

UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS
Faculdade de Arquitetura e Urbanismo
Programa de Pós-Graduação em Conforto Ambiental, Eficiência Energética e
Tecnologias Construtivas Sustentáveis

Laíza Fernandes Diniz

Entre Espaços e Temperaturas
Metodologia para análise de conforto e desempenho termo energético de
edificações residenciais considerando o entorno urbano no programa
computacional EnergyPlus.

Belo Horizonte
2025

Laíza Fernandes Diniz

Entre Espaços e Temperaturas
Metodologia para análise de conforto e desempenho termo energético de
edificações residenciais considerando o entorno urbano no programa
computacional EnergyPlus.

Monografia apresentada ao Curso de Especialização em Sustentabilidade em Cidades, Edificações e Produtos da Escola de Arquitetura da Universidade Federal de Minas Gerais como requisito parcial à obtenção do título de especialista em Cidades, Edificações e Produtos.

Área de concentração: Conforto ambiental, desempenho termo energético com ênfase em simulação computacional e análise urbana.

Orientadora: Professora Doutora, Camila Ferreira.

Belo Horizonte
2025

ATA DA REUNIÃO DA COMISSÃO EXAMINADORA DE TRABALHO DE MONOGRAFIA DA ALUNA *LAIZA FERNANDES DINIZ* COMO REQUISITO PARA OBTENÇÃO DO CERTIFICADO DO CURSO DE ESPECIALIZAÇÃO EM CONFORTO AMBIENTAL, EFICIÊNCIA ENERGÉTICA E TECNOLOGIAS CONSTRUTIVAS SUSTENTÁVEIS.

Às 14:30 hs. do dia 08 de julho de 2025, reuniu-se remotamente, por meio da plataforma Teams, a Comissão Examinadora composta pela **Profa Dra. Camila Carvalho Ferreira-orientadora-Presidente, Profa. Dra. Eleonora Sad de Assis e a Arquiteta Msc. Ingrid Stephanie de Moraes**, como membros titulares, designada pela Comissão Coordenadora do Curso de Especialização em Conforto Ambiental, Eficiência Energética e Tecnologias Construtivas Sustentáveis, para avaliação da monografia intitulada “Entre Espaços e Temperaturas: Metodologia para análise de conforto e desempenho termo energético de edificações residenciais considerando o entorno urbano no programa computacional EnergyPlus” de autoria da aluna **Laiza Fernandes Diniz** como requisito final para obtenção do Certificado de Especialista em Conforto Ambiental, Eficiência Energética e Tecnologias Construtivas Sustentáveis. A citada Comissão examinou o trabalho e, por unanimidade, concluiu que a monografia atende às exigências para a obtenção do Certificado de Conclusão do Curso, atribuindo ao trabalho o conceito A (95 pontos). A Comissão recomenda que seja encaminhado 01 (um) exemplar digital ao Repositório da UFMG, após as correções sugeridas.

Belo Horizonte, 08 de julho de 2025.

Profa Dra. Camila Carvalho Ferreira
orientadora-Presidente

Camila
Carvalho
Ferreira

Assinado de forma digital
por Camila Carvalho
Ferreira
Dados: 2025.07.08
16:48:04 -03'00'

Prfa. Dra. Eleonora Sad de Assis
Membro Titular

gov.br

Documento assinado digitalmente
ELEONORA SAD DE ASSIS
Data: 08/07/2025 17:52:53-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Ingrid Stephanie de Moraes
Membro Titular

gov.br

Documento assinado digitalmente
INGRID STEPHANIE DE MORAIS
Data: 08/07/2025 17:07:03-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

RESUMO

O crescimento acelerado das cidades e os efeitos das mudanças climáticas têm acentuado o desconforto térmico em ambientes urbanos, sobretudo nas regiões densamente construídas. Nesse contexto, esta pesquisa propôs uma metodologia para avaliar o conforto térmico e o desempenho termoenergético de edificações residenciais em cenários urbanos da cidade de Belo Horizonte – MG, explorando o potencial do *software* EnergyPlus (versão 24.1.0). O problema central abordado foi a limitação de simulações tradicionais, que frequentemente negligenciam os efeitos do entorno urbano — especialmente as trocas de radiação de onda longa entre superfícies —, conduzindo a resultados imprecisos sobre carga térmica e consumo energético.

