

Amanda Diniz Anselmo

Modelagem Paramétrica, Simulação Ambiental e BIM
Aplicados ao Processo de Concepção de um Edifício de
Uso Misto

Amanda Diniz Anselmo

Modelagem Paramétrica, Simulação Ambiental e BIM
Aplicados ao Processo de Concepção de um Edifício de
Uso Misto

Monografia apresentada ao Curso de Arquitetura e
Urbanismo da Universidade Federal de Ouro Preto como
requisito parcial para obtenção do título de Bacharela em
Arquitetura e Urbanismo

Orientador: Prof. Dr. Alexandre Bomfim

Ouro Preto 2026



FOLHA DE APROVAÇÃO

Amanda Diniz Anselmo

Modelagem paramétrica, simulação ambiental e BIM aplicados ao processo de concepção de um edifício de uso misto

Monografia apresentada ao Curso de Arquitetura e Urbanismo da Universidade Federal de Ouro Preto como requisito parcial para obtenção do título de Bacharela em Arquitetura e Urbanismo

Aprovada em 23 de julho de 2026

Membros da banca

Prof. Dr. Alexandre Mesquita Silva Bomfim - (Orientador) Universidade Federal de Ouro Preto
Prof. Dr. Clécio Magalhães do Vale - Universidade Federal de Ouro Preto
Arquiteta Me. Bruna Marinho Sampaio

Alexandre Mesquita Silva Bomfim, orientador do trabalho, aprovou a versão final e autorizou seu depósito na Biblioteca Digital de Trabalhos de Conclusão de Curso da UFOP em 14/09/2026



Documento assinado eletronicamente por **Alexandre Mesquita Silva Bomfim, PROFESSOR DE MAGISTERIO SUPERIOR**, em 14/09/2026, às 13:31, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site http://sei.ufop.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0, informando o código verificador **1190536** e o código CRC **9CFE62C0**.

AGRADECIMENTOS

Aqui, marca o fim de uma etapa, mas também a celebração de encontros que mudaram nossas vidas.

Agradeço imensamente; as amigadas que trouxe de fora da UFOP, Isadora, Júlia, Maria Laura, Amanda, Bethânia e Ingrid com quem compartilhei risos, noites viradas e o apoio mútuo que nos sustentou nesse caminho sendo primeiro de restauração, depois de arquitetura; ao meu grupo “zamigas”: Júnia, Julia, Letícia, Laila e Gabriele; vocês foram alegria em dias pesados e força nas horas incertas.

Às minhas amigas queridas que tornaram parte de mim: Tayná e Fernanda, vocês são irmãs que a vida me deu! Em cada momento difícil, em cada vitória, o amor de vocês foi fundamental.

Esse processo não teria sido possível sem minha mãe Roseli, esse diploma também é seu. Tudo que vivemos juntas está aqui, em cada conquista. Essa vitória é nossa. Rochel, meu companheiro de vida, meu apoio constante, que esteve comigo em todos os momentos, me lembrando quem eu sou mesmo nos dias mais difíceis, obrigada por ser meu alicerce quando tudo parecia ruir, ter você comigo tornou essa jornada mais leve e mais bonita.

Em especial à minha avó Almerinda (In memorian) e ao meu pai Ely (In memorian), que hoje não estão fisicamente aqui, mas que permanecem vivos em mim. Sei que, de algum lugar, eles celebram essa vitória comigo, com orgulho e amor.

Ao meu orientador Alexandre Bomfim, agradeço por ter aceitado percorrer comigo os caminhos desta pesquisa, contribuindo com reflexões, questionamentos e aprendizados que ultrapassam as páginas deste trabalho. Sua orientação, paciência e confiança foram essenciais para transformar incertezas em investigação e ideias em possibilidades. Afinal, como nos lembra Tolkien, algumas jornadas são definidas não apenas pelo destino, mas também pelos companheiros que encontramos ao longo do caminho. Sou profundamente grata por ter compartilhado parte dessa caminhada sob sua orientação.

RESUMO

A crescente incorporação de ferramentas digitais ao processo de projeto arquitetônico tem ampliado as possibilidades de investigação e tomada de decisão ainda nas etapas iniciais de concepção. Nesse contexto, o presente trabalho busca compreender de que maneira a integração entre modelagem paramétrica, simulações ambientais e *Building Information Modeling* (BIM) pode contribuir para o desenvolvimento de processos projetuais mais analíticos e orientados por desempenho ambiental. Para isso, foi adotada uma edificação de uso misto como objeto de experimentação metodológica, permitindo investigar as relações entre forma arquitetônica, incidência solar e comportamento ambiental da envoltória. O desenvolvimento da pesquisa envolveu a utilização integrada do *Revit*, *Rhinoceros*, *Grasshopper* e *Ladybug Tools*, possibilitando a construção de um fluxo contínuo entre modelagem, parametrização, simulação e consolidação das informações em ambiente BIM. Por meio da elaboração de estudos de massa, volumetria e fachada, foi possível observar como pequenas alterações geométricas influenciam diretamente os padrões de radiação solar e os mecanismos de autossombreamento da edificação. Nesse contexto, a pesquisa desloca a discussão do resultado arquitetônico para o próprio processo de concepção, investigando até que ponto ferramentas digitais podem permitir que a forma deixe de preceder o desempenho e passe a ser construída em diálogo contínuo com ele, aproximando desempenho ambiental e processo criativo desde os primeiros momentos do projeto.

Palavras-chave: modelagem paramétrica; simulação ambiental; Rhinoceros; BIM; interoperabilidade; radiação solar.

ABSTRACT

The increasing incorporation of digital tools into the architectural design process has expanded the possibilities for investigation and decision-making during the early stages of design development. In this context, the present study seeks to understand how the integration of parametric modeling, environmental simulations, and Building Information Modeling (BIM) can contribute to the development of more analytical design processes oriented toward environmental performance. To achieve this objective, a mixed-use building was adopted as an object of methodological experimentation, allowing the investigation of the relationships between architectural form, solar incidence, and the environmental behavior of the building envelope. The research involved the integrated use of Revit, Rhinoceros, Grasshopper, and Ladybug Tools, enabling the establishment of a continuous workflow between modeling, parametrization, simulation, and information consolidation within a BIM environment. Through the development of massing, volumetric, and façade studies, it was possible to observe how small geometric modifications directly influence solar radiation patterns and the building's self-shading mechanisms. In this context, the research shifts the discussion from the architectural outcome itself to the design process, investigating the extent to which digital tools can enable form to no longer precede performance, but instead be developed in continuous dialogue with it, bringing environmental performance and the creative process closer together from the earliest stages of design.

Keywords: parametric modeling; environmental simulation; Rhinoceros; BIM; interoperability; solar radiation.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Visão do terreno escolhido, destacado em vermelho, no campus da UFOP	23
Figura 2 – Vista do terreno no campus da UFOP.....	23
Figura 3 – Modelo BIM inicial desenvolvido no Revit e utilizado como base geométrica para as etapas posteriores de parametrização e simulação ambiental	26
Figura 4 – Estruturação do script paramétrico no Grasshopper, responsável pela integração entre a geometria da edificação, os dados climáticos do arquivo EPW e as ferramentas de simulação ambiental do Ladybug Tools.....	27
Figura 5 – Visualização, no ambiente do Rhinoceros, dos resultados das simulações de radiação solar processadas pelo Ladybug Tools, permitindo identificar a distribuição da incidência solar sobre a envoltória da edificação	28
Figura 6 – Estudos volumétricos desenvolvidos no ambiente do Rhinoceros e posteriormente avaliados por meio das simulações ambientais do Ladybug Tools, permitindo comparar o comportamento solar das diferentes alternativas investigadas.....	29
Figura 7 – Modelo arquitetônico detalhado, com compartimentação interna, mobiliário, elementos construtivos e definição espacial	30
Figura 8 – Proposta volumétrica alternativa que preserva a organização espacial, reduzindo a representação às massas e aos elementos da envoltória relevantes para a investigação do desempenho ambiental.....	30
Figura 9 – Trecho do script paramétrico responsável pela importação do arquivo climático EPW e pela geração da carta solar utilizada nas análises de orientação e incidência solar.....	32
Figura 10 – Organização da geometria da edificação no Grasshopper, separando cobertura, fachadas e pisos para posterior integração e utilização nas análises ambientais realizadas pelo Ladybug Tools.....	32
Figura 11 – Importação dos dados climáticos do arquivo EPW e geração da matriz celeste (Sky Matrix) utilizada nas simulações de radiação solar.....	33

Figura 12 – Configuração do componente <i>Incident Radiation</i> e do parâmetro <i>Grid Size</i> , responsáveis pelo cálculo e pela resolução espacial das análises de radiação solar.....	33
Figura 13 – Mapa cromático representando os níveis de incidência da radiação solar sobre as superfícies da edificação ao longo do período analisado	36
Figura 14 – Estudos de massa desenvolvidos para investigar a influência da configuração volumétrica sobre os padrões de incidência solar e autossombreamento da edificação	36

LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

BEM – *Building Energy Modeling* (Modelagem Energética de Edificações)

BIM – *Building Information Modeling* (Modelagem da Informação da Construção)

CAD – *Computer Aided Design* (Desenho Assistido por Computador)

EPW – *EnergyPlus Weather File* (Arquivo Climático do EnergyPlus)

MG – Minas Gerais

NURBS – *Non-Uniform Rational B-Splines*

TMYx – *Typical Meteorological Year eXtended* (Ano Meteorológico Típico Estendido)

UFOP – Universidade Federal de Ouro Preto

ZDE – Zona de Desenvolvimento Educacional

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	11
2 BASES CONCEITUAIS E INSTRUMENTAIS DO PROCESSO PROJETUAL	13
2.1 Edifícios de uso misto no contexto contemporâneo.....	13
2.2 Arquitetura bioclimática e desempenho ambiental	14
2.3 Modelagem paramétrica como método de concepção	15
2.4 Simulação ambiental aplicada ao processo de projeto	16
2.5 BIM e interoperabilidade no desenvolvimento arquitetônico	17
3 CONTEXTUALIZAÇÃO E LEITURA DO LUGAR	18
3.1 Caracterização física do terreno.....	18
3.2 Inserção urbana e dinâmica do campus	19
3.3 Condicionantes ambientais e orientação solar	20
3.4 Potencial programático para uso misto	20
4 METODOLOGIA E FLUXO DE EXPERIMENTAÇÃO.....	22
4.1 Revisão bibliográfica e definição dos parâmetros.....	22
4.2 Leitura do terreno e critérios de implantação.....	23
4.3 Estudos paramétricos de envoltória	24
4.4 Simulações de radiação solar e iluminação natural.....	24
4.5 Definição volumétrica e setorização dos usos	25
4.6 Consolidação do modelo em ambiente BIM.....	25
4.7 Experiência de utilização das ferramentas digitais no processo projetual.....	26
5 EXPERIMENTAÇÃO PROJETUAL E ANÁLISES AMBIENTAIS	30
5.1 Funcionamento do Script Paramétrico.....	31
5.2 Análise da Incidência da Radiação Solar.....	34
5.3 Estudos de massa, volumetria e fachadas	37
6 RESULTADOS DOS ESTUDOS PARAMÉTRICOS E AMBIENTAIS	40
6.1 Avaliação do desempenho solar e lumínico da proposta.....	40
6.2 Compatibilidade entre usos e qualidade espacial.....	41
6.3 Contribuições da integração entre Rhino, Grasshopper, Ladybug e BIM	42
GLOSSÁRIO DE TERMOS TÉCNICOS	46
REFERÊNCIAS	49
DECLARAÇÃO DE USO DE INTELIGÊNCIA ARTIFICIAL GENERATIVA.....	50
APÊNDICE A – Modelo Arquitetônico Experimental	52

APÊNDICE B – Metodologia: Script + Grasshopper + Ladybug.....	52
APÊNDICE C – Análise da Incidência da Radiação Solar (Projeto Piloto)	52
APÊNDICE D – Estudo Volumétrico 01	52
APÊNDICE E – Estudo Volumétrico 02.....	52
APÊNDICE F – Estudo Volumétrico 03	52

1 INTRODUÇÃO

A crescente incorporação de tecnologias digitais ao campo da arquitetura tem promovido mudanças significativas nos processos de concepção, análise e representação do espaço construído. Entre as ferramentas que vêm sendo progressivamente incorporadas ao processo projetual destacam-se a modelagem paramétrica, as simulações ambientais e o Building Information Modeling (BIM), que, quando utilizados de forma integrada, ampliam as possibilidades de investigação formal e de avaliação de desempenho ainda nas etapas iniciais do desenvolvimento do projeto (Eastman et al., 2011; Woodbury, 2010; Kolarevic, 2005).

