GEOMETRIA SOLAR NO PROCESSO PROJETUAL: dificuldades, limitações e oportunidades para o ensino[1]

LIMA, João Victor de Souza (1); IMAI, Cesar (2)

(1) Universidade Estadual de Londrina (UEL), joao.victorlima@uel.br

(2) Universidade Estadual de Londrina (UEL), cimai@uel.br

RESUMO

Este artigo decorre de uma tese de doutorado em desenvolvimento e parte da constatação de que, embora a geometria solar seja um parâmetro essencial para o desempenho térmico e energético das edificações, sua aplicação no ensino de projeto arquitetônico ainda é limitada. Diante dessa lacuna, o objetivo é apresentar um panorama atual sobre as dificuldades, limitações e oportunidades de aplicação da geometria solar no contexto do ensino e do processo projetual. A partir de uma revisão de escopo, foram analisados 20 estudos publicados na última década. Os resultados revelam dificuldades recorrentes, relacionadas à fragmentação entre disciplinas, à baixa autoeficácia dos alunos e à dificuldade de articular forma e desempenho solar. Em contraponto, destacam-se alternativas promissoras, como metodologias ativas de ensino, ferramentas visuais interativas e imersivas, abordagens híbridas e tecnologias emergentes, ainda não validadas no contexto educacional. Por fim, reforça-se a importância de tratar a geometria solar como instrumento de síntese, por meio de tecnologias acessíveis e abordagens pedagógicas integradoras.

Palavras-chave: geometria solar; processo projetual; ensino; ferramentas de apoio à decisão.

ABSTRACT

This article stems from an ongoing doctoral thesis and starts from the observation that, although solar geometry is an essential parameter for the thermal and energy performance of buildings, its application in architectural design education remains limited. In light of this gap, the objective is to present a current overview of the difficulties, limitations, and opportunities for applying solar geometry in both teaching and the design process. Based on a scoping review, 20 studies published over the past decade were analyzed. The results reveal recurring challenges related to the fragmentation between disciplines, students' low self-efficacy, and the difficulty of articulating form and solar performance. In contrast, promising alternatives stand out, such as active teaching methodologies, interactive and immersive visual tools, hybrid approaches, and emerging technologies that have not yet been validated in educational contexts. Finally, the importance of treating solar geometry as a tool for design synthesis is reinforced, through accessible technologies and integrative pedagogical approaches.

***Keywords**: solar geometry; design process; education; decision-support tools.*

---

1 LIMA, João Victor de Souza; IMAI, Cesar. Geometria solar no processo projetual: dificuldades, limitações e oportunidades para o ensino. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE QUALIDADE DO PROJETO NO AMBIENTE CONSTRUÍDO, 9., 2025, São Paulo. **Anais**... São Paulo: FAUUSP, 2025. p. xx-yy. u

1 INTRODUÇÃO

A geometria solar é um parâmetro de projeto fundamental para se alcançar o conforto ambiental e diminuir a demanda por climatização artificial, devendo ser considerada desde as fases iniciais do projeto, especialmente em climas tropicais e subtropicais (Dias *et al.*, 2023; Nunes; Giglio, 2022). Apesar dessa importância, sua aplicação em projetos arquitetônicos enfrenta diversos obstáculos, como seu ensino frequentemente desconectado da prática projetual, em uma abordagem predominantemente teórica que não desenvolve a abstração necessária para sua aplicação nos projetos, o que resulta em propostas com baixo desempenho térmico e lumínico (Mavromatidis, 2018). Nesse contexto, Lima e Faria (2020) testaram ferramentas digitais de apoio à análise solar no ensino de conforto ambiental e identificaram a necessidade de novas ferramentas com representação simultânea entre forma arquitetônica e desempenho solar resultante. Em uma busca exploratória, é possível observar que, apesar da grande quantidade de ferramentas computacionais voltadas à análise solar, sua adoção e avaliação no ensino é limitada, sendo mais comum em contextos profissionais.

Esta pesquisa é um recorte inicial de uma tese de doutorado e tem por objetivo apresentar um panorama atual sobre as dificuldades, limitações e oportunidades de aplicação da geometria solar no contexto do ensino e do processo projetual.