Como caso de estudo, foi modelado um edifício multifamiliar em região adensada na cidade de Belo Horizonte - MG. A proposta metodológica consistiu na inserção conjunta de zonas térmicas das edificações vizinhas, elementos de sombreamento tridimensionais e cálculo do fator de forma, todos integrados diretamente no ambiente do EnergyPlus, com apoio apenas do SketchUp e OpenStudio. A pesquisa demonstrou que, embora tradicionalmente conhecido por considerar apenas a radiação solar de onda curta, o EnergyPlus também é capaz de computar os efeitos da radiação de onda longa quando adequadamente configurado, por meio de objetos como *SurfaceProperty:SurroundingSurfaces* e *LocalEnvironment*.

As simulações realizadas evidenciaram que a modelagem detalhada do entorno urbano impacta significativamente tanto as condições de conforto térmico quanto as cargas energéticas nas edificações. A metodologia adotada, portanto, não apenas amplia o potencial analítico do *software*, como também oferece subsídios técnicos relevantes para o aprimoramento de projetos arquitetônicos, o enfrentamento das ilhas de calor e a formulação de políticas públicas voltadas à sustentabilidade urbana frente às mudanças climáticas.

Palavras-chave: conforto térmico; desempenho termoenergético; entorno urbano; EnergyPlus.

ABSTRACT

The rapid growth of cities and the effects of climate change have intensified thermal discomfort in urban environments, particularly in densely built areas. In this context, this research proposed a methodology to evaluate thermal comfort and the thermoenergetic performance of residential buildings in urban scenarios of Belo Horizonte, Brazil, by exploring the capabilities of EnergyPlus software (version 24.1.0). The central issue addressed was the limitation of conventional simulations, which often overlook the influence of the urban surroundings—especially longwave radiation exchanges between surfaces—leading to inaccurate assessments of thermal loads and energy consumption.

As a case study, a multifamily building located in a densely populated area of Belo Horizonte was modeled. The proposed methodology involved the integrated insertion of thermal zones representing neighboring buildings, three-dimensional shading elements, and sky view factor calculations, all directly implemented within the EnergyPlus environment, with support only from SketchUp and OpenStudio. The research demonstrated that, although traditionally known for simulating shortwave solar radiation, EnergyPlus is also capable of computing longwave radiation effects when properly configured through objects such as SurfaceProperty:SurroundingSurfaces and LocalEnvironment.

The simulations showed that detailed modeling of the urban context significantly affects both indoor thermal comfort conditions and building energy loads. When accurately representing the surroundings, EnergyPlus proved to be effective in simulating complex thermal exchanges—including longwave radiation—making it a robust tool for dense urban environments. Therefore, the adopted methodology not only expands the software's analytical potential but also provides relevant technical support for improving architectural design, addressing urban heat island effects, and informing public policies aimed at urban sustainability and climate change mitigation.

Keywords: thermal comfort; thermo-energetic performance; urban surroundings; EnergyPlus.

LISTA DE FIGURAS

Figura 01	Exemplificação de condição climática no local e <i>softwares</i> responsável pela modelagem	20
Figura 02	Elementos climáticos que afetam o consumo de energia da casa, períodos frios	21
Figura 03	Elementos climáticos que afetam o consumo de energia da casa, períodos quentes	22
Figura 04	Tipologia de uso e ocupação dos lotes para Belo Horizonte no ano de 2011	30
Figura 05	Tipologia de uso e ocupação dos lotes para Belo Horizonte no ano de 2022	31
Figura 06	Adensamento do bairro selecionado para simulação	36
Figura 07	Edificações circundantes ao arquétipo residencial multifamiliar	38
Figura 08	Planta inicial do modelo residencial multifamiliar	42
Figura 09	Arquétipo residencial multifamiliar	43
Figura 10	Cenário sem interferência do entorno urbano	48
Figura 11	Fluxograma da simulação com elementos vizinhos modelados através de elementos sombreadores	49
Figura 12	Fluxograma da metodologia aplicada	52
Figura 13	Fluxograma da simulação com elementos vizinhos modelados através da metodologia aplicada	53
Figura 14	Referenciamento das paredes externas e suas nomenclaturas	58

LISTA DE TABELAS

Tabela 01	Relação entre os fatores que influenciam o consumo de energia no EnergyPlus, os elementos climáticos e os parâmetros do local	26
Tabela 02	Tratamento estatístico de dados	33
Tabela 03	Tratamento estatístico de dados	33
Tabela 04	Tratamento estatístico de dados	35
Tabela 05	Resumo das entradas de condições mesoclimáticas no EnergyPlus	41
Tabela 06	Propriedades físicas e térmicas dos materiais utilizados	44
Tabela 07	Demonstração da aplicabilidade dos materiais utilizados	44
Tabela 08	Dados de entrada para equipamentos, iluminação e ocupação	45
Tabela 09	Resultados [W/m^2] por superfícies externas, radiação de onda longa	59
Tabela 10	Resultados [W/m^2] por superfícies externas, radiação de onda longa	61
Tabela 11	Horas de conforto térmico [C°]	78
Tabela 12	Horas de conforto térmico [C°]	79