Nesse contexto, a utilização dessas ferramentas deixa de atuar apenas como instrumento de representação ou documentação e passa a participar diretamente do processo de tomada de decisões projetuais. A associação entre modelos paramétricos e simulações ambientais parece oferecer novas possibilidades para a compreensão das relações entre forma arquitetônica, desempenho ambiental e condicionantes climáticos, permitindo que determinadas decisões relacionadas à envoltória, à orientação e ao comportamento solar da edificação sejam avaliadas ainda durante o processo de concepção.

Essa abordagem se mostra particularmente interessante em estudos relacionados às edificações de uso misto, tipologia caracterizada pela coexistência de diferentes programas em uma mesma estrutura e que frequentemente apresenta demandas distintas em relação ao conforto térmico, à iluminação natural, à privacidade e à incidência da radiação solar sobre os ambientes. Entretanto, embora essas questões relacionadas ao tipo arquitetônico façam parte da pesquisa de que decorre este escrito, o desenvolvimento de uma proposta arquitetônica definitiva não constitui o objetivo principal deste trabalho.

O edifício de uso misto que serve de modelo para a pesquisa que nutre este texto foi utilizado como objeto de estudo e suporte para a aplicação das ferramentas investigadas, permitindo registrar, testar e analisar a utilização da modelagem paramétrica, das simulações ambientais e do BIM no processo de projeção arquitetônica, com especial atenção às análises relacionadas ao desempenho solar e lumínico da envoltória. Esse, sim, é o foco deste trabalho final de graduação: a

investigação das ferramentas de parametrização e simulação ambiental, particularmente no que diz respeito à iluminação natural e ao desempenho térmico de edificações.

Para o desenvolvimento do estudo, foi selecionado um terreno localizado no campus da Universidade Federal de Ouro Preto, no bairro Bauxita, cuja escolha se justifica pela facilidade de acesso às informações, pela possibilidade de levantamento de dados e pela relação direta com a dinâmica universitária já conhecida. A utilização de um lote real contribuiu para aproximar os estudos realizados de condicionantes efetivamente existentes, permitindo que as análises fossem desenvolvidas a partir de uma situação concreta de implantação.

Diante desse cenário, busquei investigar de que maneira a integração entre modelagem paramétrica, simulações ambientais e BIM pode contribuir para a compreensão do desempenho ambiental das edificações ainda nas etapas iniciais do processo projetual. Para isso, o trabalho foi estruturado a partir da revisão teórica dos conceitos envolvidos, da caracterização do local de implantação, da definição dos parâmetros geométricos e ambientais, da elaboração dos modelos paramétricos, da realização das simulações ambientais com o auxílio do Ladybug Tools e da análise crítica dos resultados obtidos ao longo do processo.

Mais do que o desenvolvimento de uma solução arquitetônica específica, este trabalho constitui um registro da utilização dessas ferramentas no processo de projeto, buscando discutir suas potencialidades, limitações e contribuições para a tomada de decisões relacionadas ao desempenho ambiental da edificação e à construção de processos projetuais mais fundamentados em critérios quantitativos e ambientais.

2 BASES CONCEITUAIS E INSTRUMENTAIS DO PROCESSO PROJETUAL

2.1 Edifícios de uso misto no contexto contemporâneo

Os edifícios de uso misto são caracterizados pela coexistência de diferentes funções em uma mesma edificação ou conjunto edificado, geralmente combinando atividades residenciais, comerciais, institucionais, corporativas e de serviços. Essa tipologia vem sendo frequentemente associada às discussões contemporâneas sobre adensamento urbano, otimização da infraestrutura existente e diversificação das atividades desenvolvidas ao longo do dia, contribuindo para a redução dos deslocamentos e para a intensificação do uso dos espaços urbanos (Jacobs, 1961; Gehl, 2013).

Ao contrário dos modelos de setorização rígida predominantes em grande parte do urbanismo moderno, os edifícios de uso misto procuram concentrar diferentes atividades em um mesmo local, promovendo relações mais dinâmicas entre trabalho, moradia, comércio e serviços. Na prática, essa organização frequentemente se traduz na distribuição vertical dos usos, com pavimentos térreos destinados a atividades comerciais e de serviços, pavimentos intermediários voltados para escritórios ou equipamentos institucionais, e pavimentos superiores destinados à habitação, embora essa configuração possa variar de acordo com as características do empreendimento e do contexto urbano em que está inserido.

Além das questões relacionadas ao funcionamento urbano, essa tipologia apresenta desafios específicos do ponto de vista arquitetônico e ambiental. A coexistência de diferentes programas em uma mesma estrutura implica demandas distintas de conforto térmico, iluminação natural, privacidade, horários de ocupação e relação com o espaço exterior, exigindo soluções capazes de responder simultaneamente a usos com necessidades muitas vezes divergentes.

Nesse contexto, a utilização de ferramentas de modelagem paramétrica e de simulação ambiental parece apresentar potencial para auxiliar na compreensão dessas relações ainda nas etapas iniciais do processo projetual, permitindo investigar como

diferentes configurações volumétricas e soluções de envoltória influenciam o desempenho ambiental dos diversos setores da edificação.

No presente trabalho, o edifício de uso misto não constitui o objeto final da pesquisa, mas sim o suporte utilizado para a aplicação, o registro e a análise das ferramentas investigadas. A escolha dessa tipologia decorre justamente da complexidade inerente à coexistência de diferentes usos e de distintas exigências ambientais a eles correspondentes, oferecendo um cenário adequado para explorar as possibilidades da parametrização e das simulações ambientais como instrumentos de apoio à tomada de decisões projetuais.

A opção pela inserção do estudo em um contexto universitário se relaciona à presença simultânea de atividades acadêmicas, serviços, espaços de convivência e demandas habitacionais frequentemente associadas à dinâmica dos *campi* universitários brasileiros. Embora o trabalho não tenha como objetivo discutir especificamente a produção de habitação estudantil ou o planejamento universitário, esse contexto oferece condições particularmente interessantes para a investigação das relações entre programa, desempenho ambiental e configuração da envoltória arquitetônica.

2.2 Arquitetura bioclimática e desempenho ambiental

A arquitetura bioclimática pode ser entendida como uma abordagem projetual que busca adaptar a edificação às condições climáticas locais, utilizando estratégias passivas para melhorar o desempenho ambiental e reduzir a dependência de sistemas artificiais de condicionamento térmico e também para fins de iluminação (Olgyay, 1963; Givoni, 1998). Nesse contexto, aspectos como orientação solar, profundidade dos ambientes, proporção entre aberturas e a existência de dispositivos de sombreamento passam a influenciar diretamente as decisões projetuais.

Essa discussão se torna particularmente relevante em Ouro Preto, município caracterizado pelo clima tropical de altitude, marcado por temperaturas mais amenas ao longo do ano e significativa incidência solar sobre as superfícies expostas. De acordo com informações disponibilizadas na página *Informações Gerais* da Prefeitura de Ouro Preto (Prefeitura Municipal de Ouro Preto, 2026), essas características estão diretamente

relacionadas à elevada altitude do município e às condições climáticas típicas das regiões serranas do sudeste brasileiro. Nessas condições, compreender a distribuição da radiação solar sobre a envoltória se torna aspecto fundamental para a investigação do desempenho ambiental das edificações.

Dessa forma, ferramentas de simulação ambiental podem permitir avaliar quantitativamente o comportamento da radiação solar incidente e comparar diferentes alternativas de massa, volumetria e fachada, contribuindo para a tomada de decisões ainda nas etapas iniciais do processo projetual, mediante a realização de ensaios e testes volumétricos em ambiente digital.

2.3 Modelagem paramétrica como método de concepção

Os estudos de Janice de Freitas Pires et al. (2022) oferecem importante suporte teórico para compreender a modelagem paramétrica como método de concepção e estruturação do saber projetual. Ao discutir as relações entre geometria, lógica algorítmica e processo de ensino-aprendizagem, as autoras demonstram que a parametrização permite explicitar as relações entre variáveis geométricas, ambientais e funcionais, favorecendo um processo iterativo e mais consciente de tomada de decisão (Pires et al., 2022).

Diferentemente dos processos convencionais de modelagem, nos quais as alterações geométricas frequentemente exigem intervenções manuais sucessivas, a modelagem paramétrica organiza as relações entre os elementos do projeto por meio de parâmetros e regras previamente estabelecidos. Dessa forma, modificações em determinadas variáveis podem produzir alterações automáticas em outros componentes do modelo, permitindo investigar diferentes cenários de maneira mais rápida e controlada.

No ambiente do Grasshopper, software de programação visual integrado ao Rhinoceros 3D — que, a seu turno, é um software de modelagem tridimensional —, essa lógica é estruturada por meio de nós (*nodes*) interligados, responsáveis pela organização de *scripts* capazes de manipular diferentes parâmetros geométricos e ambientais. Entre as variáveis que podem ser investigadas, destacam-se a profundidade das fachadas, a dimensão dos balanços e varandas, a proporção entre cheios e vazios, e a configuração dos dispositivos de proteção solar. A integração com o Rhinoceros permite operar sobre

geometrias baseadas em *NURBS*¹, oferecendo elevado grau de precisão na manipulação de curvas, superfícies e sólidos.

Aplicada ao presente trabalho, essa abordagem possibilita investigar diferentes configurações da envoltória ao longo do próprio processo de consolidação volumétrica, permitindo testar alternativas de massa, fachada e estratégias de proteção solar antes da definição das soluções adotadas para o estudo.

2.4 Simulação ambiental aplicada ao processo de projeto

A integração entre modelagem paramétrica e simulação ambiental constitui uma das bases metodológicas da pesquisa da qual decorre este texto, permitindo avaliar o desempenho da envoltória ainda durante o desenvolvimento do projeto. Para isso, foi utilizado o Ladybug Tools, que é um conjunto de ferramentas integrado ao ambiente Grasshopper que possibilita a realização de análises ambientais a partir de dados climáticos obtidos por meio de arquivos meteorológicos no formato EPW (EnergyPlus Weather File).

Entre os recursos disponibilizados pelo Ladybug Tools, destacam-se os estudos de trajetória solar, incidência da radiação e iluminação natural, permitindo visualizar uma simulação digital do comportamento ambiental da edificação ao longo do ano.

No presente trabalho, o Ladybug Tools foi utilizado para investigar como alterações geométricas em um projeto piloto influenciam a incidência da radiação solar na edificação proposta ao longo do ano. A comparação entre diferentes estudos de massa, volumetria e fachada permitiu identificar como modificações na envoltória alteram os padrões de exposição solar e de autossombreamento da edificação, tornando mais evidentes as consequências ambientais das decisões projetuais adotadas ao longo do processo

¹ **NURBS (Non-Uniform Rational B-Splines)** – é um modelo matemático utilizado para representar curvas e superfícies com elevado grau de precisão, amplamente empregado em softwares de modelagem tridimensional devido à sua capacidade de descrever geometrias simples e complexas de forma contínua e parametrizável.

