

Fostering Sustainability in the Early Stages of the Architectural Design process: a Creative Exploration of AI Generative Models

Sara Regiane Chornobai¹, Angelica Paiva Ponzio², Léia Miotto Bruscato³,
Cristian Vinicius Machado Fagundes⁴

^{1,2,3,4} Federal University of Rio Grande do Sul, Porto Alegre, Brazil

¹sararchornobai@gmail.com; ²angelica.ponzio@gmail.com; ³arq.leiab@gmail.com;

⁴fagundes@prof.ufn.edu.br

Abstract. The field of architecture is experiencing transformative changes with the rise of Artificial Intelligence (AI). This study investigates the use of generative models like Large Language Models (LLM) and Generative Diffusion Models (GDM) in architectural design, focusing on sustainability. Utilizing the concept of "active human agency", the research evaluates tools like DALL-E 2 (Bing) and ChatGPT (GPT-4) for creating environmentally responsive references in the early phases of the design process. Employing an explorative and qualitative methodology, the investigation includes architectural characteristics of climatic archetypes and concepts related to architecture-biology, applied to different environmental contexts. Initial findings reveal the AI potential in creating environmentally responsive references, with certain limitations in specific interactions and interpretations. The conclusion emphasizes these tools as collaborative aids in early design stages, and underscores the importance of "active human agency" for meaningful, responsible results, contributing to sustainability in early architectural design processes.

Keywords: Artificial Intelligence, Generative Models, Architectural Design Process, Sustainability, Active Human Agency.

1 Introdução

O campo da arquitetura tem passado por significativas transformações com o contínuo desenvolvimento das tecnologias digitais. Mais recentemente, face à crescente evolução da Inteligência Artificial (IA), ferramentas alternativas se apresentam como novas perspectivas para potencializar a criatividade e a inovação projetual. Nessa área, destaca-se o surgimento dos modelos gerativos que, atualmente alicerçados em um vasto banco de

dados não especializados, são capazes de gerar, a partir de *prompts* (comandos) textuais, imagens que até então eram inexistentes. Essas imagens, por sua vez, apresentam grande potencial não somente para estimular a criatividade, como também para orientar o início do desenvolvimento de projetos a partir da criação de referências gráficas e formação de repertório conceitual. Neste caso, a investigação pretende ser guiada por um dos princípios da sustentabilidade – de adequação ao contexto local –, buscando compreender maneiras de aliar a conscientização ambiental e a exploração junto à IA nos estágios iniciais do processo de projeto arquitetônico.

O início do processo de projeto é marcado por técnicas de exploração criativa, fase em que o projetista recorre à busca por referências projetuais ou analogias que favoreçam a inovação (Kowaltowski, Bianchi & Petreche, 2011). Em virtude das melhorias para armazenar e processar dados computacionais, as novas ferramentas disponibilizadas oferecem diferentes possibilidades criativas que podem auxiliar a fase de concepção arquitetônica (Guida, 2023). Tendo conhecimento de que essas ferramentas estão em estágio inicial de desenvolvimento (Bolojan, Vermissio & Yousif, 2022), faz-se necessário compreender como podem ser empregadas no projeto arquitetônico, a fim de agregar qualidade e melhorar sua apropriação pelos projetistas.

Este estudo emerge de trabalhos desenvolvidos em uma pesquisa exploratória e experimental denominada estratégia *Design Intelligence*, e busca a aplicação do conceito de *active human agency* – ou agenciamento humano ativo (Fanni, Steinkogler, Zampedri & Pierson, 2022) – no emprego de Modelo de Linguagem de Grande Escala (LLM) e Modelo de Difusão (DM). Em conclusões iniciais da estratégia *Design Intelligence*, pode-se compreender que imagens geradas no modelo generativo de difusão DALL-E 2 (OpenAI) têm o potencial de auxiliar no direcionamento de referências ambientalmente responsivas (Ponzio, Chornobai, Fagundes, Rodrigues & José, 2023).