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 01	Taxa média de radiação térmica por área, zona um	62
Gráfico 02	Taxa média de radiação térmica por área, zona três	62
Gráfico 03	Taxa média de radiação térmica por área, zona quatro	63
Gráfico 04	Radiação térmica líquida por área na face externa em diferentes pavimentos e zonas térmicas no dia típico de verão (22/12), simulação do modelo sem elementos sombreadores ao entorno	64
Gráfico 05	Radiação térmica líquida [W/m ²] no dia típico de verão, zona um	66
Gráfico 06	Radiação térmica líquida [W/m ²] no dia típico de verão, zona dois	67
Gráfico 07	Radiação térmica líquida [W/m ²] no dia típico de verão, zona três	67
Gráfico 08	Radiação térmica líquida [W/m ²] no dia típico de verão, zona quatro	68
Gráfico 09	Radiação térmica líquida [W/m ²] no dia típico de verão às 07h	69
Gráfico 10	Radiação térmica líquida [W/m ²] no dia típico de verão às 12h	69
Gráfico 11	Radiação térmica líquida [W/m ²] no dia típico de verão às 19h	70
Gráfico 12	Radiação térmica líquida por área na face externa em diferentes pavimentos e zonas térmicas no dia típico de inverno (21/06), simulação do modelo sem elementos sombreadores ao entorno	71
Gráfico 13	Radiação térmica líquida [W/m ²] no dia típico de inverno, zona um	73
Gráfico 14	Radiação térmica líquida [W/m ²] no dia típico de inverno, zona dois	74
Gráfico 15	Radiação térmica líquida [W/m ²] no dia típico de inverno, zona três	74
Gráfico 16	Radiação térmica líquida [W/m ²] no dia típico de inverno, zona quatro	75
Gráfico 17	Radiação térmica líquida [W/m ²] no dia típico de inverno às 07h	76
Gráfico 18	Radiação térmica líquida [W/m ²] no dia típico de inverno às 12h	76
Gráfico 19	Radiação térmica líquida [W/m ²] no dia típico de inverno às 19h	77
Gráfico 20	Percentual de horas em conforto térmico [C°], anual	80

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	10
2	OBJETIVO	13
2.1	Objetivo Geral	13
2.2	Objetivos Específicos	13
3	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	14
3.1	Conforto Térmico e Desempenho Energético.....	14
3.2	Ilhas de Calor Urbanas	15
3.3	O Impacto dos Parâmetros do Local	17
3.3.1	Nível Climático no Local	19
3.3.2	Elementos Climáticos que Afetam o Consumo de Energia	20
3.4	EnergyPlus	23
3.4.1	Microclima no Cálculo do EnergyPlus.....	25
3.4.1.2	Microclima Influenciado pelas Zonas Térmicas do Entorno Urbano.....	26
4	METODOLOGIA	28
4.1	Descrição Modelo do Cânion Urbano e das Edificações de Análise.....	28
4.1.1	Definição de Metodologia para a Identificação de Áreas Amostrais com Caraterísticas Urbanas Distintas.....	32
4.2	Modelagem no <i>Software</i> Energyplus.....	38
4.2.1	Definição dos Parâmetros do Local.....	39
4.2.1.1	Condição Macroclimática.....	39
4.2.1.2	Condição Mesoclimática	40
4.3	Parâmetros e Modelo da Edificação	41

4.3.1 Definição do Modelo	41
4.3.1.1 Arquétipo	41
4.4 Entradas e Cenários Considerados	43
4.4.1 Dados de Entrada no Arquivo EnergyPlus <i>Input Data File</i> - IDF	43
4.4.1.1 Objetos de Entrada Utilizados no Arquivo IDF	43
4.4.1.2 Zonas Térmicas	46
4.4.1.3 Cenário sem Interferência do Contexto Urbano	47
4.4.1.4 Elementos Sombreadores	48
4.4.1.5 Metodologia Aplicada: Inserção Conjunta da Zona Térmica, Elementos Sombreadores e <i>View Factor Calculation</i>	49
4.5 Dados de Saída Considerados.....	53
4.5.1 Dados de Saída no Arquivo EnergyPlus <i>Input Data File</i> - IDF	54
5 RESULTADOS	57
5.1 Zonas Térmicas	57
5.2 <i>Surface Outside Face Net Surface Thermal Radiation Heat Gain Rate per Area [W/m²]</i>	57
5.2.1 Dia Típico de Verão e Dia Típico de Inverno	63
5.3 Horas em Conforto Térmico ao Longo do Ano: <i>Zone Operative Temperature [°C]</i>	77
6 CONCLUSÃO	81
REFERÊNCIAS	84