2.5 BIM e interoperabilidade no desenvolvimento arquitetônico

O conceito de Building Information Modeling (BIM) surgiu como evolução dos processos tradicionais de desenho assistido por computador (Computer Aided Design – CAD), substituindo a representação baseada apenas em linhas e formas geométricas abstratas por modelos digitais capazes de reunir informações geométricas, construtivas e de desempenho em um único ambiente informacional (Eastman et al., 2011). Entre as plataformas BIM atualmente mais difundidas na prática profissional, destaca-se o Revit, desenvolvido pela Autodesk, cuja adoção possibilita a integração entre informações geométricas, construtivas e de desempenho em um mesmo ambiente informacional.

No presente trabalho, o Revit foi utilizado como ambiente de consolidação das informações produzidas ao longo das etapas de modelagem paramétrica e simulação ambiental realizadas no Rhinoceros, Grasshopper e Ladybug Tools. A interoperabilidade entre Rhinoceros, Grasshopper, ferramentas de simulação ambiental e o ambiente BIM possibilita que as informações produzidas durante os estudos de massa, volumetria e desempenho sejam posteriormente consolidadas em um modelo informacional único, preparando a transição entre experimentação, definição volumétrica e documentação técnica do projeto.

3 CONTEXTUALIZAÇÃO E LEITURA DO LUGAR

Para a realização do estudo referente à utilização das ferramentas de parametrização e simulação de desempenho solar e lumínico no processo de projeto, optou-se pela adoção de uma edificação de uso misto como objeto de investigação. Nesse contexto, a contextualização do local de implantação constitui etapa importante da pesquisa, uma vez que estabelece a relação entre as condições reais do terreno e os parâmetros que irão alimentar os modelos paramétricos e as análises ambientais desenvolvidas ao longo do trabalho.

O terreno selecionado está localizado no Campus Morro do Cruzeiro, da Universidade Federal de Ouro Preto, no bairro Bauxita, em uma área caracterizada pela presença de edificações institucionais e pela intensa dinâmica acadêmica associada às atividades universitárias. A utilização de um lote real busca aproximar a investigação das condições urbanas e ambientais efetivamente encontradas no município, permitindo que os estudos de parametrização e desempenho sejam realizados em um contexto concreto de implantação. Para isso, a leitura do lugar foi organizada em quatro frentes complementares: caracterização física, inserção urbana, condicionantes ambientais e potencial programático.

De acordo com o mapa oficial de zoneamento do município de Ouro Preto, o terreno está inserido em Zona de Desenvolvimento Educacional (ZDE), categoria destinada prioritariamente à implantação de atividades educacionais, institucionais e de apoio às dinâmicas universitárias do campus. A escolha dessa área se mostra compatível com a natureza do objeto de estudo adotado na pesquisa e com as características do entorno imediato.

3.1 Caracterização física do terreno

O terreno selecionado possui área total de 4.375 m², geometria regular e topografia predominantemente plana, condição que favorece a implantação de uma edificação de uso misto sem a necessidade de grandes movimentações de terra ou soluções estruturais complexas. Sua conformação física oferece maior liberdade para a experimentação

volumétrica e facilita a aplicação do método paramétrico proposto, uma vez que reduz interferências geométricas externas e permite maior controle sobre os parâmetros relacionados à implantação.

A regularidade do lote também contribui para a leitura clara da envoltória em relação à orientação solar, aspecto essencial para os estudos de fachada. A área disponível possibilita a organização de um edifício de médio porte, compatível com a escala do campus e capaz de abrigar múltiplos usos sem comprometer áreas de circulação, acessos independentes e espaços de permanência.

Outro aspecto relevante é a possibilidade de trabalhar com afastamentos, recuos e áreas de transição entre espaço construído e espaço livre, permitindo que estratégias de sombreamento, ventilação cruzada e convivência externa sejam incorporadas ao partido arquitetônico desde as etapas iniciais do processo.

3.2 Inserção urbana e dinâmica do campus

A inserção urbana do lote no campus da UFOP é um dos principais fatores que justificam sua escolha como objeto de estudo. O terreno está situado em área de forte circulação de estudantes, professores e servidores, próxima a edifícios acadêmicos, serviços de apoio e espaços de convivência, condição que favorece a implantação de um edifício de uso misto articulado às demandas universitárias.

Essa dinâmica se materializa na possibilidade de integrar funções complementares à vida acadêmica, como espaços de alimentação, apoio estudantil, coworking, setores administrativos e moradia temporária. A leitura da dinâmica do campus demonstra que o edifício pode atuar como elemento articulador entre permanência, circulação e serviços, ampliando a vitalidade do entorno ao longo de diferentes períodos do dia.

Essa condição reforça a pertinência do uso misto como estratégia programática e urbana, além de alimentar decisões do modelo paramétrico relacionadas ao posicionamento dos acessos, à setorização vertical e à distribuição dos fluxos internos.

3.3 Condicionantes ambientais e orientação solar

As condicionantes ambientais do terreno assumem papel central na metodologia, uma vez que o desempenho solar e lumínico constitui o eixo principal da pesquisa. A localização em Ouro Preto, sob clima tropical de altitude, exige equilíbrio entre aproveitamento do *daylight* e controle do ganho térmico, especialmente nas fachadas com maior exposição à radiação direta.

A orientação solar do lote favorece a exploração de diferentes respostas de fachada conforme a posição dos usos internos. Fachadas mais favoráveis à incidência solar suave podem receber ambientes de permanência prolongada, enquanto faces com maior exposição à radiação no período da tarde demandam estratégias mais robustas de proteção, como brise-soleil, varandas e saliências parametrizadas.

Essas informações são fundamentais para a etapa seguinte, pois servirão de base para a construção do algoritmo paramétrico, estruturado em nós (*nodes*) no Grasshopper, e posteriormente testado com o plugin Ladybug, responsável pelas análises em ambiente digital das condições de radiação solar e iluminação natural sobre os volumes porventura propostos.

3.4 Potencial programático para uso misto

A leitura do lugar evidencia um forte potencial para o desenvolvimento de um edifício de uso misto alinhado à dinâmica universitária. A proximidade com fluxos institucionais, espaços de permanência e áreas de apoio permite propor uma arquitetura que articule usos distintos, porém complementares, dentro de uma mesma estrutura.

O térreo apresenta vocação para atividades de convivência, alimentação, papelaria, pequenos serviços e espaços de apoio ao cotidiano acadêmico. Nos pavimentos intermediários, a inserção de áreas de coworking, extensão universitária, apoio administrativo e espaços de estudo amplia a integração entre ensino, permanência e trabalho. Já os níveis superiores apresentam grande potencial para moradia estudantil, residências temporárias ou alojamentos vinculados a intercâmbios, eventos e professores visitantes.

Essa distribuição programática aproxima o projeto de uma arquitetura mais ordinária e viável, ao mesmo tempo que fortalece o aspecto metodológico do presente trabalho, pois cada uso apresenta demandas específicas de insolação, *daylight*, privacidade e conforto térmico. Esses aspectos serão posteriormente testados nas etapas de modelagem paramétrica, simulação ambiental e consolidação em ambiente BIM–BEM.

4 METODOLOGIA E FLUXO DE EXPERIMENTAÇÃO

A metodologia adotada neste trabalho foi estruturada a partir de uma lógica em que o desempenho ambiental antecede a definição formal final da arquitetura. Em vez de estabelecer a volumetria como ponto de partida, o processo metodológico que aqui se busca analisar organiza inicialmente os parâmetros relacionados à orientação solar, à inserção urbana, ao programa de uso misto e às características do terreno. A partir dessas variáveis, desenvolvem-se estudos paramétricos de envoltória, explorando recuos, saliências, profundidade de *brise-soleil*, varandas e relações entre cheios e vazios.

Esses cenários são posteriormente avaliados por meio de simulação ambiental, realizada com o plugin Ladybug, o que permite comparar alternativas e identificar as estratégias mais adequadas para cada orientação solar. Somente após essa etapa analítica a volumetria final é consolidada, estruturando um edifício de uso misto compatível com a dinâmica do campus e com as condicionantes ambientais levantadas. A etapa final corresponde à consolidação do modelo em ambiente BIM, no qual as informações espaciais, construtivas e gráficas passam a ser organizadas de maneira mais precisa e integrada.

4.1 Revisão bibliográfica e definição dos parâmetros

A primeira etapa metodológica da pesquisa com base na qual se estabelece o presente texto consiste na revisão bibliográfica, responsável por consolidar a base conceitual e instrumental que orienta o processo de projeto. Nessa fase, foram reunidas referências sobre edifícios de uso misto, arquitetura bioclimática, modelagem paramétrica, simulação ambiental, interoperabilidade e BIM–BEM, buscando compreender como esses campos se articulam no desenvolvimento de soluções arquitetônicas orientadas por desempenho.

Os estudos de Pires et al. (2022) oferecem suporte essencial para a definição dos parâmetros do modelo, ao demonstrarem que a parametrização permite explicitar relações entre geometria, uso e ambiente de forma lógica e iterativa. A partir dessa fundamentação, são definidos os principais parâmetros que serão manipulados ao longo do processo,

como profundidade das fachadas, dimensão dos recuos, proporção das aberturas, modulação de varandas, ângulo de proteção solar e distribuição dos usos por pavimento.

Essa etapa é fundamental porque estabelece os critérios que irão alimentar o *script* paramétrico, evitando que a experimentação digital ocorra de maneira aleatória e garantindo coerência entre teoria e aplicação.

4.2 Leitura do terreno e critérios de implantação

Na segunda etapa, realizo a leitura do terreno localizado no campus da UFOP, no bairro Bauxita, com área total de 4.375 m² e topografia predominantemente plana. A análise do lote envolve a observação de sua geometria, sua orientação solar, sua relação com os fluxos acadêmicos, seus acessos, o entorno construído e o seu potencial de integração com a dinâmica universitária.



Figura 1 – Visão do terreno escolhido, destacado em vermelho, no campus da UFOP. Disponível em: Google Earth. Adaptado pela autora, 2026. Figura 2 – Vista do terreno no campus da UFOP. Fonte: Acervo pessoal, 2025.

A leitura do terreno assume papel metodológico central, evidenciando a importância de submeter o exercício projetual a condicionantes reais de implantação, contexto urbano e desempenho ambiental. Assim, os critérios de implantação são estabelecidos a partir das condicionantes reais do lote, priorizando fachadas mais favoráveis para permanência prolongada, posicionamento estratégico de acessos independentes e aproveitamento da insolação para usos diferenciados.

Essa etapa também permite definir premissas iniciais para a setorização do programa, como a localização do térreo de serviços e convivência, a disposição de

pavimentos acadêmicos intermediários e a inserção de moradia estudantil nos níveis superiores.

4.3 Estudos paramétricos de envoltória

Com base nos parâmetros previamente definidos e na leitura do terreno, a terceira etapa da pesquisa que nutre este trabalho se concentra no desenvolvimento dos estudos paramétricos de envoltória. Utilizando o Rhinoceros 3D, cuja geometria é baseada em *NURBS*, e o Grasshopper, são produzidas diferentes alternativas de fachada, explorando recuos, saliências, profundidade de brises, modulação de varandas e relações entre cheios e vazios.

No Grasshopper, essa lógica, como mencionando anteriormente, é estruturada por meio de nós (*nodes*) interligados, que organizam um algoritmo paramétrico em forma de *script*. Cada *node* representa uma operação ou relação lógica, permitindo alterar rapidamente variáveis geométricas e gerar novos cenários formais.

A escolha por iniciar o processo pela envoltória inverte a lógica tradicional do projeto. Em vez de definir primeiro a forma final do edifício, a hipótese desta pesquisa é que, com as ferramentas digitais mencionadas, torna-se possível testar como diferentes soluções de fachada influenciam o comportamento ambiental e a organização interna dos usos.