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 os principais conceitos, lacunas e tendências em determinado campo de estudo, assim como estabelecer uma base conceitual que apoie futuras pesquisas (Peters *et al.*, 2020). Essa abordagem é recomendada especialmente em áreas emergentes ou pouco consolidadas, como é o caso do ensino da geometria solar no processo projetual.

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 dificuldades, limitações e oportunidades associadas à aplicação da geometria solar no processo projetual e no ensino de Arquitetura e Urbanismo?".

No processo de busca, priorizou-se a maior abrangência possível, dentro dos limites de tempo e recursos disponíveis, com registro sistemático das estratégias adotadas. As strings abaixo foram aplicadas nas bases *Scopus, Web of Science* e *SciELO* (campos *title, abstract* e *keywords*), e no Google Scholar (apenas no campo *title*, por inexistência das opções *abstract* e *keywords*), no intervalo de 2015 a 2025:

- *String 1: ("solar geometry" OR "solar shading" OR "solar control" OR "sunlight analysis") AND (teaching OR learning OR education OR curriculum);*
- *String 2: ("solar geometry" OR "solar shading" OR "solar control" OR "sunlight analysis") AND ("architectural design" OR "design process" OR "early design stage").*

A seleção foi realizada pela leitura dos títulos e resumos, complementada pela leitura *skimming* (diagonal) dos estudos completos quando o conteúdo dos resumos não era conclusivo, e se baseou nos seguintes critérios de inclusão:

- Trabalhos que abordam a geometria solar 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:

- Trabalhos que apenas mensuram, comparam ou analisam o impacto da geometria solar e do sombreamento enquanto parâmetro de projeto, não discutindo sua aplicação no ensino ou no apoio à decisão projetual.
- Trabalhos cujas conclusões se limitam a orientações ou prescrições para certas soluções relacionadas à geometria solar em contextos específicos, não discutindo meios para o apoio à decisão em contextos diversificados.
- Trabalhos que apenas apresentam métodos de simulação para avaliação de projetos ou ferramentas para quantificar o sombreamento pós-construção, não discutindo meios para o apoio à decisão projetual.
- Trabalhos com enfoque na produção de energia fotovoltaica, sem associação com o sombreamento.
- Trabalhos que apresentem métodos ou ferramentas para controle e operação de dispositivos de sombreamento móveis responsivos, não auxiliares nas tomadas de decisão durante o processo projetual.
- Trabalhos que abordam o ensino da geometria solar fora do contexto educacional em arquitetura e urbanismo ou engenharia civil.

Os resultados das buscas e triagens seguem apresentados abaixo, para cada *string*:

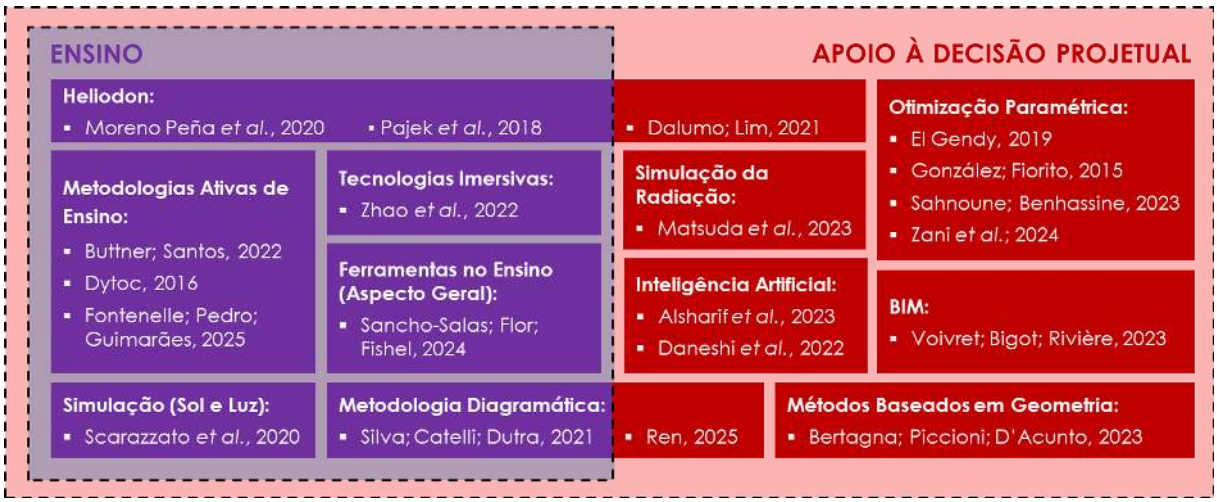
- *String* 1: 63 artigos identificados, 34 com acesso aberto, 12 duplicados, 16 excluídos e 6 elegíveis para a leitura completa.
- *String* 2: 154 artigos identificados, 73 com acesso aberto, 14 duplicados, 50 excluídos e 9 elegíveis para a leitura completa.