1 INTRODUÇÃO

“As cidades do futuro serão projetadas não apenas para abrigar, mas também para proporcionar bem-estar aos seus habitantes” (GIVONI, 1998). Essa perspectiva ganha ainda mais urgência diante do crescimento urbano acelerado e das mudanças climáticas, que têm impactado diretamente o conforto ambiental nas áreas urbanas. Como destacado por Sharif (2023), diretora executiva do ONU-Habitat, “a urbanização tem sido e continuará sendo uma das megatendências mais poderosas do século 21”. As cidades, que atualmente abrigam mais de metade da população mundial, devem concentrar quase 70% da população até 2050 (ONU-HABITAT, 2023), sendo, portanto, o principal palco dos desafios ambientais e sociais do século.

O setor de edificações representa atualmente cerca de 30% do consumo de energia global (AGÊNCIA INTERNACIONAL DE ENERGIA, 2022). No contexto brasileiro, esse número é ainda mais expressivo: segundo o Ministério de Minas e Energia, as edificações são responsáveis por aproximadamente 51% do consumo de energia elétrica do país, considerando os usos residenciais, comerciais e públicos (MME, 2023).

Com o adensamento das cidades e a modificação do ambiente natural, ocorrem alterações significativas no balanço energético urbano, dando origem ao chamado clima urbano. Um dos fenômenos mais estudados nesse contexto é a ilha de calor urbana, caracterizada pelo aumento das temperaturas nos centros urbanos em comparação às áreas rurais (OKE, 1987; SANTAMOURIS, 2006). Dados recentes apontam que mais de dois bilhões de habitantes urbanos podem enfrentar um aumento adicional de temperatura de pelo menos 0,5° C até 2040 (ONU-HABITAT, 2024), reforçando a urgência de intervenções eficazes no ambiente urbano.

Diversos fatores contribuem para esse fenômeno, como o aprisionamento de radiação, a redução da perda de calor por radiação de onda longa devido à diminuição do fator de forma (*view factor*), a elevada capacidade térmica dos materiais utilizados nas superfícies urbanas, a geração de calor antropogênico e a redução da evapotranspiração em razão da escassez de áreas vegetadas (OKE, 1982, p. 1-24; SANTAMOURIS, 2006).

O contexto urbano, quando não devidamente considerado em projetos e análises energéticas, pode comprometer o conforto térmico interno da edificação e

aumentar a demanda por condicionamento artificial. Assim, estudos como os de Bouyer *et al.*, (2011, p. 1549-1559) e Allegrini *et al.*, (2012, p.823-832) evidenciam que simulações convencionais — que ignoram o contexto urbano imediato — podem gerar resultados irreais ou subestimados.

Allegrini *et al.*, (2012, p.823-832) demonstraram que soluções como o uso de pintura branca nas fachadas podem ser eficientes em reduzir a carga térmica, mas essa eficácia é significativamente reduzida quando se considera o entorno urbano. Bouyer *et al.*, (2011, p. 1549-1559), ao acoplar simulações de edificações a modelos urbanos mais realistas, para a cidade de Nantes, França, destacam que a radiação solar é o fator mais determinante no consumo energético, e que a negligência ao entorno leva a distorções nos resultados, pois foi encontrado uma diferença significativa entre consumos energéticos simulados em contexto teórico isolado e simulados em ambiente urbano.

Diante disso, busca-se uma metodologia capaz de integrar o entorno urbano e as trocas de calor da edificação, para estimativa do conforto térmico e do desempenho termoenergético de edificações, considerando principalmente o efeito de radiação de onda longa, usualmente desconsiderado no modelo de cálculo convencional do EnergyPlus.