4.4 Simulações de radiação solar e iluminação natural

A quarta etapa do método de produção de projetos aqui estudado corresponde às simulações ambientais, realizadas com o plugin Ladybug, integrado ao Grasshopper. Nessa fase, os estudos de envoltória desenvolvidos anteriormente são submetidos a análises de radiação solar, horas de insolação e distribuição do *daylight*.

A simulação assume papel decisivo no fluxo metodológico, pois permite quantificar o desempenho das alternativas testadas e identificar quais soluções apresentam melhor equilíbrio entre proteção solar e aproveitamento da luz natural.

Pesquisas que associam modelagem paramétrica e análise de radiação reforçam a importância dessa etapa como suporte à tomada de decisão projetual.

Os resultados obtidos orientam ajustes na profundidade das fachadas, nos dispositivos de sombreamento e na modulação das aberturas, garantindo que as decisões formais sejam fundamentadas em dados climáticos, e não apenas em critérios intuitivos.

4.5 Definição volumétrica e setorização dos usos

Somente após a análise comparativa das simulações é realizada a definição volumétrica do edifício.

A setorização busca responder às diferentes demandas de iluminação, conforto térmico e permanência associadas a cada uso, reforçando a lógica de uso misto defendida no trabalho.

4.6 Consolidação do modelo em ambiente BIM

A etapa final consiste na consolidação do modelo em ambiente BIM, utilizando o Revit como plataforma de organização espacial, construtiva e documental. Nessa fase, as definições volumétricas, os critérios de fachada e as decisões derivadas das simulações são traduzidos em um modelo informacional mais compreensível e organizado.

A integração com o BIM permite estruturar plantas, cortes, fachadas, quantitativos e informações construtivas. Além disso, essa etapa reforça a continuidade metodológica entre concepção e documentação, aspecto destacado pela literatura sobre interoperabilidade e BIM-BEM (Ciccozzi et al., 2023; Eastman et al., 2011; Ruschel, 2014).

Dessa forma, o BIM deixa de ser compreendido apenas como ferramenta de representação e passa a atuar como meio de consolidação do conhecimento produzido ao longo de todo o processo experimental.

4.7 Experiência de utilização das ferramentas digitais no processo projetual

O desenvolvimento da proposta arquitetônica foi conduzido por meio da integração entre ferramentas de modelagem digital, programação paramétrica e simulação ambiental, buscando estabelecer um fluxo de trabalho que articulasse decisões projetuais, desempenho da edificação e viabilidade de desenvolvimento ao longo do processo.

Inicialmente, o Rhinoceros foi utilizado como ferramenta de exploração formal e construção das primeiras geometrias da proposta. Nesse momento, o programa atuou como suporte para estudos volumétricos iniciais e para a compreensão das possibilidades de integração com ferramentas de modelagem paramétrica e análise ambiental. Embora o Rhino — como é carinhosamente referido pelos usuários — tenha sido o ponto de partida do processo, sua utilização ocorreu principalmente como uma etapa intermediária dentro do fluxo de trabalho adotado.

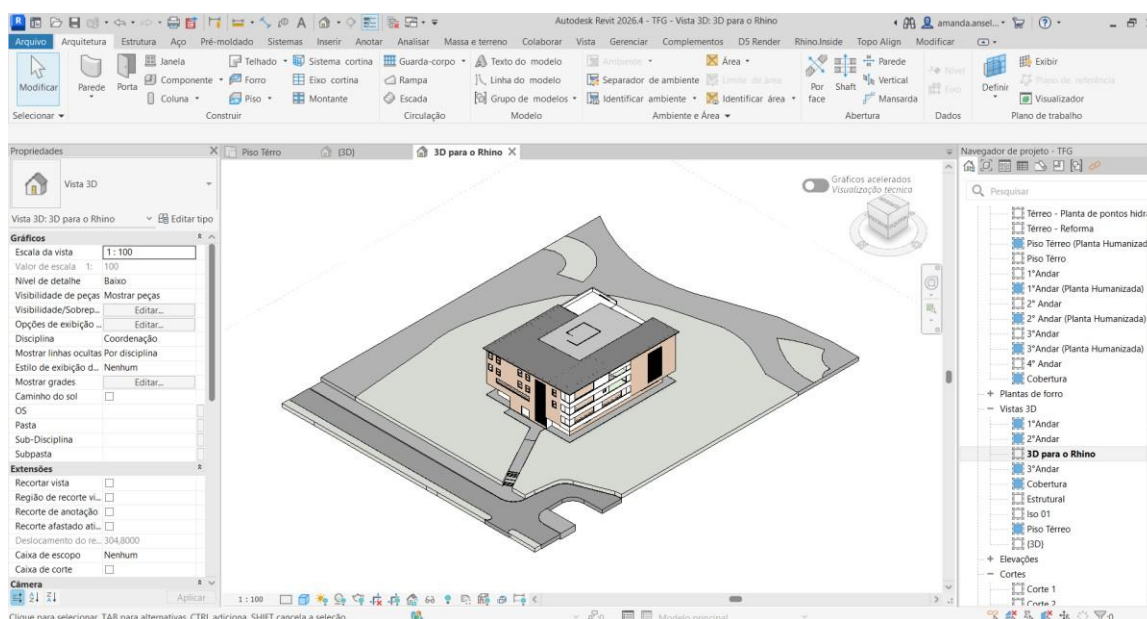


Figura 3 – Modelo BIM inicial desenvolvido no Revit e utilizado como base geométrica para as etapas posteriores de parametrização e simulação ambiental. Fonte: Captura de tela do software Revit, elaborada pela autora (2026).

Ao longo do desenvolvimento, observou-se que a continuidade da modelagem e do detalhamento da edificação seria mais eficiente em um ambiente com o qual eu já possuía maior familiaridade técnica. Dessa forma, optei pela migração do processo para o Revit, ferramenta que oferecia maior domínio operacional e que me permitiria conduzir o desenvolvimento arquitetônico com mais fluidez e segurança. Essa decisão não

representou uma mudança metodológica, mas sim uma adaptação do processo às condições reais de trabalho e às ferramentas com as quais eu apresentava maior capacidade de aprofundamento projetual.

Paralelamente, o Grasshopper foi utilizado como ambiente de programação visual para estruturar o fluxo de análise ambiental adotado no trabalho, mediante o estabelecimento do já referido *script*. Nesse processo, a modelagem da edificação foi desenvolvida previamente no Revit e posteriormente importada para o Rhinoceros, que atuou como plataforma de suporte para integração com as ferramentas de simulação. A partir dessa integração, o Grasshopper foi empregado para organizar o *script* e estabelecer a comunicação entre a geometria da edificação e os componentes do Ladybug Tools, possibilitando a associação do modelo aos dados climáticos — obtidos a partir de um arquivo em formato EPW — e a realização das análises ambientais. Como estratégia metodológica, optei por manter inalterada a configuração arquitetônica da proposta e avaliar seu desempenho por meio da rotação da edificação em diferentes orientações, permitindo observar variações na incidência solar e na distribuição da radiação ao longo das fachadas sem modificar a solução formal desenvolvida.

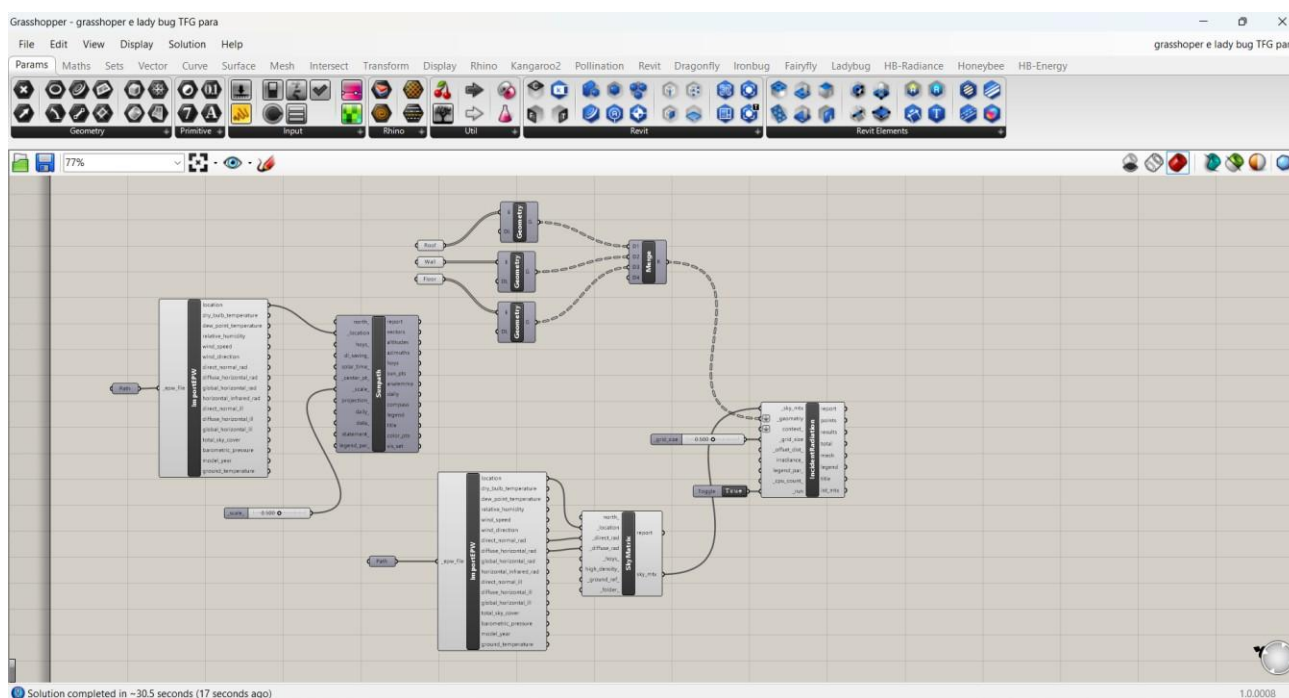


Figura 4 – Estruturação do script paramétrico no Grasshopper, responsável pela integração entre a geometria da edificação, os dados climáticos do arquivo EPW e as ferramentas de simulação ambiental do Ladybug Tools. Fonte: Captura de tela do ambiente Grasshopper, elaborada pela autora (2026).

Dessa maneira, o Ladybug Tools foi utilizado para realização das análises ambientais, integrando dados climáticos ao processo de tomada de decisão. A partir da utilização de arquivos climáticos em formato EPW, foram desenvolvidas simulações relacionadas à incidência solar e ao comportamento lumínico da edificação, permitindo avaliar o desempenho ambiental ainda durante as etapas de concepção.

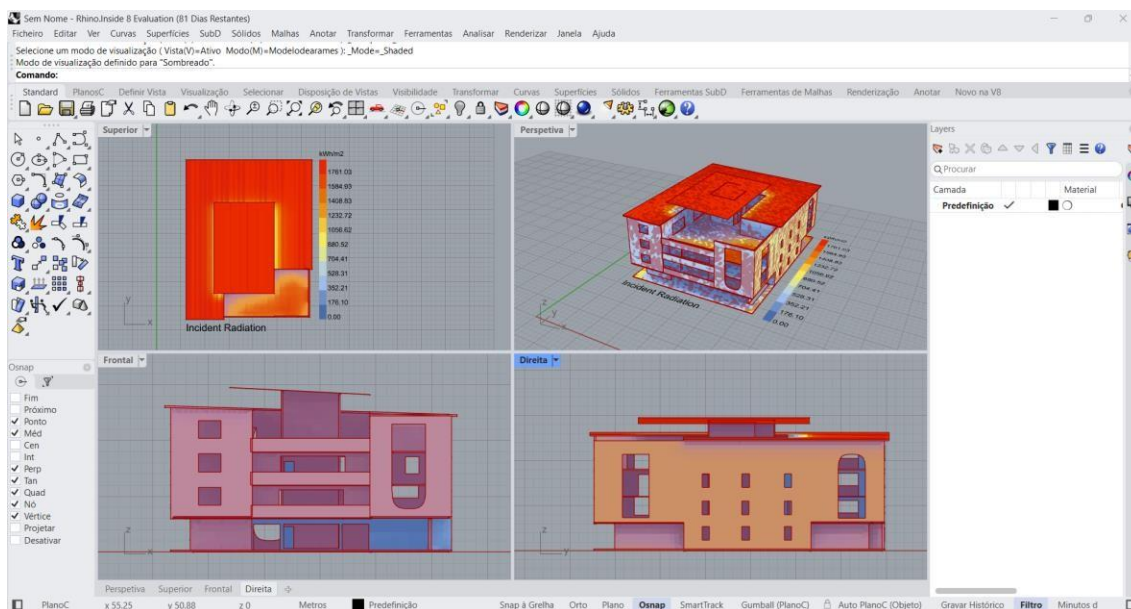


Figura 5 – Visualização, no ambiente do Rhinoceros, dos resultados das simulações de radiação solar processadas pelo Ladybug Tools, permitindo identificar a distribuição da incidência solar sobre a envoltória da edificação. Fonte: Captura de tela do software Rhinoceros, elaborada pela autora (2026).