Além dos 15 artigos elegíveis, também foram incluídos 5 artigos considerados relevantes para o objetivo da revisão, mas identificados na etapa de busca exploratória, via Google Scholar, antes da restrição da busca ao campo "*title*". Para os 20 artigos finais, foi construída uma planilha de extração com os itens presentes no protocolo PRISMA-ScR, específico para revisões de escopo (Tricco *et al.*, 2018). O processo de extração foi iterativo, com atualização contínua das categorias temáticas e organização dos resultados por meio de análise qualitativa temática — agrupamento dos estudos em categorias emergentes, conforme padrões recorrentes nos objetivos e resultados das publicações (Peters *et al.*, 2020).

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

A análise qualitativa temática permitiu a definição dos dois temas centrais e seus respectivos subtemas, apresentados na Figura 1 e discutidos nos tópicos seguintes. Observa-se uma grande quantidade de pesquisas que exploram ferramentas inovadoras para o apoio à decisão, porém sem validação no contexto educacional.

Figura 1 – Síntese gráfica da análise qualitativa temática



Fonte: Os autores (2025)

3.1 Desafios para a aplicação da geometria solar no ensino e na prática projetual

A integração da geometria solar ao processo projetual encontra obstáculos recorrentes na literatura. Entre os principais, destacam-se as limitações gráficas, geométricas e de visualização espacial do percurso solar, que dificultam a interpretação das cartas solares, o traçado de máscaras de sombra e a tradução dos ângulos solares em parâmetros de projeto (Büttner; Santos, 2022; Dytoc, 2016; Fontenelle; Pedro; Guimarães, 2025). Mesmo com o uso de recursos digitais, essas barreiras persistem, indicando que o problema pode estar mais relacionado à abordagem excessivamente técnica e isolada dos conteúdos, resultado de uma fragmentação metodológica entre as disciplinas técnicas e o ateliê de projeto, o que compromete o desenvolvimento de um raciocínio projetual integrado — os alunos frequentemente não sabem quando ou como aplicar os conceitos aprendidos, o que revela falhas na articulação entre análise e síntese projetual (Fontenelle; Pedro; Guimarães, 2025; Silva; Catelli; Dutra, 2021). Como resultado, também é constatada a baixa autoeficácia dos alunos, percepção de que não dominam o tema a ponto de aplicá-lo com segurança, o que leva a uma aplicação genérica ou apenas estética das estratégias de sombreamento, sem um desempenho térmico e lumínico efetivo (Sancho-Salas; Flor; Fishel, 2024).

As ferramentas de apoio à decisão voltadas à geometria solar apresentam limitações que comprometem sua efetividade no ensino e no projeto arquitetônico. Ferramentas tradicionais, como cartas solares e máscaras de sombra manuais, são vistas pelos alunos como pouco atrativas e de difícil execução, devido à transposição de sistemas de coordenadas cartesianas para sistemas esféricos, o que resulta em sua baixa interatividade com o processo criativo (Silva; Catelli; Dutra, 2021). Ren (2025) critica a abordagem tradicionalista da metodologia diagramática do uso das cartas solares que, embora rigorosa e científica, enfrenta desafios diante da complexidade formal dos elementos de sombreamento atualmente projetados, que tendem a ser não ortogonais. Já as ferramentas físicas, como heliodons, embora eficazes na demonstração do movimento solar, possuem limitações de custo,

precisão, escala e flexibilidade de modelagem, incompatíveis ao fluxo de projeto (Dalumo; Lim, 2021; Moreno Peña *et al.*, 2020).