A presente investigação visa ampliar esses estudos, incluindo, além do emprego de um modelo de geração de imagens, uma ferramenta de LLM, o ChatGPT (GPT-4/OpenAI), analisando sua capacidade para novas oportunidades de exploração. Especificamente nesta fase da pesquisa, são investigadas, além das características arquitetônicas de arquétipos de projetos climáticos baseadas em Steven Szokolay (2019), características conceituais referentes ao campo ampliado da arquitetura-biologia (Vidler, 2013). O objetivo geral é avaliar, por meio de um agenciamento humano ativo, as potencialidades e limitações destas ferramentas na geração de referências orientadas à sustentabilidade nas fases iniciais do processo de projeto arquitetônico, levando em consideração a correspondência entre estes resultados e o referencial bibliográfico abordado nesta pesquisa.

1.1 Processo de projeto e as tecnologias digitais

Na arquitetura, as tecnologias digitais são utilizadas com objetivos relacionados à automação de tarefas, simulação computacional, previsão de cenários, otimização de processos, modelagem de informações, gerenciamento integrado, dentre outros (Claypool, 2022). No que diz respeito ao processo de projeto, Rivka Oxman (2008) afirma que as tecnologias digitais alteram não somente os meios instrumentais como também os procedimentos mentais. Isso porque a sofisticação digital oferece uma exploração formal de modo racionalizado, com múltiplas alternativas baseadas em diversos critérios, que dificilmente seriam elaboradas a partir dos métodos convencionais. Assim, os projetistas podem se concentrar nas análises e avaliações dessas alternativas para, então, selecionar a mais adequada ao conceito e princípios projetuais estabelecidos (Oxman, 2008).

Segundo Anthony Vidler (2013), a atualidade impõe uma condição exploratória para a arquitetura, na qual seus limites são sombreados e seu campo amplia-se ao buscar inspiração formal e programática em outras disciplinas e tecnologias. Para o autor, as tecnologias digitais ajudam a difundir questões socioambientais postas em pauta para a arquitetura, pois possibilitam trabalhar com múltiplos dados e produzir alternativas de projeto. Essas alternativas, que serão avaliadas com base em argumentos formais e não aleatórios, *podem construir novas versões que talvez constituam, pela primeira vez, uma estética verdadeiramente ecológica* (Vidler, 2013, p.251).

1.2 Inteligência Artificial e as ferramentas generativas

Tecnologias digitais baseadas em IA prometem novas perspectivas ao processo de projeto. De particular interesse nesta pesquisa, encontram-se dois tipos de modelos generativos que funcionam por meio de aprendizado de máquina a partir de dados de treinamento, a saber: os Modelos de Difusão (*Diffusion Models* – DM), para geração de imagens, e os Modelos de Linguagem de Grande Escala (*Large Language Models* – LLM), capazes de sustentar uma conversa coerente em linguagem natural. Modelos de Difusão que produzem imagens, como o DALL-E 2 da OpenAI, empregam técnicas de aprendizado profundo a partir do Processamento de Linguagem Natural (*Natural Language Processing* – NLP). Estes modelos são treinados de modo a parear texto e imagens; após receber um *prompt* textual, convertem o texto em uma representação matemática (*embedding*), que é então transformada em imagens. Já nos modelos de geração de texto, como o GPT (*Generative Pre-trained Transformer*), uma grande quantidade de dados de texto é empregada para interagir em uma conversação escrita com humanos. Mais recentemente, a OpenAI disponibilizou o ChatGPT Plus, uma versão aprimorada do modelo de linguagem GPT que, além de empregar o GPT-4, inclui o acesso a vários *plug-ins*.

Para Bolojan, Vermissio & Yousif (2022), alguns desafios apresentam-se ao incluir os atuais modelos de geração de imagens no processo de projeto, visto que a expressão arquitetônica reduzida a uma linguagem apenas textual pode causar perdas na complexidade das intenções do projeto. Entretanto, George Guida (2023) pontua que a linguagem textual volta a ser relevante como uma forma de expressão projetual. Em sua análise, além de evidenciar uma prática mais ligada à curadoria no treinamento de dados e linguagem, defende que se faz necessário o desenvolvimento de interfaces mais intuitivas aos projetistas, favorecendo uma maior apropriação ao aumentar o controle e a confiabilidade no processo (Guida, 2023).