A combinação entre essas ferramentas resultou em um fluxo de trabalho integrado, no qual diferentes plataformas foram utilizadas conforme suas potencialidades específicas ao longo do processo de pesquisa. Enquanto o Revit foi empregado para a modelagem informacional e posterior documentação do projeto, o Rhinoceros e o Grasshopper permitiram maior flexibilidade para os estudos volumétricos e paramétricos, enquanto o Ladybug Tools foi utilizado para as análises ambientais e para a avaliação do desempenho solar das diferentes alternativas investigadas.

Nesse contexto, o desenvolvimento da pesquisa exigiu deslocamentos constantes entre modelagem, simulação, revisão geométrica e tomada de decisão, permitindo que os resultados obtidos em cada etapa retroalimentassem continuamente as etapas seguintes do processo projetual.

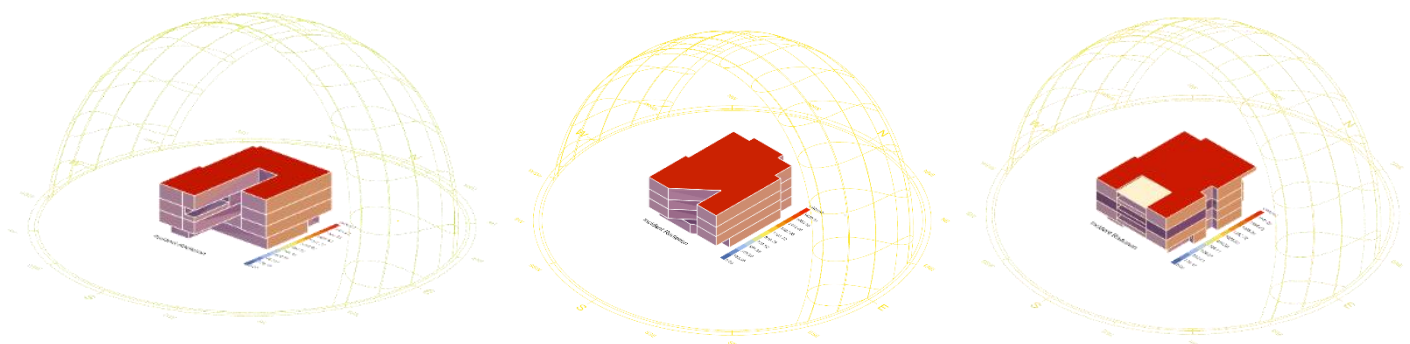


Figura 6 – Estudos volumétricos desenvolvidos no ambiente do Rhinoceros e posteriormente avaliados por meio das simulações ambientais do Ladybug Tools, permitindo comparar o comportamento solar das diferentes alternativas investigadas. Fonte: Captura de tela do software Rhinoceros, elaborada pela autora (2026).

5 EXPERIMENTAÇÃO PROJETUAL E ANÁLISES AMBIENTAIS

Mais do que buscar o desenvolvimento de uma solução arquitetônica definitiva, a proposta apresentada neste trabalho foi concebida como um projeto piloto destinado à experimentação metodológica. Seu principal objetivo consiste em servir como objeto de estudo para a aplicação integrada da modelagem paramétrica, da simulação ambiental e do BIM, permitindo investigar como diferentes estratégias de envoltória e diferentes configurações volumétricas influenciam o comportamento da edificação frente à incidência da radiação solar.

A adoção de um modelo arquitetônico relativamente simples foi uma decisão metodológica. Ao reduzir a complexidade volumétrica, tornou-se possível isolar as variáveis relacionadas à envoltória, permitindo que as alterações realizadas durante as simulações fossem avaliadas a partir dos dados e indicadores produzidos pelas ferramentas de análise ambiental. Dessa forma, as diferenças observadas nos resultados passaram a refletir, prioritariamente, as modificações introduzidas nas fachadas e nos dispositivos de proteção solar, e não alterações na forma geral da edificação.

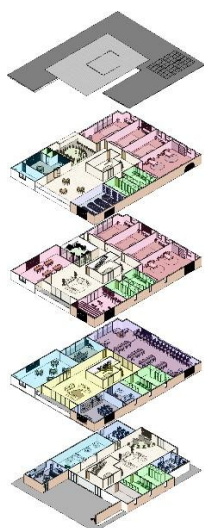


Figura 7 – modelo arquitetônico mais detalhado, com compartimentação interna, mobiliário, elementos construtivos e definição espacial. Fonte: Elaborada pela autora no Software Revit (2026).

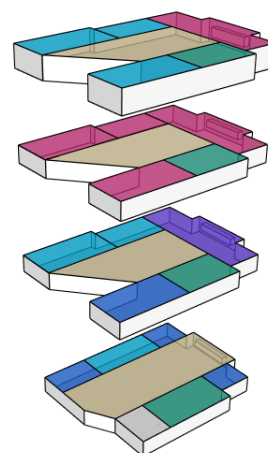


Figura 8 – Observa-se uma proposta volumétrica alternativa que preserva a organização espacial, mas reduz a representação às massas e aos elementos da envoltória relevantes para a investigação do desempenho ambiental. Fonte: Elaborada pela autora no Software Rhinoceros (2026).

Nesse contexto, o projeto da edificação aqui apresentado e utilizado para fins da pesquisa da qual decorre este escrito não deve ser entendido como uma solução definitiva, mas como um objeto de estudo utilizado para investigar o potencial das ferramentas digitais como suporte ao processo de tomada de decisão em arquitetura.

5.1 Funcionamento do *Script* Paramétrico

O *script* desenvolvido no ambiente Grasshopper constitui o principal instrumento metodológico empregado para a realização das análises ambientais desta pesquisa. Sua estrutura foi organizada de forma a integrar o modelo arquitetônico desenvolvido em ambiente BIM, os dados climáticos do local de estudo e as ferramentas de simulação disponibilizadas pelo plug-in Ladybug Tools, permitindo avaliar a incidência da radiação solar sobre a envoltória da edificação de maneira sistemática e padronizada.

A utilização do *script* permite que todas as simulações sejam realizadas seguindo um mesmo fluxo de processamento, mantendo constantes os parâmetros climáticos e computacionais adotados durante a pesquisa. Dessa forma, as diferenças observadas entre os resultados obtidos decorrem exclusivamente das alterações realizadas na proposta arquitetônica, possibilitando comparar diferentes estratégias de projeto sob as mesmas condições de análise.

A primeira etapa do fluxo corresponde à importação do arquivo climático no formato EPW. Esse arquivo constitui uma base de dados meteorológicos amplamente utilizada em simulações ambientais de edificações, reunindo informações horárias referentes a: temperatura do ar, umidade relativa, velocidade e direção dos ventos, radiação solar direta, radiação difusa e demais variáveis necessárias para representar o comportamento climático de determinada localidade.

Para o desenvolvimento da pesquisa foi utilizado o arquivo climático correspondente ao município de Ouro Branco (MG), referente à série climática TMYx (Typical Meteorological Year eXtended [em português: Ano Meteorológico Típico Estendido]) 2009–2023. A adoção desse arquivo ocorreu devido à inexistência de um arquivo EPW específico para o município de Ouro Preto nos principais repositórios destinados às simulações ambientais. Considerando a proximidade geográfica entre os

municípios e a similaridade de suas características climáticas, o arquivo de Ouro Branco foi considerado adequado para representar as condições ambientais da área de estudo.

Após a leitura do arquivo climático, as informações são encaminhadas ao componente *SunPath*, responsável por interpretar os dados de localização geográfica e calcular a trajetória aparente do Sol ao longo do ano. A partir dessas informações, são obtidos parâmetros como altitude solar, azimute e direção dos raios solares, que servem de base para as etapas posteriores da simulação. Embora esse componente também permita a representação gráfica do percurso solar, sua principal função neste trabalho consiste em organizar as informações relacionadas ao posicionamento do Sol para utilização nas análises ambientais.

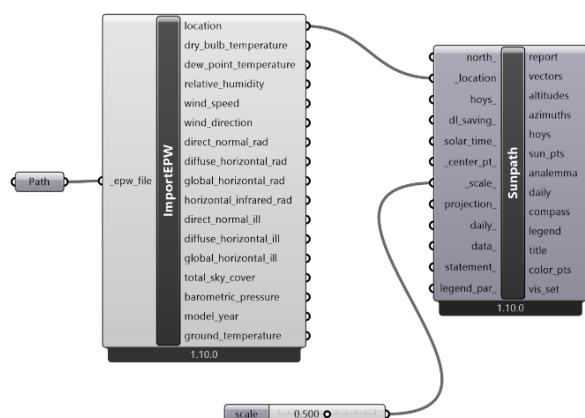


Figura 9 – Trecho do script paramétrico responsável pela importação do arquivo climático EPW e pela geração da carta solar utilizada nas análises de orientação e incidência solar. Fonte: Captura de tela do ambiente Grasshopper, elaborada pela autora (2026).

Paralelamente, a geometria da edificação é importada diretamente do modelo BIM desenvolvido no Revit por meio da integração proporcionada pelo Rhino.Inside.Revit. Nessa etapa são selecionadas as categorias correspondentes à cobertura (*Roof*), às paredes (*Wall*) e aos pisos (*Floor*), que posteriormente são convertidas em geometrias compatíveis com o ambiente do Grasshopper. Após essa conversão, todas as superfícies são reunidas através do componente *Merge*, formando um único conjunto geométrico que representa a edificação durante a simulação.

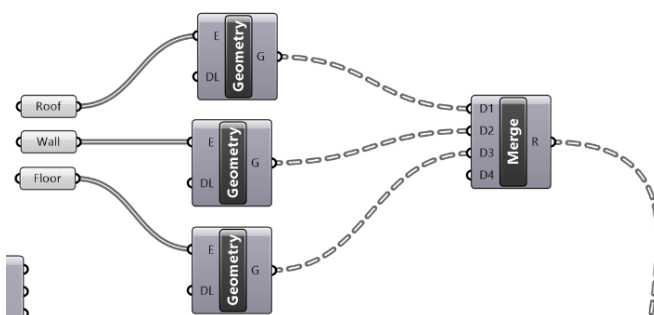


Figura 10 – Organização da geometria da edificação no Grasshopper, separando cobertura, fachadas e pisos para posterior integração e utilização nas análises ambientais realizadas pelo Ladybug Tools. Fonte: Captura de tela do ambiente Grasshopper, elaborada pela autora (2026).

Em seguida, um segundo fluxo do *script* utiliza novamente o arquivo climático para alimentar o componente *Sky Matrix*, responsável por organizar a distribuição anual da radiação solar incidente na abóbada celeste. Diferentemente do *SunPath*, que representa apenas a posição do Sol, a *Sky Matrix* considera simultaneamente a radiação direta e a radiação difusa, fornecendo ao Ladybug as informações necessárias para o cálculo da energia incidente sobre as superfícies da edificação.