Por outro lado, softwares computacionais com análise de desempenho, embora ofereçam análises precisas, são criticados por sua complexidade operacional, baixa integração aos ambientes de modelagem mais utilizados, exigência de conhecimento técnico específico e fluxos de entrada pouco compatíveis com o raciocínio do processo criativo, não apresentando a relação direta entre forma e desempenho e, assim, levando a um fluxo de projeto muito baseado em tentativa e erro (Bertagna; Piccioni; D'Acunto, 2023). Soma-se a isso a dificuldade de integrar geometrias complexas dos dispositivos de sombreamento em ambientes BIM e a escassez de ferramentas integradas a eles que extraiam a geometria de sombra como informação útil para a tomada de decisão (Voivret; Bigot; Rivière, 2023). Mesmo ferramentas digitais acessíveis e fáceis de operar, como o SOL-AR 6.2, ainda têm uso limitado ao ensino de conceitos básicos (Silva; Catelli; Dutra, 2021), carecendo de integração com plataformas de modelagem gráfica.

A baixa alfabetização digital dos alunos — e, em alguns casos, dos docentes — também dificulta a adoção de tecnologias mais avançadas. Isso leva à preferência por abordagens híbridas (manuais e digitais), ainda pouco sistematizadas e raramente integradas às etapas de concepção projetual (Büttner; Santos, 2022; Dytoc, 2016; Fontenelle; Pedro; Guimarães, 2025; Sancho-Salas; Flor; Fishel, 2024). Quando disponíveis, essas ferramentas tendem a ser utilizadas de forma superficial, exercendo pouca influência nas decisões formais do projeto. A literatura destaca a urgência de se desenvolver interfaces mais intuitivas, recursos visuais integrados e metodologias pedagógicas que promovam sua real apropriação técnica e projetual, reconhecendo que a integração da geometria solar ao processo de projeto só será possível com sua valorização como instrumento de síntese, não apenas de análise (Sancho-Salas; Flor; Fishel, 2024).

3.2 Caminhos promissores: propostas didáticas e tecnologias emergentes

Diante das dificuldades de aplicar a geometria solar no ensino de projeto, alguns estudos propõem estratégias que a integrem desde as etapas iniciais do processo projetual. Uma das principais abordagens é o uso de metodologias ativas, que estimulam a experimentação e a tomada de decisão, apresentando ganhos no engajamento, retenção do conteúdo e elaboração de soluções consistentes para dispositivos de sombreamento (Büttner; Santos, 2022; Fontenelle; Pedro; Guimarães, 2025; Dytoc, 2016).

Pesquisas ressaltam a importância de tornar a geometria solar mais visual, interativa e contextualizada, utilizando recursos como modelagem tridimensional, animações solares e exercícios práticos desde o início do projeto arquitetônico (Büttner; Santos, 2022). Um dos caminhos observados é o uso de realidade aumentada e mista para simular a trajetória solar em tempo real, integrando visualizações geométricas interativas e manipulação de modelos físicos e permitindo que os alunos compreendam ativamente a relação entre o sol e o ambiente construído (Zhao et al., 2022). Também têm sido desenvolvidas ferramentas de simulação intuitivas, utilizadas no contexto educacional para o estudo holístico da geometria solar associada à compreensão sensorial da luz natural (Scarazzato et al., 2022).

Um dos estudos explora o potencial de integração da geometria solar ao ambiente BIM, que permite análises de sombreamento dentro de plataformas amplamente utilizadas na prática profissional – mesmo que ainda não explore essa alternativa no ensino (Voivret; Bigot; Rivière, 2023). Outras pesquisas exploram a eficácia de métodos híbridos, que combinam ferramentas manuais tradicionais, como o heliodon, com simulações digitais em ambientes paramétricos, como o Rhinoceros, permitindo maior autonomia criativa e um aprendizado mais satisfatório, acessível e adaptado às diferentes fases do projeto (Büttner; Santos, 2022; Pajek *et al.*, 2018).