Nesse sentido, o conceito de agência pode ser definido como a capacidade de agir de um ser ou a manifestação dessa capacidade, que não é necessariamente definida pelas intenções desse ser, mas pelos efeitos e consequências produzidos ou induzidos por ele (Silva, 2018). Já o “agenciamento humano ativo” é um conceito que se refere à possibilidade do ser humano contestar ou retificar decisões habilitadas por IA, uma abordagem que fortalece a autonomia do indivíduo e os direitos fundamentais na era digital (Fanni, Steinkogler, Zampedri & Pierson, 2022).

No contexto da arquitetura, essa ideia de agenciamento humano ativo assume uma importância particular quando nos apropriamos de modelos generativos que empregam IA. Sugere-se aqui que, ao trabalhar com essas tecnologias digitais, o arquiteto crie em conjunto à máquina, desenvolvendo um processo em que esta contribui com o projeto ao passo que o humano conduz, analisa e avalia as respostas e alternativas oferecidas pelas ferramentas. A ênfase no “agenciamento humano ativo” pode refletir uma tendência contemporânea na arquitetura, em que a IA é empregada de modo orientado para potencializar a criatividade e inovação projetual.

1.3 Arquitetura sustentável e os conceitos biológicos

A ideia de sustentabilidade pode ser compreendida, basicamente, por três aspectos principais: o social, o econômico e o ambiental (Heywood, 2015). Na arquitetura, um projeto que se propõe mais sustentável deve compreender esses princípios e integrar o contexto ambiental desde o início do processo (Szokolay, 2019). Conforme Heywood (2015), a compreensão da relação com o lugar irá oferecer condicionantes ao desenho do objeto edificado, a exemplo do clima, que é uma condicionante diretamente relacionada à questão local e que interfere nos aspectos de conforto do usuário e, assim, na sustentabilidade da edificação (Heywood, 2015).

A arquitetura que leva em conta o ser humano e sua adaptação ao clima pode ser conceituada como bioclimática. Fundamentada pela bioclimatologia – ciência que estuda as relações entre clima e seres vivos –, o projeto bioclimático propõe estratégias de adaptação da edificação às características climáticas locais visando proporcionar conforto térmico aos usuários (Olgay, 1968 *apud* Lamberts, Dutra & Pereira, 2014).

As estratégias bioclimáticas podem orientar o desenvolvimento da concepção projetual quanto à implantação, geometria, composição de materiais, posicionamento e dimensionamento dos fechamentos e fentestrações, acesso solar e fluxos de ar. Essas estratégias são formalmente expressivas e reconhecíveis na arquitetura vernacular, considerada genuína a determinado contexto (Lamberts, Dutra & Pereira, 2014). Nesse sentido, Szokolay (2019) expõe quatro principais arquétipos de projeto climáticos: clima frio; clima temperado; clima quente e seco e; clima quente e úmido. Eses arquétipos apresentam características visuais identificáveis em referências projetuais e podem ser empregadas como parâmetros qualitativos. De interesse a esta pesquisa, esses parâmetros relacionam-se à: materialidade, forma e elementos de composição volumétrica (Figura 1).

| Arquétipos Climáticos | Clima Frio | Clima Temperado | Clima Quente e Seco | Clima Quente e Úmido |
|--|----------------------------|--|--|--|
| Materialidade | Madeira; Pedra; Tijolo | Madeira; Pedra; Tijolo; Concreto | Adobe; Terra; Pedra; Têxteis | Madeira; Bambu; Fibra; Taipa |
| Forma | Compacta | Compacta ou fragmentada | Compacta | Fragmentada |
| | Centralizada | Linear ou centralizada; Casa Solar | Centralizada; Casa Pátio | Linear |
| | Solo | Solo ou elevada | Solo | Elevada |
| Elementos de composição volumétrica | Chaminé; Jardim de inverno | Chaminé; Jardim de inverno; Marquise; Brise; Varanda; Pergolado; Prateleira de luz | Tanque ou espelho d'água; Pergolado; Pátio com vegetação; Torre de vento; Muxarabi | Cobertura ventilada; Direcionadores de vento; Cobogó; Varanda; Cobertura dupla |

Figura 1. Seleção de parâmetros qualitativos de arquétipos climáticos expostos por Szokolay (2019). Fonte: Autores, 2023.