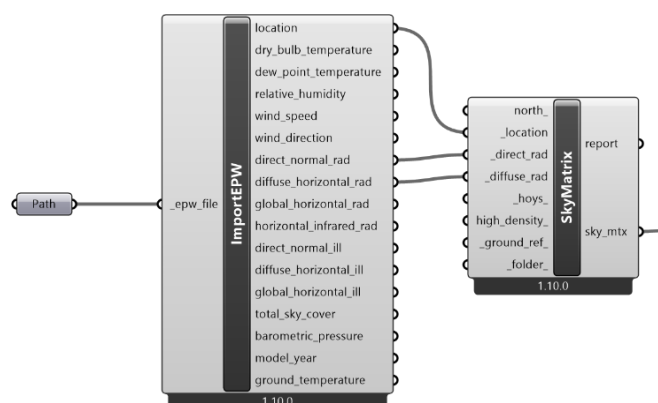


Figura 11 – Importação dos dados climáticos do arquivo EPW e geração da matriz celeste (Sky Matrix) utilizada nas simulações de radiação solar.

Na etapa seguinte são definidos os parâmetros responsáveis pela execução da simulação. O componente *Grid Size* estabelece o espaçamento entre os pontos distribuídos sobre as superfícies analisadas, influenciando diretamente o nível de detalhamento dos resultados obtidos. Valores menores produzem uma malha de análise mais refinada, aumentando a precisão dos resultados, porém exigindo maior tempo de processamento. O componente *Toggle* atua como comando de execução do *script*, permitindo iniciar ou interromper o processamento conforme necessário.

Por fim, todas essas informações são reunidas no componente *Incident Radiation*, responsável pelo cálculo da incidência da radiação solar sobre as superfícies da edificação. Esse componente integra a geometria importada do modelo BIM, os dados climáticos provenientes do arquivo EPW e a distribuição da radiação representada pela

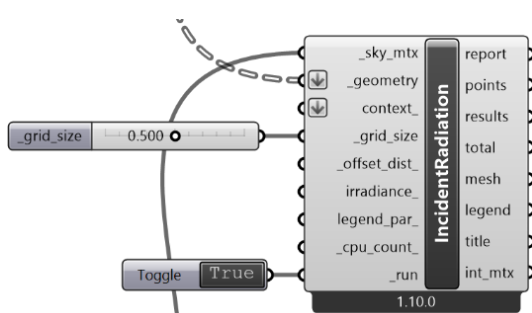


Figura 12 – Configuração do componente Incident Radiation e do parâmetro Grid Size, responsáveis pelo cálculo e pela resolução espacial das análises de radiação solar. Fonte: Captura de tela do ambiente Grasshopper, elaborada pela autora (2026).

Sky Matrix, gerando mapas coloridos de radiação solar, valores quantitativos, legendas, pontos de cálculo e demais informações utilizadas na interpretação dos resultados.

A estrutura adotada para o *script* permitiu manter constantes todos os parâmetros relacionados ao clima e ao processo de cálculo ao longo das simulações realizadas. Assim, as análises desenvolvidas neste trabalho se concentram exclusivamente na avaliação das modificações introduzidas na envoltória da edificação, possibilitando comparar diferentes estratégias projetuais e compreender sua influência sobre a incidência da radiação solar.

5.2 Análise da Incidência da Radiação Solar

Concluída a estruturação do fluxo paramétrico no Grasshopper e a importação da geometria do modelo BIM por meio da integração entre Revit e Rhino.Inside.Revit, iniciei a etapa de análises ambientais utilizando o plug-in Ladybug Tools. Essa fase da pesquisa teve como objetivo compreender o comportamento da incidência da radiação solar sobre a envoltória da edificação, estabelecendo um cenário-base que servirá como referência estabelecendo um cenário-base que servirá como referência para as comparações entre as diferentes configurações da forma arquitetônica investigadas ao longo do trabalho.

Antes da geração dos mapas de radiação propriamente ditos, realizei a análise da trajetória aparente do Sol, utilizando o componente *SunPath* do Ladybug. Essa ferramenta representa graficamente o percurso solar para a localização definida pelo arquivo climático (EPW), permitindo visualizar a posição do Sol ao longo das horas do dia e durante os diferentes períodos do ano. Embora o *SunPath* não realize cálculos de desempenho ambiental, sua utilização é fundamental para compreender a relação entre a orientação da edificação e o comportamento da radiação solar incidente.

Ainda dentro desse tema, neste ponto vale explicar um pouco melhor o que é o EPW. Quando conectamos o *Sky Matrix* ao *Incident Radiation*, o Ladybug pega o arquivo EPW e faz uma soma da radiação incidente durante todo o período analisado que, no caso do presente trabalho, se refere ao ano todo, ou seja, o software soma a contribuição de todos os dias do ano (aproximadamente 8.760 horas), conforme ilustrado nas figuras anteriores no fluxo metodológico do script paramétrico. Por essa razão, o resultado

aparece em kWh/m² no Rhino, apesar de que, a meu ver, talvez seria um pouco mais fácil de compreender o resultado mostrado se ele saísse como kWh/m² *por ano*.

A representação da trajetória solar possibilitou interpretar, de forma visual, como a posição do Sol varia ao longo do ano, indicando os períodos de maior altura solar², os horários de incidência direta sobre cada fachada e a influência da orientação da edificação em relação aos pontos cardeais. Essa leitura preliminar constitui uma etapa importante do método de projeto experimentado, pois permite compreender a origem dos resultados obtidos posteriormente nos mapas de radiação.

As perspectivas geradas durante essa etapa evidenciam que a cobertura permanece exposta durante praticamente todo o percurso aparente do Sol, enquanto as fachadas apresentam comportamentos distintos em função de sua orientação e da própria configuração volumétrica da edificação, conforme mostrado e sintetizado nos apêndices apresentados ao final deste trabalho. A visualização tridimensional do *SunPath* também permitiu identificar situações em que a própria geometria do edifício produz áreas de autossombreamento, resultado dos recuos, balanços e varandas incorporados ao projeto arquitetônico.

Após essa interpretação inicial, foi realizada a análise da incidência da radiação solar por meio do componente *Incident Radiation*, responsável por calcular a quantidade de energia solar incidente sobre cada superfície da envoltória ao longo do período considerado. Para garantir a confiabilidade metodológica da pesquisa, todas as simulações foram executadas mantendo constantes a geometria do projeto modelo, o arquivo climático, o tamanho da malha de análise (*Grid Size*) e os demais parâmetros definidos no fluxo paramétrico. Dessa forma, as diferenças observadas entre os cenários futuros poderão ser atribuídas exclusivamente às alterações introduzidas na envoltória arquitetônica.

Os resultados são apresentados por meio de mapas cromáticos, nos quais a escala de cores representa diferentes níveis de incidência da radiação solar sobre a edificação. As tonalidades frias indicam superfícies submetidas a menores níveis de radiação, enquanto as tonalidades quentes representam regiões com maior exposição solar ao longo

² Altura solar corresponde ao ângulo formado entre a posição aparente do Sol e a linha do horizonte, variando ao longo do dia e das estações do ano. Quanto maior a altura solar, mais elevado o Sol se encontra no céu e menor tende a ser o comprimento das sombras projetadas.

do período analisado. Essa representação gráfica permite compreender, de maneira intuitiva, a distribuição espacial da radiação incidente e identificar os pontos de maior vulnerabilidade da envoltória.

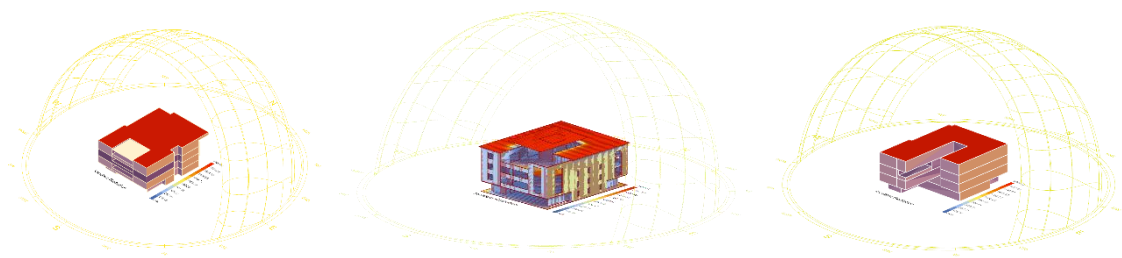


Figura 13 – Mapa cromático representando os níveis de incidência da radiação solar sobre as superfícies da edificação ao longo do período analisado. Fonte: Captura de tela do ambiente Rhinoceros, elaborada pela autora (2026).

A análise do modelo base demonstra que a cobertura constitui a superfície de maior exposição à radiação solar, comportamento esperado devido à incidência praticamente perpendicular dos raios solares durante boa parte do ano. Em razão dessa condição, observa-se uma concentração significativa das maiores intensidades de radiação nas superfícies horizontais superiores, evidenciando a importância da adoção de estratégias de proteção solar voltadas para esse elemento construtivo.

Nas fachadas verticais, a distribuição da radiação apresenta comportamento mais heterogêneo. A incidência varia conforme a orientação solar de cada face da edificação e é influenciada diretamente pela composição volumétrica do projeto. Nas fachadas verticais, a distribuição da radiação apresenta comportamento mais heterogêneo. A incidência varia conforme a orientação solar de cada face da edificação e é influenciada diretamente pela composição volumétrica do projeto, que pode favorecer a formação de áreas de autossombreamento em determinados trechos da envoltória. Essa condição demonstra que a própria configuração arquitetônica já exerce influência sobre o desempenho ambiental do edifício, mesmo antes da incorporação de dispositivos específicos de sombreamento.

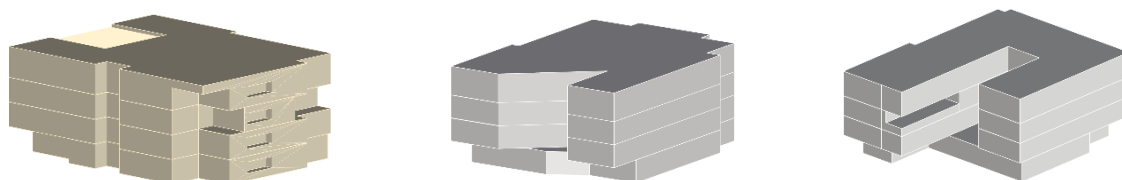


Figura 14 – Estudos de massa desenvolvidos para investigar a influência da configuração volumétrica sobre os padrões de incidência solar e autossombreamento da edificação. Fonte: Captura de tela do ambiente Rhinoceros, elaborada pela autora (2026).

As vistas ortogonais permitiram analisar individualmente o comportamento de cada fachada, enquanto as perspectivas isométricas facilitaram a compreensão da distribuição global da radiação sobre o conjunto da edificação. A associação dessas diferentes representações proporcionou uma leitura mais completa do desempenho solar do projeto, permitindo identificar tanto as superfícies críticas quanto as regiões naturalmente protegidas pelo autossombreamento da volumetria.

Outro aspecto observado durante a análise se refere à relação entre a trajetória aparente do Sol e os padrões de radiação obtidos nos mapas. Verifica-se que as superfícies voltadas para diferentes orientações recebem cargas de radiação distintas ao longo do ano, evidenciando que o comportamento solar está diretamente associado à orientação da edificação e às características geométricas da envoltória. Dessa forma, a interpretação conjunta do *SunPath* e dos mapas de *Incident Radiation* fornece uma compreensão mais abrangente do desempenho ambiental do projeto.

