, J.; ANDERSEN, M.; RODRIGUES, J.; DANGLAUSER, E. S. Subjective and physiological responses to façade and sunlight pattern geometry in virtual reality. **Building and Environment**, v. 150, p. 144–155, 2019. DOI: 10.1016/j.buildenv.2019.01.009

CHAMILOTHORI, K.; WIENOLD, J.; ANDERSEN, M. Adequacy of immersive virtual reality for the perception of daylit spaces: comparison of real and virtual environments. **LEUKOS**, v. 15, n. 2–3, p. 203–226, 2019. DOI: 10.1080/15502724.2017.1404918

CHAMILOTHORI, K.; WIENOLD, J.; MOSCOSO, C.; MATUSIAK, B.; ANDERSEN, M. Regional differences in the perception of daylit scenes across Europe using virtual reality. Part II: Effects of façade and daylight pattern geometry. **LEUKOS**, v. 18, n. 3, p. 316–340, 2022a. DOI: 10.1080/15502724.2021.1999257

CHAMILOTHORI, K.; WIENOLD, J.; MOSCOSO, C.; MATUSIAK, B.; ANDERSEN, M. Subjective and physiological responses towards daylit spaces with contemporary façade patterns in virtual reality: influence of sky type, space function, and latitude. **Journal of Environmental Psychology**, v. 82, p. 101839, ago. 2022b. DOI: 10.1016/j.jenvp.2022.101839

CHINAZZO, G.; CHAMILOTHORI, K.; WIENOLD, J.; ANDERSEN, M. Temperature–color interaction: subjective indoor environmental perception and physiological responses in virtual reality. **Human Factors**, v. 63, n. 3, p. 474–502, maio 2021. DOI: 10.1177/0018720819892383

CHO, J.; YOO, C.; KIM, Y.; Viability of exterior shading devices for high-rise residential buildings: case study for cooling energy saving and economic feasibility analysis. **Energy and Buildings**, v. 82, p. 771-785, 2014. DOI: 10.1016/j.enbuild.2014.07.092

CHO, Y.; KARMANN, C.; ANDERSEN, M. Clear vs. overcast: effects of sky condition on daylight view perception in virtual reality. **Building and Environment**, v. 285, p. 113615, 1 nov. 2025. DOI: 10.1016/j.buildenv.2025.113615

DERVISHAJ, A.; GUDMUNDSSON, K. Parametric design workflow for solar, context-adaptive and reusable facades in changing urban environments. **Journal of Building Performance Simulation**, v. 18, n.2, p. 161-190, 2025. DOI: 10.1080/19401493.2024.2432916

DIAS, L. de S.; SOUZA, H. A. de; GOMES, A. P.; CAETANO, L. F.; CAMARGOS, B. H. L.; TRIBESS, A. Simulação termoenergética e lumínica de fachadas com brises no clima tropical. **PARC Pesq. em Arquit. e Constr.**, Campinas, SP, v. 14, n. 00, p. e023001, 2023. DOI: 10.20396/parc.v14i00.8667538

FATHY, F.; MANSOUR, Y.; SABRY, H.; REFAT, M.; WAGDY, A. Virtual reality and machine learning for predicting visual attention in a daylight exhibition space: a proof of concept. **Ain Shams Engineering Journal**, v. 14, n. 6, p. 102098, jun. 2023. DOI: 10.1016/j.asej.2022.102098

FERNANDES, L. C. Proposta de uma ferramenta computacional para traçar cartas solares e dimensionar dispositivos para sombreamento. **PARC Pesq. em Arquit. e Constr.**, Campinas, SP, v. 14, p. e023028, 2023. DOI: 10.20396/parc.v14i00.8671992

FLOR, J.-F.; ABURAS, M.; ABD-ALHAMID, F.; WU, Y. Virtual reality as a tool for evaluating user acceptance of view clarity through ETFE double-skin façades. **Energy and Buildings**, v. 231, p. 110554, 15 jan. 2021. DOI: 10.1016/j.enbuild.2020.110554

GUNASAGARAN, S.; MARI, T.; MOHAMED, R.; NG, V.; SRIRANGAM, S. Students' perception of virtual reality applications to analyse daylighting and spatial functions in architecture and environment. **Journal of Construction in Developing Countries**, v. 29, supp. 1, p. 147–165, 2024. DOI: 10.21315/jcdc.2024.29.S1.8