Além da bioclimatologia, outros conceitos referentes à biologia podem ser considerados como associações ao campo ampliado da arquitetura. Essa expansão do campo disciplinar pode, conforme Vidler (2013), oferecer respostas projetuais que correspondam a uma estética mais representativa do ideário ecológico. Nesta pesquisa, são selecionados quatro conceitos inspirados na biologia: biofilia; biomimética; biomorfismo e; bioarquitetura.

Baseada no design biofílico, a arquitetura biofílica procura projetar espaços que ofereçam maior qualidade a partir da perspectiva do bem-estar e conforto ambiental, explorando relações entre a natureza e a fisiologia do ser humano. Os seus princípios, definidos por Stephen Kellert, envolvem a promoção de ambientes mais saudáveis, criativos e produtivos por meio de: elementos ambientais; formas naturais; padrões e processos naturais; luz e espaço; relação com o local; relação humana com a natureza (Kellert & Calabrese, 2015). Portanto, mais perceptível em ambientes internos, são características dessa arquitetura espaços: abertos e conectados; naturalmente iluminados e ventilados; que permitam vistas ao exterior; que apresentem materiais com formas, texturas e cores que remetem à natureza; que contenham elementos naturais; etc. (Browning *et al.*, 2014).

O biomimetismo consiste em analogias funcionais de estratégias da natureza, seus elementos e organismos (Kowaltowski, Bianchi & Petreche, 2011). Mais recentemente, Janine Benyus define que a biomimética é uma

disciplina que pretende solucionar problemas humanos a partir da emulação consciente de formas, processos e ecossistemas naturais. Na arquitetura, Michael Pawlyn (2016) defende que esta ciência pode ser utilizada como uma ferramenta de inovação aos arquitetos que desejam fornecer soluções transformadoras e verdadeiramente sustentáveis. Segundo o autor, essa abordagem concentra-se no entendimento funcional da biologia, o que pode ou não transparecer na estética final do edifício ao expressar características físico-formais inspiradas em organismos e padrões da natureza. Já o biomorfismo, ou a arquitetura biomórfica, procura por uma expressão estética presente em organismos vivos, apresentando características formais que claramente evocam e assemelham-se a elementos orgânicos, como formas vivas e formatos figurativos associados a seres biológicos (Pawlyn, 2016).

Por fim, a bioarquitetura pode ser compreendida como “arquitetura com vida” (Van Lengen, 2021), um conceito que visa a integração entre a natureza e o espaço construído, com materiais naturais e princípios em harmonia com o ambiente. Também pode ser entendida como uma abordagem multiescalar, pois prevê a incorporação da natureza na arquitetura em diversos aspectos – da forma, à função e à materialidade –, buscando um equilíbrio entre a sua representação concreta e abstrata (Ripley & Bhushan, 2016). A bioarquitetura pode ser caracterizada, então, pela adoção, de modo harmônico, de técnicas e sistemas naturais: adequação ao local; ventilação, iluminação e aquecimento naturais; tecnologias de baixo impacto ambiental; materiais naturais, locais, renováveis, pouco processados ou recicláveis; preservação e restauração dos recursos naturais (materiais e energéticos); formas vernáculas simples e/ou inspiradas no meio natural (Van Lengen, 2021).

2 Metodologia

Partindo de um embasamento teórico, esta pesquisa desenvolve-se por meio de uma abordagem qualitativa e experimental (Gil, 2002). Os experimentos realizados exploram as limitações e potencialidades das novas ferramentas digitais vinculadas à IA nas fases iniciais do processo de projeto arquitetônico. Divididos em duas fases, foram utilizadas as seguintes ferramentas: primeiramente, uma interação textual com o ChatGPT (GPT-4); e, na sequência, o “criador de imagens” disponibilizado pela Microsoft no buscador Bing que emprega como modelo o DALL-E 2 da OpenAI.