Ressalta-se que o modelo analisado nessa etapa corresponde a um projeto modelo, adotado como base experimental para a pesquisa. Seu objetivo não consiste em representar uma solução arquitetônica definitiva, mas estabelecer uma referência metodológica capaz de permitir a comparação entre diferentes estratégias de envoltória. A partir desse modelo-base, serão propostas modificações arquitetônicas como alterações na configuração das fachadas, inserção de elementos de sombreamento e demais estratégias passivas, mantendo inalterados todos os demais parâmetros da simulação. Essa metodologia possibilita avaliar, de forma isolada, a influência de cada solução projetual sobre a incidência da radiação solar.

5.3 Estudos de massa, volumetria e fachadas

Com o objetivo de investigar a influência da geometria da envoltória sobre o comportamento da radiação solar incidente, foram desenvolvidos estudos exploratórios de massa e volumetria a partir do modelo piloto previamente estabelecido. Diferentemente de propostas arquitetônicas consolidadas ou soluções definitivas de projeto, as alternativas elaboradas nessa etapa possuem caráter exclusivamente investigativo, sendo utilizadas como instrumento para compreender a relação entre forma, orientação e desempenho ambiental.

Os estudos mantiveram constantes o programa arquitetônico, a implantação da edificação, o número de pavimentos e a orientação solar do conjunto, restringindo as alterações exclusivamente à configuração volumétrica e aos planos que compõem a envoltória externa. Essa estratégia permitiu isolar a variável geométrica dentro do processo de análise, viabilizando a comparação direta entre diferentes soluções formais sob as mesmas condições ambientais.

Todas as análises utilizaram os mesmos parâmetros de simulação, incluindo o arquivo climático, o período anual de cálculo, a resolução da malha de análise (*Grid Size*). Dessa forma, as diferenças observadas nos resultados podem ser atribuídas exclusivamente às modificações realizadas nos estudos de massa e nas configurações das fachadas, eliminando interferências decorrentes de alterações metodológicas entre as simulações.

A leitura referente ao período de um ano produzida pelo componente *Incident Radiation* representa a quantidade total de energia solar incidente em cada porção da envoltória durante todo o período analisado, sendo expressa em quilowatt-hora por metro quadrado (kWh/m²). Diferentemente de análises pontuais, essa abordagem incorpora as variações sazonais da trajetória solar, as diferentes alturas do Sol ao longo do ano e os efeitos combinados da radiação direta e difusa registrados no arquivo climático utilizado.

Em todas as alternativas estudadas, a cobertura apresentou os maiores índices de incidência anual da radiação solar, comportamento esperado em edificações localizadas em climas tropicais de altitude, onde as superfícies horizontais permanecem expostas durante grande parte do ano e possuem menor potencial de proteção por elementos adjacentes. Por outro lado, as fachadas demonstraram elevada sensibilidade às alterações geométricas, evidenciando que mudanças relativamente simples na configuração da massa edificada são capazes de produzir diferenças significativas nos padrões de exposição solar e autossombreamento.

As diferenças observadas entre os estudos volumétricos podem ser verificadas de forma mais detalhada nos mapas de radiação e nas leituras ambientais disponibilizadas nos anexos ao final deste trabalho.

- Estudo Volumétrico 01

Os resultados indicaram alterações nos padrões de exposição das superfícies verticais, com redistribuição das áreas de maior incidência e surgimento de novas regiões protegidas pela própria volumetria. A análise evidenciou a capacidade dos avanços e mudanças de alinhamento para modificar os mecanismos de autossombreamento da edificação, influenciando diretamente a carga solar incidente sobre a envoltória.

- Estudo Volumétrico 02

O segundo estudo explorou uma configuração mais compacta e racionalizada da massa edificada, reduzindo reentrâncias e simplificando a composição dos planos verticais. Como consequência, observou-se uma distribuição mais homogênea da radiação solar ao longo das fachadas, acompanhada da redução das áreas naturalmente protegidas pela própria geometria.

Os resultados demonstram que a redução de reentrâncias, avanços e variações na envoltória tende a diminuir os efeitos de autossombreamento, aumentando a uniformidade da exposição solar nas superfícies verticais e evidenciando a necessidade de estratégias complementares de proteção em geometrias mais compactas.

- Estudo Volumétrico 03

O terceiro estudo de massa introduziu avanços e recuos mais pronunciados entre os diferentes pavimentos, ampliando a complexidade geométrica da envoltória e intensificando os mecanismos de proteção produzidos pela própria forma arquitetônica.

As leituras de radiação indicaram redução da incidência em diversas regiões localizadas sob projeções e balanços superiores, demonstrando o potencial das estratégias de autossombreamento como ferramenta passiva de controle ambiental. Em contrapartida, a cobertura permaneceu concentrando os maiores valores de radiação anual, comportamento recorrente em todos os estudos realizados.

6 RESULTADOS DOS ESTUDOS PARAMÉTRICOS E AMBIENTAIS

Os resultados obtidos ao longo da pesquisa evidenciam que a integração entre modelagem paramétrica, simulação ambiental e ambiente BIM possui potencial para alterar significativamente a forma como decisões arquitetônicas são tomadas durante as etapas iniciais do processo projetual.

Diferentemente dos fluxos convencionais, nos quais a avaliação ambiental frequentemente ocorre apenas após a consolidação da proposta arquitetônica, o método adotado neste trabalho permitiu incorporar critérios de desempenho solar e lumínico ainda durante os estudos preliminares de massa, envoltória e organização espacial.

Nesse contexto, a utilização de um projeto piloto e de sucessivos estudos volumétricos não teve como objetivo alcançar uma solução arquitetônica definitiva, mas construir um ambiente controlado de experimentação capaz de evidenciar as relações existentes entre geometria, orientação solar e comportamento ambiental da edificação. A manutenção constante dos parâmetros climáticos, do arquivo meteorológico utilizado, da malha de cálculo e do fluxo computacional permitiu que as diferenças observadas entre os cenários analisados fossem atribuídas exclusivamente às modificações introduzidas na configuração da envoltória arquitetônica.

Mais do que produzir um objeto arquitetônico final, a pesquisa permitiu registrar e compreender o comportamento das ferramentas digitais utilizadas, avaliando suas potencialidades, limitações e contribuições para a tomada de decisão orientada por desempenho ambiental.

6.1 Avaliação do desempenho solar e lumínico da proposta

As análises realizadas ao longo da pesquisa demonstraram que a incidência da radiação solar apresenta forte dependência da geometria da envoltória e da orientação das superfícies que compõem a edificação. Embora a cobertura tenha apresentado, em todos os cenários estudados, os maiores valores anuais de radiação incidente, as fachadas verticais mostraram comportamento significativamente mais sensível às alterações volumétricas introduzidas durante os estudos de massa.

Os resultados obtidos por meio do componente *Incident Radiation* evidenciaram que pequenas modificações geométricas, como recuos, balanços, deslocamentos entre

pavimentos e mudanças no alinhamento das fachadas, são capazes de produzir alterações relevantes nos padrões de autossombreamento da edificação. Em diversos momentos, observou-se que soluções relativamente simples foram suficientes para reduzir a exposição direta de determinadas superfícies, sem a necessidade da incorporação imediata de elementos adicionais de proteção solar.

A leitura conjunta entre os diagramas de trajetória solar produzidos pelo componente *SunPath* e os mapas cromáticos de radiação gerados pelo Ladybug Tools permitiu compreender não apenas onde a radiação incidia com maior intensidade, mas também os motivos que levavam determinados setores da envoltória a apresentarem comportamentos distintos ao longo do ano.

Outro aspecto importante observado diz respeito à influência da própria volumetria na construção de mecanismos passivos de controle ambiental. As simulações demonstraram que avanços, recuos e sobreposições entre pavimentos podem atuar como dispositivos de proteção solar incorporados à própria forma arquitetônica, reduzindo cargas térmicas incidentes e contribuindo para o desempenho ambiental da edificação sem necessariamente recorrer a soluções tecnológicas adicionais.

Embora o trabalho não tenha desenvolvido análises quantitativas aprofundadas de iluminação natural interna, a presença de vazios, reentrâncias e afastamentos entre volumes também indicou potencial para favorecer a distribuição do *daylight* e ampliar a penetração da iluminação natural nos ambientes centrais da proposta.

6.2 Compatibilidade entre usos e qualidade espacial

Embora o foco principal da pesquisa esteja relacionado à utilização da modelagem paramétrica e das simulações ambientais como instrumentos de apoio ao processo projetual, a adoção de uma edificação de uso misto como objeto de estudo permitiu investigar como diferentes demandas funcionais influenciam as decisões relacionadas à forma e à envoltória arquitetônica.

A coexistência entre usos acadêmicos, coletivos, comerciais e residenciais introduziu exigências distintas em relação à incidência solar, aos níveis de privacidade, aos horários de ocupação e às necessidades de iluminação natural dos ambientes. Essa

diversidade programática se mostrou adequada para a investigação proposta, uma vez que ampliou a quantidade de variáveis consideradas durante os estudos de massa, volumetria e fachada.

Entretanto, é importante destacar novamente que o projeto desenvolvido não possui a pretensão de representar uma solução arquitetônica definitiva ou completamente resolvida do ponto de vista funcional e espacial. Aspectos relacionados ao controle de acessos, à segregação entre fluxos públicos e privados, à gestão operacional dos diferentes usos e ao aprofundamento das relações programáticas entre os setores ainda demandariam estudos específicos em etapas posteriores de desenvolvimento projetual.

Nesse sentido, o edifício deve ser compreendido como um projeto piloto, elaborado com o objetivo de fornecer uma base geométrica e programática suficientemente complexa para a aplicação das ferramentas de parametrização, simulação ambiental e interoperabilidade BIM investigadas ao longo da pesquisa. Mais do que validar uma solução arquitetônica específica, o trabalho buscou compreender de que maneira essas ferramentas podem contribuir para processos projetuais mais informados, analíticos e orientados por desempenho ambiental.

6.3 Contribuições da integração entre Rhino, Grasshopper, Ladybug e BIM

Além dos resultados relacionados ao desempenho ambiental da edificação, a pesquisa também possibilitou uma avaliação crítica do próprio fluxo digital adotado ao longo do trabalho. A integração entre Revit, Rhinoceros, Grasshopper e Ladybug Tools permitiu construir um processo relativamente contínuo entre modelagem, simulação e documentação, reduzindo a necessidade de reconstrução sucessiva da geometria e minimizando perdas de informação entre as diferentes etapas do desenvolvimento projetual.

A experiência obtida durante a construção dessa interoperabilidade evidenciou que a utilização simultânea dessas plataformas envolve desafios relacionados à compatibilização de geometrias, à organização dos fluxos de dados e à adaptação entre diferentes lógicas de trabalho. Enquanto o ambiente BIM privilegia a construção de modelos informacionais voltados à documentação e à coordenação do projeto,

ferramentas como Rhinoceros e Grasshopper favorecem processos mais exploratórios e iterativos, voltados à investigação geométrica e ao teste de alternativas formais e ambientais.

Nesse contexto, a interoperabilidade deixou de representar apenas uma transferência de arquivos entre softwares e passou a constituir parte fundamental do próprio método de projeção, permitindo que decisões relacionadas à forma, ao desempenho solar e à envoltória fossem continuamente verificadas e refinadas ao longo do processo. A possibilidade de retornar ao modelo, alterar parâmetros, testar novas volumetrias e imediatamente observar seus impactos ambientais constituiu uma das principais contribuições percebidas durante o desenvolvimento do trabalho.

Outro aspecto relevante se refere à compreensão de que a adoção dessas ferramentas não exige necessariamente o abandono dos fluxos tradicionais de projeto, mas sim sua ampliação. A experiência desenvolvida ao longo da pesquisa demonstrou que diferentes plataformas podem atuar de forma complementar, aproveitando as potencialidades específicas de cada ambiente computacional dentro de um processo único e integrado.