HEGAZY, M.; YASUFUKU, K.; ABE, H. Evaluating and visualizing perceptual impressions of daylighting in immersive virtual environments. **Journal of Asian Architecture and Building Engineering**, v. 20, n. 6, p. 768–784, 2021. DOI: 10.1080/13467581.2020.1800477

HEYDARIAN, A.; PANTAZIS, E.; WANG, A.; GERBER, D.; BECERIK-GERBER, B. Towards user centered building design: identifying end-user lighting preferences via immersive virtual environments. **Automation in Construction**, v. 81, p. 56–66, 2017. DOI: 10.1016/j.autcon.2017.05.003

HOU, N.; NISHINA, D.; SUGITA, S.; JIANG, R.; KINDAICHI, S.; OISHI, H.; SHIMIZU, A. Virtual reality space in architectural design education: learning effect of scale feeling. **Building and Environment**, [S. l.], v. 248, p. 111060, 2024. DOI: 10.1016/j.buildenv.2023.111060

HUANG, R.; WANG, X.; ZHOU, S. Interior space design and modelling methods for smart homes - integrating BIM and VR technologies. **Applied Mathematics and Nonlinear Sciences**, v. 9, n. 1, p. 1–16, 2024. DOI: 10.2478/amns-2024-1461

INVIDIATA, A.; GHISI, E. Impact of climate change on heating and cooling energy demand in houses in Brazil. **Energy and Buildings**, v. 130, p. 20–32, 2016. DOI: 10.1016/j.enbuild.2016.07.067

IZMIRLIOGLU, M.; SOZER, H. Enhancing virtual indoor environment and energy efficiency with real-time BIM and Unreal Engine integration in building lighting design. **Ain Shams Engineering Journal**, v. 16, p. 103249, 2025. DOI: 10.1016/j.asej.2024.103249

KARMANN, C.; AYDEMIR, B.; CHAMILOTHORI, K.; KIM, S.; SÜSTRUNK, S.; ANDERSEN, M. Saliency prediction in 360° architectural scenes: performance and impact of daylight variations. **Journal of Environmental Psychology**, v. 92, p. 102110, 2023. DOI: 10.1016/j.jenvp.2023.102110

KEMKOMNERD, W.; TIRAPAS, C. The digital twin immersive design process and its potential disruption to healthcare design through a user-centered approach. **Buildings**, v. 14, p. 2839, 2024. DOI: 10.3390/buildings14092839

KESHAVARZI, M.; CALDAS, L.; SANTOS, L. RadVR: a 6DOF virtual reality daylighting analysis tool. **Automation in Construction**, v. 125, p. 103623, 2021. DOI: 10.1016/j.autcon.2021.103623

KOJIMA, Y.; OHKI, C.; KAWANO, A.; TAKAGI, N.; KOGA, Y.; MAJIMA, R.; OKAMOTO, T.; JARRIN, F. Assessing views from office buildings in virtual reality. In: CISBAT 2023. **Journal of Physics: Conference Series**, v. 2600, 112014, 2023. DOI: 10.1088/1742-6596/2600/11/112014

KONG, Z.; HOU, K.; WANG, Z.; CHEN, F.; LI, Y.; LIU, X.; LIU, C. Subjective and physiological responses towards interior natural lightscape: influences of aperture design, window size and sky condition. **Buildings**, v. 12, p. 1612, 2022. DOI: 10.3390/buildings12101612

KWAK, E. Impact of the digital design process in an architectural engineering technology program: Integration of advanced digital tools (work in progress). In: **ASEE ANNUAL CONFERENCE & EXPOSITION, 2023**, Baltimore. Proceedings [...]. Baltimore: ASEE, 2023. DOI: 10.18260/1-2--43497

LEI, C.; KANG, Y.; HAN, Z.; LI, X.; LIU, C.; LIU, X.; LIU, G. A user-centered interactive optimization approach based on immersive virtual reality. In: **Proceedings of the 18th IBPSA Conference**, Shanghai, China, 4–6 set. 2023. p. 458–465. DOI: 10.26868/25222708.2023.1514