Como tema de investigação, foram exploradas características arquitetônicas de arquétipos de projeto climático (Szokolay, 2019) e conceitos projetuais relacionados ao campo ampliado da arquitetura-biologia. As características dizem respeito a três parâmetros qualitativos: materialidade; forma; elementos de composição volumétrica. Já os conceitos referem-se a: bioclimática; biofísica; biomimética; biomórfica e; bioarquitetura. Como recorte da investigação, adota-se um programa de baixa complexidade programática,

uma unidade habitacional (uma casa pequena), e quatro contextos ambientais, um para cada arquétipo climático: Alpes europeus – clima frio; costa Mediterrânea – clima temperado; deserto do Saara – clima quente e seco; floresta Amazônica – clima quente e úmido. É importante esclarecer que os contextos foram definidos de modo a evitar resultados com características enviesadas (políticas e/ ou culturais), utilizando, portanto, termos que se referem a regiões ambientais que possuem paisagens reconhecíveis.

Na primeira fase foi empregado o LLM ChatGPT com o modelo GPT-4 (OpenAI). O experimento foi conduzido de forma interativa, por meio de linguagem natural tanto para as perguntas (*prompts*) – *inputs*, como para as respostas – *outputs*, assemelhando-se a uma conversa. Já a segunda fase tratou da geração de imagens empregando o DM DALL-E 2 (OpenAI) na versão fornecida pelo buscador Bing (Microsoft). Nesse caso, o experimento foi conduzido de modo direto, por meio de *prompts* de linguagem natural como *inputs*, obtendo imagens como *outputs*. A análise dos resultados nas duas fases foi realizada por meio de uma abordagem comparativa, verificando se tanto as definições conceituais como as características exemplares dos arquétipos climáticos e seus respectivos contextos ambientais estavam de acordo com o referencial bibliográfico desta pesquisa. Esta verificação qualitativa levou em consideração a similaridade ou aproximações das respostas, que foram avaliadas com base na coerência das informações apresentadas pelas ferramentas, sendo estas classificadas em: condizentes; não condizentes e; vagas ou inconsistentes.

3 Resultados

Conforme indicado na abordagem metodológica, os resultados foram abordados em duas fases: primeiro pelo experimento interativo (ChatGPT/GPT-4) e, segundo, pelo experimento direto (DALL-E 2/Bing). É importante destacar que, previamente aos experimentos, foram realizados testes para verificar as melhores práticas de abordagem junto às ferramentas. A partir disso, foi possível compreender que, com relação à ferramenta ChatGPT (GPT-4), a condução da interação deve ser orientada contextualizando o assunto de modo claro e objetivo, adicionando gradativamente níveis de complexidade em uma mesma conversa. Com relação à ferramenta DALL-E 2 (Bing), foi possível compreender que os *prompts* devem estabelecer características tangíveis, podendo ser utilizadas frases completas em vez de palavras-chaves e mais de uma frase em uma mesma descrição. Além disso, a utilização de termos que definem o tipo de representação da imagem (ilustração, render, fotografia, etc.), a qualidade do objeto (projeto, design, arquitetura) e o seu contexto ambiental (floresta, deserto, etc.) interferem significativamente nos resultados alcançados.

3.1 Fase 01: Experimento Interativo — ChatGPT (GPT-4)

Primeiramente, a fim de contextualizar a ferramenta, foi realizado um *input* com as características arquitetônicas referentes ao arquétipo climático (Szokolay, 2019), identificadas na Figura 1, para o clima quente e úmido da floresta Amazônica. Como *output*, a ferramenta gerou um esclarecimento coerente sobre os tópicos abordados, adicionando informações explicativas referentes às características arquitetônicas do *input* (ex.: *Cobertura ventilada* – “*Uma cobertura que permite a circulação de ar, ajudando a manter a temperatura interna mais confortável.*”).

Em seguida, foi realizado um *input* solicitando definições sobre os conceitos projetuais da biologia na arquitetura (bioclimática; biofísica; biomimética; biomórfica e; bioarquitetura). Como *output*, a ferramenta ofereceu definições gerais, objetivas e condizentes ao referencial bibliográfico desta pesquisa (ex.: *Bioarquitetura* – “*A bioarquitetura é um conceito que se baseia na criação de estruturas e edifícios inspirados e harmonizados com a natureza. Ela busca minimizar o impacto ambiental da construção e operação de edifícios, utilizando materiais naturais e renováveis, e incorporando elementos como energia solar e água da chuva.*”).