Por fim, talvez a principal contribuição observada não esteja relacionada à produção de geometrias complexas ou formas arquitetônicas incomuns, mas à possibilidade de fundamentar decisões projetuais a partir de informações quantitativas e ambientalmente verificáveis. Nesse sentido, as ferramentas digitais passaram a atuar menos como instrumentos de representação e mais como instrumentos de reflexão e apoio ao processo de projeto.

7 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O desenvolvimento da pesquisa em âmbito de Trabalho Final de Graduação permitiu compreender que a integração entre modelagem paramétrica, simulação ambiental e ambiente BIM possui potencial para contribuir significativamente para os processos contemporâneos de projeto arquitetônico, especialmente quando utilizada como instrumento de apoio à tomada de decisão nas etapas iniciais de concepção.

Ao longo do trabalho, a utilização combinada entre Rhinoceros, Grasshopper, Ladybug Tools e Revit possibilitou investigar relações entre geometria, incidência solar e desempenho ambiental ainda durante os estudos preliminares de massa e envoltória. Nesse contexto, as simulações deixaram de atuar apenas como mecanismos de verificação posterior e passaram a participar ativamente da construção das alternativas estudadas, permitindo avaliar os impactos das decisões formais antes da consolidação do modelo arquitetônico.

Os estudos volumétricos desenvolvidos demonstraram que pequenas alterações geométricas podem produzir modificações significativas nos padrões de exposição solar, reforçando a importância das estratégias passivas de autossombreamento, dos recuos, dos balanços e das variações na configuração das fachadas como instrumentos de controle ambiental incorporados à própria forma arquitetônica.

Da mesma forma, a experiência obtida durante a construção do fluxo de interoperabilidade evidenciou tanto as potencialidades quanto os desafios envolvidos na integração entre diferentes plataformas digitais. Questões relacionadas à compatibilização geométrica, à transferência de informações e às diferentes lógicas operacionais dos softwares constituíram parte importante do aprendizado desenvolvido ao longo da pesquisa, contribuindo para uma compreensão mais ampla do papel dessas ferramentas no processo projetual contemporâneo.

Por fim, vale ressaltar que, desde o início, o edifício desenvolvido ao longo do trabalho não possuía a pretensão de representar uma solução arquitetônica definitiva ou plenamente resolvida sob o ponto de vista funcional, espacial ou construtivo. O projeto piloto foi concebido como um objeto de experimentação metodológica, suficientemente complexo para permitir a aplicação e a avaliação das ferramentas investigadas,

funcionando como suporte para a análise das relações entre parametrização, desempenho ambiental e processo de projeto.

Dessa forma, os resultados obtidos até o presente momento indicam que a principal contribuição da pesquisa não está associada à definição de uma forma arquitetônica específica, mas à compreensão de como ferramentas digitais podem auxiliar na construção de processos projetuais mais analíticos, integrados e orientados por desempenho. Essas observações servirão de base para o aprofundamento das investigações e para o desenvolvimento futuro de pesquisas que continuem a analisar ferramentas digitais que podem — ou não — contribuir para processos de projeto.

GLOSSÁRIO DE TERMOS TÉCNICOS

Algoritmo paramétrico – sequência lógica de operações que organiza relações entre variáveis geométricas, ambientais e funcionais no processo de modelagem. No contexto deste trabalho, refere-se à estrutura criada no Grasshopper para testar diferentes soluções de fachada, recuos, sombreamento e volumetria.

BIM (Building Information Modeling) – metodologia de desenvolvimento de projeto baseada em modelos digitais que reúnem informações geométricas, construtivas e técnicas da edificação, permitindo maior integração entre concepção, documentação e compatibilização.

BIM–BEM – integração entre o ambiente BIM e ferramentas de simulação de desempenho ambiental e energético (Building Energy Modeling), possibilitando avaliar o comportamento do edifício durante o processo de projeto.

Brise-soleil – elemento arquitetônico de proteção solar utilizado para controlar a incidência de radiação direta e melhorar a qualidade da iluminação natural nos ambientes internos.

Daylight – termo utilizado para se referir à iluminação natural disponível nos ambientes internos, geralmente analisada por meio de simulações computacionais que avaliam distribuição, intensidade e autonomia da luz ao longo do dia.

Envoltória – conjunto de elementos que delimitam a edificação e fazem a interface entre ambiente interno e externo, como fachadas, cobertura, esquadrias, brises e demais dispositivos de proteção climática.

Grasshopper – plugin de modelagem paramétrica integrado ao Rhinoceros, baseado em programação visual por nós, utilizado para criar geometrias controladas por parâmetros e relações lógicas.

Interoperabilidade – capacidade de diferentes softwares e plataformas de trocarem informações de maneira consistente, permitindo continuidade entre modelagem, simulação e documentação.

Ladybug – plugin de simulação ambiental para Grasshopper utilizado para análises de radiação solar, percurso do sol, horas de insolação, iluminação natural e dados climáticos.

Nó (Node) – unidade gráfica do Grasshopper que representa uma operação, parâmetro ou relação lógica dentro do algoritmo paramétrico.

NURBS (Non-Uniform Rational B-Splines) – é um modelo matemático utilizado para representar curvas e superfícies com elevado grau de precisão, amplamente empregado em softwares de modelagem tridimensional devido à sua capacidade de descrever geometrias simples e complexas de forma contínua e parametrizável.

Parâmetro – variável controlável dentro do modelo digital, como altura, profundidade, ângulo, proporção de fachada ou tamanho de aberturas, que pode ser ajustada para gerar diferentes resultados formais.

Plugin – módulo complementar acoplado a um software principal com a finalidade de ampliar suas funcionalidades originais. No presente trabalho, plugins como Ladybug e Honeybee são utilizados no ambiente Grasshopper para incorporar recursos de simulação ambiental ao processo de modelagem paramétrica.

Rhinoceros 3D – software de modelagem tridimensional baseado em NURBS, utilizado como plataforma principal para a construção geométrica do modelo arquitetônico.

Script – estrutura lógica do algoritmo paramétrico, composta pela rede de nós e conexões que definem o funcionamento do modelo.

Simulação ambiental – processo de avaliação computacional do comportamento do edifício frente a variáveis climáticas, como radiação solar, iluminação natural, temperatura e sombreamento.

REFERÊNCIAS

- ALVARES, C. A.; STAPE, J. L.; SENTELHAS, P. C.; GONÇALVES, J. L. M.; SPAROVEK, G. Köppen's climate classification map for Brazil. *Meteorologische Zeitschrift*, Stuttgart, v. 22, n. 6, p. 711-728, 2013.
- CICCOZZI, Annamaria *et al.* BIM to BEM for building energy analysis: a review of interoperability strategies. *Energies*, Basel, v. 16, n. 7845, 2023.
- EASTMAN, Chuck *et al.* *BIM handbook: a guide to building information modeling for owners, managers, designers, engineers, and contractors*. 2. ed. New Jersey: Wiley, 2011.
- GIVONI, Baruch. *Climate considerations in building and urban design*. New York: John Wiley & Sons, 1998.
- KHAN, Hasibullah. Microclimatic architectural design by interfacing Grasshopper and Dynamo with Rhino and Revit. *Measurement: Sensors*, Amsterdam, v. 33, 2024.
- KOLAREVIC, Branko. *Architecture in the digital age: design and manufacturing*. New York: Spon Press, 2005.
- LADYBUG TOOLS. *Environmental analysis for designers*. Disponível em: [Ladybug Tools](#). Acesso em: 7 abr. 2026.
- LADYBUG TOOLS. *EPW Map*. Disponível em: [Ladybug EPW Map](#). Acesso em: 13 maio 2026.
- LAWRIE, Linda K.; CRAWLEY, Drury B. *Climate.OneBuilding.org: Development of Global Typical Meteorological Years (TMYx)*. 2026. Disponível em: <https://climate.onebuilding.org/>. Acesso em: 13 março 2026.
- OLGYAY, Victor. *Design with climate: bioclimatic approach to architectural regionalism*. Princeton: Princeton University Press, 1963.
- OLIVEIRA, Brunna Pereira de; PIRES, Janice de Freitas. Integração entre modelagem paramétrica, simulação térmica e geometria complexa para a otimização do desempenho das edificações. 2019. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Arquitetura e Urbanismo) – Universidade Federal de Pelotas, Pelotas, 2019.
- PIEGL, Les; TILLER, Wayne. *The NURBS Book*. 2. ed. Berlin: Springer, 1997.

PIRES, Janice de Freitas *et al.* O compartilhamento de saberes sobre o uso da modelagem paramétrica e da fabricação digital entre contextos formativos e profissionais de arquitetura: relato de caso. *Gestão & Tecnologia de Projetos*, São Carlos, v. 17, n. 1, 2022.

PIRES, Janice de Freitas; PEREIRA, Alice Theresinha Cybis. Entre as curvas da arquitetura contemporânea e o ensino da geometria na arquitetura: uma abordagem didática ao projeto paramétrico. *RECyT*, Posadas, v. 22, n. 33, p. 63-75, 2020.

PLP ARCHITECTURE. *The Edge: project documentation*. Londres, 2015.

PREFEITURA MUNICIPAL DE OURO PRETO. *Informações gerais do município de Ouro Preto*. Ouro Preto, MG. Disponível em: [Prefeitura de Ouro Preto](#). Acesso em: 7 jul. 2026.

RUSCHEL, Regina Coeli. To BIM or not to BIM? In: ENCONTRO DA ASSOCIAÇÃO NACIONAL DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO EM ARQUITETURA E URBANISMO, 2014, São Paulo. *Anais [...] São Paulo: ANPARQ*, 2014.

SZOKOLAY, Steven V. *Introduction to architectural science: the basis of sustainable design*. Oxford: Elsevier, 2008.

UNIVERSIDADE FEDERAL DE JUIZ DE FORA. Centro de Difusão do Conhecimento. *Manual de normalização para apresentação de trabalhos acadêmicos*. Juiz de Fora: UFJF, 2023.

UNIVERSIDADE FEDERAL DE OURO PRETO. Sistema de Bibliotecas e Informação. *Guia para normalização bibliográfica de trabalhos acadêmicos*. 2. ed. rev. e ampl. Ouro Preto: UFOP, 2017.

WOODBURY, Robert. *Elements of parametric design*. New York: Routledge, 2010.

PIEGL, Les; TILLER, Wayne. *The NURBS Book*.

DECLARAÇÃO DE USO DE INTELIGÊNCIA ARTIFICIAL GENERATIVA

Durante a elaboração deste Trabalho Final de Graduação, ferramentas de Inteligência Artificial Generativa foram utilizadas de maneira complementar em atividades relacionadas à revisão textual, ao aperfeiçoamento da redação acadêmica e ao apoio à adequação do documento às normas e convenções acadêmicas aplicáveis.

A utilização dessas ferramentas teve carácter estritamente auxiliar, contribuindo para a melhoria da clareza, da organização e da apresentação do trabalho, sem substituir as atividades de investigação, reflexão crítica, interpretação dos resultados ou desenvolvimento projetual realizadas pela autora.

As escolhas metodológicas, as análises desenvolvidas, as decisões projetuais adotadas e as conclusões apresentadas ao longo desta pesquisa são de responsabilidade exclusiva da autora, que revisou e validou integralmente todo o conteúdo incorporado ao documento.

Dessa forma, o uso de Inteligência Artificial Generativa limitou-se ao suporte técnico e editorial ao processo de escrita e organização do trabalho, preservando integralmente sua autoria intelectual e originalidade.

APÊNDICE A – Modelo Arquitetônico Experimental

APÊNDICE B – Metodologia: Script + Grasshopper + Ladybug

APÊNDICE C – Análise da Incidência da Radiação Solar (Projeto Piloto)

APÊNDICE D – Estudo Volumétrico 01

APÊNDICE E – Estudo Volumétrico 02

APÊNDICE F – Estudo Volumétrico 03