LOPES, A. F. O.; SILVA, C. F. e; AMORIM, C. N. D.; BATISTA, J. O. Avaliação do desempenho térmico de ambiente escolar padronizado, em contexto climático brasileiro, por meio de simulação termoenergética. **PARC Pesq. em Arq. e Constr.**, Campinas, SP, v. 14, p. e023030, 2023. DOI: 10.20396/parc.v14i00.8670652

MAKSOU, A.; HUSSIEN, A.; MUSHTAHA, E.; ALAWNEH, S. I. A. R. Computational design and virtual reality tools as an effective approach for designing optimization, enhancement, and validation of Islamic parametric elevation. **Buildings**, v. 13, p. 1204, 2023. DOI: 10.3390/buildings13051204

MARZOUK, M.; ELSHARKAWY, M.; MAHMOUD, A. Analysing user daylight preferences in heritage buildings using virtual reality. **Building Simulation**, v. 15, p. 1561–1576, 2022. DOI: 10.1007/s12273-021-0873-9

MIRDAMADI, M. S.; ZOMORODIAN, Z. S.; TAHSILDOOST, M. Evaluation of occupants' visual perception in day lit scenes: a virtual reality experiment. **Journal of Daylighting**, v. 10, p. 45–59, 2023. DOI: 10.15627/jd.2023.4

MOSCOSO, C.; CHAMILOTHORI, K.; WIENOLD, J.; ANDERSEN, M.; MATUSIAK, B. Regional differences in the perception of daylight scenes across Europe using virtual reality. Part I: effects of window size. **LEUKOS**, v. 18, n. 3, p. 294–315, 2022. DOI: 10.1080/15502724.2020.1854779

MOSCOSO, C.; CHAMILOTHORI, K.; WIENOLD, J.; ANDERSEN, M.; MATUSIAK, B. Window size effects on subjective impressions of daylight spaces: indoor studies at high latitudes using virtual reality. **LEUKOS**, v. 17, n. 3, p. 242–264, 2021. DOI: 10.1080/15502724.2020.1726183

MOSCOSO, C.; NAZARI, M.; MATUSIAK, B. Stereoscopic images and virtual reality techniques in daylighting research: a method-comparison study. **Building and Environment**, v. 214, p. 108962, 2022. DOI: 10.1016/j.buildenv.2022.108962

NATEPHRA, W.; MOTAMEDI, A.; FUKUDA, T.; YABUKI, N. Integrating building information modeling and virtual reality development engines for building indoor lighting design. **Visualization in Engineering**, v. 5, p. 19, 2017. DOI: 10.1186/s40327-017-0058-x

NUNES, G. H.; GIGLIO, T. G. F. Análise de sensibilidade de variáveis termofísicas de habitações brasileiras sob a influência das mudanças climáticas. **Ambiente Construído**, Porto Alegre, v. 22, n. 4, p. 91-120, 2022. DOI: 10.1590/s1678-86212022000400630

PAJEK, L. et al. Using heliodon for solar building design education in the age of computer simulations. **EuroSun 2018 Conference Proceedings**, 2018. DOI: 10.18086/eurosun2018.07.03

PAYEDAR-ARDAKANI, P.; GORJI-MAHLABANI, Y.; GHANBARAN, A. H.; EBRAHIMPOUR, R. Daylight illuminance levels, user preferences, and cognitive performance in office environments: exploring an optimal illuminance range using virtual reality. **Building and Environment**, v. 258, p. 111638, 2024a. DOI: 10.1016/j.buildenv.2024.111638

PAYEDAR-ARDAKANI, P.; GORJI-MAHLABANI, Y.; GHANBARAN, A. H.; EBRAHIMPOUR, R. The impact of changes in daylight illuminance levels on architectural experiences in office environments using virtual reality and electroencephalogram. **Journal of Building Engineering**, v. 96, p. 110487, 2024b. DOI: 10.1016/j.job.2024.110487

PETERS, M. D. J. et al. Updated methodological guidance for the conduct of scoping reviews. **JBI Evidence Synthesis**, v. 18, n. 10, p. 2119–2126, 2020. DOI: 10.11124/JBIES-20-00167