Após, foi dado um *input* solicitando a criação de cinco *prompts* – que pudessem ser aplicados em um modelo de difusão – para gerar imagens de uma casa pequena no respectivo contexto ambiental, considerando que cada *prompt* deveria relacionar as três características arquitetônicas do arquétipo a cada um dos cinco conceitos projetuais. Como *output*, a ferramenta elaborou *prompts* que relacionaram os dados das características do arquétipo a termos/descrições referentes aos conceitos projetuais de maneira condizente ao referencial bibliográfico (ex.: *Bioarquitetura* – “*Uma pequena casa na floresta amazônica, construída com materiais naturais e renováveis como madeira, bambu e fibra. A casa é elevada do solo para evitar a umidade e permitir a ventilação por baixo. A cobertura é ventilada e inclinada para facilitar a drenagem da água da chuva.*” – grifo verde na Figura 2).

A partir de então, foi gerada a seguinte sequência de *inputs* para os demais arquétipos climáticos: primeiro, a contextualização das características arquitetônicas do arquétipo; depois, a solicitação de geração de *prompts* com a definição do objeto arquitetônico, o contexto ambiental e as respectivas características arquitetônicas, relacionando-os aos conceitos projetuais. Nessa sequência de *inputs*, percebeu-se que os *outputs* referentes à contextualização das características arquitetônicas adicionaram algumas informações não condizentes, que se referiam ao primeiro arquétipo climático. No entanto, essas incoerências não prejudicaram a continuidade do experimento, visto que não foram utilizadas na geração dos *prompts*.

Na geração de *prompts* para cada arquétipo, além de compreender que a ferramenta ChatGPT (GPT-4) possibilita relacionar dados de maneira coerente, ainda foi possível compreender que, de forma geral, a ferramenta relaciona o conceito projetual a termos que o caracterizam ou que o

descrevem. Ou seja: “*em harmonia com o clima local*”, para a arquitetura bioclimática; “*incorpora e promove a conexão e a interação com a natureza*”, para a biofílica; “*inspirada na natureza*”, “*com padrão natural*” ou “*que imita*” algo, para a biomimética; “*formas orgânicas*”, “*forma que se assemelha a*” algo, para a biomórfica e; materiais “*naturais*”, “*locais*”, “*renováveis*” e “*biodegradáveis*”, para a bioarquitetura. Com relação aos conceitos da biomimética e do biomorfismo, ainda foi possível perceber uma tentativa – mesmo que genérica e superficial, de relacionar características arquitetônicas a seres vivos, organismos ou sistemas naturais, sendo alguns deles diretamente relacionados ao seu contexto ambiental, como: “*cone de pinheiro*”; “*animal do deserto*”; “*formas irregulares da floresta*”; “*duna de areia*”; “*folhas*”; “*formação rochosa*”; “*plantas*”; “*ninho de pássaro*”; “*colmeia*”; “*cupinzeiro*”; “*concha*”; etc. Enfim, os resultados dessa fase – *prompts* (*outputs*) – possibilitaram a continuidade da investigação na fase seguinte.

3.2 Fase 02: Experimento Direto — DALL-E 2 (Bing)

Com base nos resultados alcançados anteriormente, o experimento direto no DALL-E 2 (Bing) solicitou uma geração de imagens para cada *prompt* desenvolvido no experimento interativo. Cada *input* nesse modelo de difusão gera quatro *outputs*, ou seja, quatro imagens. Portanto, considerando que para cada um dos quatro arquétipos foram solicitados cinco conceitos projetuais – gerando vinte *prompts* – ao total foram analisadas oitenta imagens. A Figura 2 apresenta uma seleção das imagens mais representativas geradas para cada conceito projetual, relacionando-o ao arquétipo climático em seu contexto ambiental.