A literatura recente também aponta para um avanço significativo no desenvolvimento de tecnologias emergentes aplicadas à geometria solar. Constata-se, porém, que elas ainda não têm sido validadas no âmbito educacional, especialmente em contextos tropicais e periféricos. No contexto da otimização paramétrica, o uso de ambientes integrados (Grasshopper + Ladybug + Galapagos) e de algoritmos genéticos tem permitido explorar relações entre forma e desempenho com maior autonomia criativa, viabilizando a avaliação simultânea de inúmeras combinações formais e sua relação com variáveis de iluminação e conforto térmico, possibilitando o uso de novos materiais e tecnologias construtivas que ampliem os limites formais e funcionais dos dispositivos de sombreamento (El Gendy, 2019; González; Fiorito, 2015; Sahnoune; Benhassine, 2023; Zani *et al.*, 2024). No campo das estratégias computacionais integradas, destaca-se a proposta de Bertagna, Piccioni e D'Acunto (2023), que sugerem um framework gráfico digital baseado em geometria (GGM) que apresenta a relação simultânea entre forma arquitetônica e desempenho solar (máscaras de sombra e gráficos de radiação horária).

Também tem sido explorado o uso de métodos avançados de simulação, como o *volume photon mapping*, que permite simular, com fidelidade às variações sazonais, a distribuição e propagação da radiação solar em geometrias complexas, incluindo dispositivos de sombreamento com superfícies especulares (Matsuda et al., 2023).

Por fim, no campo da inteligência artificial, estudos propõem ferramentas que utilizam aprendizado de máquina para prever e otimizar o desempenho de dispositivos de sombreamento desde as etapas iniciais de projeto (Daneshi *et al.*, 2022), permitindo decisões conscientes, mesmo em geometrias amorfas (Alsharif *et al.*, 2023).

4 CONCLUSÕES

Os resultados desta revisão de escopo revelam uma lacuna entre o conhecimento técnico da geometria solar e sua integração às decisões de projeto, especialmente nas fases iniciais. Essa lacuna decorre da fragmentação entre disciplinas, da complexidade gráfica e geométrica do tema, da baixa autoeficácia dos alunos e da dificuldade de articular forma arquitetônica e desempenho solar.

As ferramentas de apoio à decisão analisadas apresentam restrições técnicas e pedagógicas. Softwares de alta precisão carecem de usabilidade e integração com o processo criativo, enquanto recursos físicos são pouco adaptáveis ao fluxo projetual. Apesar disso, os estudos apontam soluções promissoras, como o uso de metodologias ativas de ensino, ferramentas visuais interativas e imersivas, bem como abordagens híbridas (manuais-digitais) de simulação. Evidencia-se também o potencial de tecnologias emergentes, como o uso da inteligência artificial e da otimização paramétrica, que favorecem abordagens mais alinhadas aos modos

contemporâneos de projetar, porém ainda sem validação no contexto educacional.

Como contribuição teórica, o trabalho reafirma a geometria solar como instrumento de síntese, indicando que a transição para um ensino mais efetivo depende de tecnologias acessíveis e abordagens pedagógicas integradoras, capazes de conectar análise, concepção e intenção projetual.

REFERÊNCIAS

ALSHARIF, R. et al. Amorphous shading device optimization using ensemble machine learning and multi-objective optimization. **Energy and Buildings**, v. 283, p. 112840, 2023. DOI: 10.1016/j.enbuild.2023.112840

BERTAGNA, F.; PICCIONI, V.; D'ACUNTO, P. Geometry-based graphical methods for solar control in architecture: A digital framework. **Frontiers of Architectural Research**, v. 12, p. 754–774, 2023. DOI: 10.1016/j.foar.2023.02.006.