ROCKCASTLE, S.; CHAMILOTHORI, K.; ANDERSEN, M. An experiment in virtual reality to measure daylight-driven interest in rendered architectural scenes. In: **Proceedings of the 15th IBPSA Conference**, San Francisco, CA, USA, 7–9 ago. 2017. p. 2797–2806. DOI: 10.26868/25222708.2017.828

RODRIGUEZ, F.; GARCIA-HANSEN, V.; ALLAN, A.; ISOARDI, G. Subjective responses toward daylight changes in window views: assessing dynamic environmental attributes in an immersive experiment. **Building and Environment**, v. 195, p. 107720, 2021. DOI: 10.1016/j.buildenv.2021.107720

SAIT, U.; LAL, K. G. V.; KUMAR, T.; BHAUMIK, R.; BHALLA, K. A framework outlining a daylight responsive model for smart buildings. In: CISBAT 2019. **Journal of Physics: Conference Series**, v. 1343, p. 012166, 2019. DOI: 10.1088/1742-6596/1343/1/012166

SANCHO-SALAS, A.; FLOR, J.; FISHEL, D. Rethinking solar geometry and design education in the tropics: Limitation and opportunities of current teaching methods. **Advances in Building Education**, v. 8, n. 3, p. 36-49, 2024. DOI: 10.20868/abe.2024.3.5410

SCARAZZATO, P. S. et al. Challenges in lighting education: A recommended practice. **IOP Conference Series: Earth and Environmental Science**, v. 1099, p. 1-13, 2022. DOI: 10.1088/1755-1315/1099/1/012040

SCORPIO, M.; CARLEO, D.; GARGIULO, M.; NAVARRO, P. C.; SPANODIMITRIOU, Y.; SABET, P.; MASULLO, M.; CIAMPI, G. A review of subjective assessments in virtual reality for lighting research. **Sustainability**, v. 15, p. 7491, 2023. DOI: 10.3390/su15097491

SCORPIO, M.; LAFFI, R.; TEIMOORZADEH, A.; SIBILIO, S. Immersive virtual reality as a tool for lighting design: applications and opportunities. In: CISBAT 2021. **Journal of Physics: Conference Series**, v. 2042, p. 012125, 2021. DOI: 10.1088/1742-6596/2042/1/012125

TANG, Y. M.; AU, K. M.; LAU, H. C. W.; HO, G. T. S.; WU, C. H. Evaluating the effectiveness of learning design with mixed reality (MR) in higher education. **Virtual Reality**, London, v. 24, p. 797-807, 2020. DOI: 10.1007/s10055-020-00427-9

TRIANA, M. A.; LAMBERTS, R.; SASSI, P. Should we consider climate change for Brazilian social housing? Assessment of overheating risks using future climate scenarios. **Energy and Buildings**, v. 158, p. 1056–1071, 2018. DOI: 10.1016/j.enbuild.2017.11.003

TRICCO, A. C. et al. PRISMA extension for scoping reviews (PRISMA-ScR): checklist and explanation. **Annals of Internal Medicine**, v. 169, n. 7, p. 467–473, 2018. DOI: 10.7326/M18-0850

VOIVRET, C.; BIGOT, D.; RIVIÈRE, G. A method to compute shadow geometry in open building information modeling authoring tools: automation of solar regulation checking. **Buildings**, Basel, v. 13, p. 1-14, 2023. DOI: 10.3390/buildings13123120

ZENG, W.; ZHANG, H. A virtual reality window view evaluation tool for shading devices and exterior landscape design. In: **CDRF 2023**, Phygital Intelligence. 2024. p. 163–179. DOI: 10.1007/978-981-99-8405-3_14

ZHANG, Y.; JING, X.; LIU, C.; SUN, Y.; WANG, W.; GAO, W. Restorative benefits of classroom windows: a study on the effect of window:wall ratio on task load and learning performance based on VR technology. **International Journal of Low-Carbon Technologies**, v. 19, p. 1491–1500, 2024. DOI: 10.1093/ijlct/ctae101

ZHAO, S. et al. Integrating Internet of Things and Mixed Reality to Teach Performance-Based Architectural Design: A Case Study of Shading Devices. **Education and Information Technologies**, v. 27, p. 9125–9143, 2022. DOI: 10.1007/s10639-022-10998-6