Ao procurar correspondências entre os *outputs* e o referencial bibliográfico, a análise verificou se as imagens apresentaram as características arquitetônicas descritas nos *prompts* e se as mesmas são coerentes às definições dos conceitos projetuais. Com relação às descrições, foi possível compreender que alguns dos termos utilizados como *inputs* – provenientes do próprio referencial bibliográfico –, mesmo que se referindo a características físico-tangíveis, não foram claramente expressos nos *outputs*, como, por exemplo: “*forma fragmentada*”; “*torre de vento*”; “*cobertura ventilada*”; “*cobogó*”; “*pátio central*”; “*jardim de inverno*”; “*pergolado*”. Supõe-se, portanto, que termos muito específicos de determinada literatura possam não ser tão bem compreendidos como dados de *input* no gerador de imagens não especializado. Ainda assim, de forma geral, as características arquitetônicas apresentadas nas imagens condizem com aquelas descritas nos *prompts*. Sobre os conceitos projetuais, apesar de identificar que a literatura sobrepõe algumas definições e características, nota-se que os *outputs* expressam distinções entre os conceitos explorados. Portanto, é possível compreender que as características conceituais inseridas como *inputs* no gerador de imagens DALL-E 2 (Bing) interferem na expressão estético-formal dos *outputs* e de modo condizente ao referencial bibliográfico.

| | CLIMA FRIO | CLIMA TEMPERADO | CLIMA QUENTE E SECO | CLIMA QUENTE E ÚMIDO |
|------------------|------------|-----------------|---------------------|----------------------|
| ARQ. BIOMÍMATICA | | | | |
| ARQ. BIOFÍLICA | | | | |
| ARQ. BIOMIMÉTICA | | | | |
| ARQ. BIOMÓRFICA | | | | |
| BIOARQUITETURA | | | | |

Figura 2. Seleção de imagens representativas do experimento direto, relacionando arquétipos climáticos aos conceitos projetuais. Fonte: Autores, 2023.

4 Discussão e considerações finais

Avaliando-se os resultados desta investigação, é possível considerar que, de maneira geral, ambas as ferramentas oferecem potencialidades quanto à exploração criativa para geração de referências gráficas condizentes às características arquitetônicas de arquétipos climáticos e aos conceitos projetuais associados ao campo ampliado da arquitetura-biologia. Assim, com relação aos parâmetros qualitativos abordados, as ferramentas podem contribuir com a formação de um repertório conceitual que favoreça a criação de uma estética mais alinhada à ideia de sustentabilidade na arquitetura.

Observaram-se, no entanto, as seguintes limitações na condução da investigação. Sobre a interação com o ChatGPT (GPT-4), percebe-se que uma sequência muito longa de *inputs* em uma mesma conversa abordando diferentes temas – mesmo gradativamente –, pode desviar o enfoque dos questionamentos e redirecionar a objetividade e coerência dos *outputs*. Nesse caso, sugere-se a realização de conversas curtas e distintas a cada tema abordado. Sobre a ferramenta de geração de imagens DALL-E 2 (Bing), percebe-se que alguns termos muito específicos à determinada disciplina podem carregar vieses inerentes ao treinamento genérico do modelo, resultando em interpretações inesperadas. Entretanto, esses mesmos vieses podem servir como catalisadores para explorações criativas de maneira inovadora. Ainda assim, visando aperfeiçoar esses resultados, sugere-se uma investigação mais aprofundada quanto às descrições arquitetônicas nos *prompts*.

Com relação às ferramentas avaliadas, conclui-se que estas podem colaborar com o trabalho criativo, auxiliando projetistas na exploração conceitual e geração de referências nas fases iniciais de projeto, especialmente porque as interações em linguagem natural dessas interfaces as tornam intuitivas e inovadoras. Esta pesquisa ainda sugere a importância e o entendimento do “agenciamento humano ativo”, visto que a condução e a avaliação feitas pelo projetista são cruciais para alcançar resultados mais significativos e responsáveis. Por fim, objetivando explorar as potencialidades e limitações de ferramentas generativas de IA em arquitetura por meio do “agenciamento humano ativo”, esta pesquisa pretende contribuir com o aperfeiçoamento da capacidade de resolução de problemas relacionados à sustentabilidade nas fases iniciais do processo de projeto arquitetônico, assim como enriquecer o pensamento crítico acerca destas tecnologias à arquitetura.