BÜTTNER, S. B.; SANTOS, F. M. de M. Ensino de Conforto Térmico: uma busca por métodos mais integrados com as práticas projetuais. In: **Inovações e tendências no ensino e pesquisa em conforto ambiental e sustentabilidade do ambiente construído**. p. 9-10, 2022. ISBN 978-65-00-54215-8.

DALUMO, D. B.; LIM, Y. Comparative study on computer simulation of solar shading performance with heliodon and artificial sky. **Journal of Daylighting**, v. 8, p. 50–64, 2021. DOI: 10.15627/jd.2021.4.

DANESHI, M. et al. Development of a hybrid machine-learning and optimization tool for performance-based solar shading design. **arXiv:2201.03028**, 2022. DOI: 10.48550/arXiv.2201.03028

DIAS, L. de S. et al. 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.

DYTOC, B. C. Motivation and guided complex learning of solar geometry. MUHON: **A Journal of Architecture, Landscape Architecture and the Designed Environment**, University of the Philippines College of Architecture, v. 5, p. 33-39, 2016.

EL GENDY, M. A. Interactive eco-cell parametric shading structure simulation (hexagonal shell of light) by using parametric environmental tool. In: **International Conference on Education and Education Technology**, 14., 2019, Cairo. Anais [...]. Cairo: IOP Publishing, 2019. v. 397, p. 1-15. DOI: 10.1088/1755-1315/397/1/012001.

FONTENELLE, M. R.; PEDRO, A. L. K.; GUIMARÃES, T. P. Metodologias ativas e conforto ambiental: uma proposta para o ensino de geometria solar. **SciELO Preprints**, 2025. DOI:10.1590/SciELOPreprints.11053.

GONZÁLEZ, J.; FIORITO, F. Daylight design of office buildings: optimisation of external solar shadings by using combined simulation methods. **Buildings**, v. 5, n. 2, p. 560–580, 2015. DOI: 10.3390/buildings5020560.

LIMA, J. V. S.; FARIA, J. R. G. Representação gráfica da geometria da insolação no processo projetual: uma proposta de sistematização. **Revista Educação Gráfica**, v. 24, p. 272-292, 2020. ISSN 2179-7374.

MATSUDA, K. et al. New assessment method for solar radiation effects on indoor thermal comfort based on scalar irradiance - Using volume photon mapping. **Building and Environment**, v. 243, p. 110662, 2023. DOI: 10.1016/j.buildenv.2023.110662.

MAVROMATIDIS, L., Coupling architectural synthesis to applied thermal engineering, constructal thermodynamics and fractal analysis: An original pedagogic method to incorporate "sustainability" into architectural education during the initial conceptual stages. **Sustainable Cities and Society**, V. 39, p. 689-707, 2018. DOI: 10.1016/j.scs.2018.01.015.

MORENO PEÑA, J. R. et al. Design of a portable, low-cost, heliodon prototype for the teaching of solar geometry and irradiance in bioclimatic architecture. **Journal of Physics:** Conference Series, v. 1645, p. 01, 2020. DOI: 10.1088/1742-6596/1645/1/012014.

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.

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.

REN, R. The architectural paradigm and discourse of solar-control design: A case study of victor olgyay's shading devices. In: **FUOCO AMICO** - Fragments of a Theoretical Discourse in Architectural Design Research, v. 10, 2025. p. 283-294. ISSN 2385-2291.

SAHNOUNE, S.; BENHASSINE, N. A systematic framework for evolutionary multi-objective optimization to complex building design problems at the early design stage. **E3S Web of Conferences**, v. 436, p. 01001, 2023. DOI: 10.1051/e3sconf/202343601001.

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.

SILVA, F. S. da; CATELLI, F.; DUTRA, C. M. Geometria solar na escola: uma prática com cartas solares. **Revista Brasileira de Ensino de Física**, v. 43, p. e20200520, 2021. DOI: 10.1590/1806-9126-RBEF-2020-0520.

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.

ZANI, A. et al. Customized shading solutions for complex building façades: the potential of an innovative cement-textile composite material through a performance-based generative design. **Construction Innovation**, v. 24, n. 1, p. 256-279, 2024. DOI: 10.1108/CI-01-2023-0014.

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.