Agradecimentos. Gostaríamos de agradecer à UFRGS/DS/CAPES, pelo financiamento parcial desta pesquisa, e também à OPEN AI pelo acesso ao Chat-GPT (GPT-4).

Referências

- Benyus, J. (1997). Biomimética: Inovação inspirada pela natureza. São Paulo, SP: Editora Cultrix.
- Bolojan, D., Verismo, E., & Yousif, S. (2022). Is Language All We Need? A Query Into Architectural Semantics Using A Multimodal Generative Workflow. Conference of the Association for Computer-Aided Architectural Design Research in Asia (CAADRIA), V. 1, 353-362. <https://doi.org/10.52842/conf.caadria.2022.1.353>
- Browning, W. D., Ryan, C. O., & Clancy, J. O. (2014). 14 Patterns of Biophilic Design. New York: Terrapin Bright Green. <https://www.terrapinbrightgreen.com/reports/14-patterns/>

- Claypool, M. (2022). The Digital in Architecture: Then, Now and in the Future. 2019.
<https://space10.com/project/digital-in-architecture/>
- Fanni, R., Steinkogler, V. E., Zampedri, G., & Pierson, J. (2022). Enhancing human agency through redress in Artificial Intelligence Systems. *AI & Soc.*
<https://doi.org/10.1007/s00146-022-01454-7>
- Gil, A. C. (2002). Como elaborar projetos de pesquisa. (4.ed.) São Paulo: Ed. Atlas.
- Guida, G. (2023). Multimodal Architecture: Applications of Language in a Machine Learning Aided Design Process. Conference of the Association for Computer-Aided Architectural Design Research in Asia (CAADRIA) 2022, 2, 561-570.
<https://caadria2023.org/conference>
- Heywood, H. (2015). 101 regras básicas para uma arquitetura de baixo consumo energético. [tradução Alexandre Salvaterra]. São Paulo: Gustavo Gili.
- Kellert, S. R., & Calabrese, E. F. (2021). The practice of Biophilic Design. 2015.
<https://www.biophilic-design.com/>
- Kowaltowski, D. C. C. K., Bianchi, G., & Petreche, J. R. D. (2011). A criatividade no processo de projeto. In Kowaltowski et al. (Eds.). O processo de projeto em arquitetura. São Paulo: Oficina de Textos, p. 21-56.
- Lamberts, R., Dutra, L., & Pereira, F. O. R. (2014). Eficiência Energética na Arquitetura. (3.ed.) Rio de Janeiro.
- Oxman, R. (2008). Digital architecture as a challenge for design pedagogy: theory, knowledge, models and medium. *Design Studies*, 29, p. 99-120.
- Pawlyn, M. (2016). Biomimicry in Architecture. (2.ed.) Londres: RIBA Publishing.
- Ponizio, A. P., Chornobai, S. R., Fagundes, C. V. M., Rodrigues, R. C. & José, G. C. H. (2023). Exploring Creative AI Thinking in the Design Process The Design Intelligence Strategy. Conference of the Association for Computer-Aided Architectural Design Research in Asia (CAADRIA) 2022, 2, 49-58.
<https://caadria2023.org/conference>
- Ripley, R. L., & Bhushan, B. (2016). Bioarchitecture: bioinspired art and architecture — a perspective. *Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, The Royal Society Publishing, 374, n. 2073.
<https://royalsocietypublishing.org/doi/10.1098/rsta.2016.0192>
- Silva, P. M. (2018). A virada sociomaterialista e a agência dos não-humanos. *Conhecimento em Ação*, Rio de Janeiro, 2(3), jul/dez.
<https://brapci.inf.br/index.php/res/download/110188>
- Szokolay, S. V. (2019). Introdução à ciência arquitetônica: a base do projeto sustentável. [tradução Maria Clara Cescato]. São Paulo: Editora Perspectiva.
- Van Lengen, J. (2021). Manual do arquiteto descalço. (2. ed.) Porto Alegre: Bookman.
- Vidler, A. (2013). O campo ampliado da arquitetura. In: Sykes (Eds.). O campo ampliado da arquitetura. São Paulo, SP: Cosac Naify, p. 242-251.