Ao integrar a escala do espaço urbano à simulação térmica da edificação, a metodologia proposta contribui para uma abordagem mais realista e precisa da análise de desempenho ambiental, fornecendo subsídios tanto para projetos mais eficientes quanto para legislações municipais. Conforme destacou Guterres (2022)¹, “as cidades são onde a batalha climática será amplamente vencida ou perdida”, e cabe à arquitetura e ao urbanismo fornecer ferramentas e soluções para enfrentar esse desafio.

Ressalta-se que esta pesquisa representa uma contribuição inédita no cenário nacional, uma vez que, até o momento, não foram identificados estudos que empreguem exclusivamente o EnergyPlus para análise do desempenho termoenergético de edificações residenciais multifamiliares representadas por arquétipos aplicados ao contexto urbano brasileiro. A originalidade do estudo reside na modelagem integrada do arquétipo e do entorno urbano imediato diretamente no

¹ Documento original não possui página.

EnergyPlus, o que permite a consideração de variáveis urbanas específicas dentro do próprio ambiente de simulação. Esse enfoque amplia significativamente sua relevância técnica e científica.

2 OBJETIVO

2.1 Objetivo Geral

O objetivo desta monografia é desenvolver uma metodologia para análise do conforto térmico e do desempenho termoenergético de edificações residenciais, considerando a influência do entorno urbano no ambiente construído, utilizando o EnergyPlus versão 24.1.0 como ferramenta de simulação.

A pesquisa busca responder às seguintes questões:

1. Como a presença de edificações vizinhas influenciam as trocas térmicas em um edifício residencial?
2. Qual é a importância de modelar corretamente as condições locais para obter previsões energéticas mais realistas?
3. Como o EnergyPlus pode ser explorado como ferramenta para aprimorar a modelagem termoenergética de edificações em contextos urbanos distintos?

2.2 Objetivos Específicos

1. Elaborar um modelo digital simplificado de edificação multifamiliar em cenário urbano adensado e com presença de obstáculos urbanos.
2. Simular o comportamento térmico e energético do modelo criado, considerando diferentes condições de radiação solar, sombreamento e trocas térmicas com o entorno.
3. Comparar os resultados das simulações quanto à carga térmica externa e variáveis de conforto térmico, identificando os impactos do contexto urbano.
4. Validar a aplicabilidade da metodologia proposta para futuros estudos em áreas urbanas com diferentes morfologias.

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 Conforto Térmico e Desempenho Energético

O conforto térmico é um estado subjetivo de bem-estar que resulta da percepção do ambiente térmico pelo ocupante de uma edificação. A percepção térmica é influenciada por fatores como temperatura do ar, umidade relativa, velocidade do ar, radiação térmica e características individuais dos ocupantes, como vestimenta e nível de atividade física (ASHRAE, 2017). A definição de conforto térmico envolve, portanto, a interação de parâmetros ambientais internos e externos à edificação, além de aspectos relacionados ao comportamento humano.

O estudo da climatologia também abrange o conceito de microclima, que se refere ao ambiente térmico local e suas variações espaciais e temporais, influenciadas por fatores como urbanização, vegetação, topografia e características construtivas dos edifícios (GIVONI, 1998). Em áreas urbanas, o efeito de ilha de calor urbano é um fenômeno relevante que impacta o conforto térmico, aumentando as temperaturas locais devido à concentração de construções, asfaltos e outras superfícies que absorvem calor.

O desempenho energético eficiente de uma edificação refere-se à sua capacidade de prover condições adequadas de conforto térmico, lumínico e de ventilação aos ocupantes com o menor consumo possível de energia. A avaliação desse desempenho envolve a análise da demanda energética para aquecimento, resfriamento, iluminação e outros sistemas de suporte ao ambiente interno. De acordo com a Empresa de Pesquisa Energética (EPE, 2023), os padrões de consumo de energia nas residências brasileiras variam substancialmente conforme a classe de renda, refletindo não apenas o acesso diferenciado a equipamentos como também distintas expectativas de conforto. Famílias de renda mais alta concentram maior consumo em sistemas de climatização e eletrodomésticos, enquanto as de renda mais baixa mantêm seu consumo predominantemente atrelado à iluminação e à refrigeração básica. Esses dados evidenciam que a análise do desempenho energético de edificações deve considerar, além de variáveis construtivas — como materiais, orientação solar e estratégias passivas de ventilação —, o perfil socioeconômico dos usuários.

A interação entre conforto térmico e desempenho energético é central para o projeto de edificações eficientes e sustentáveis. A implementação de estratégias que promovam o conforto térmico de forma passiva reduz a demanda energética da edificação. O desempenho energético de uma edificação não pode ser dissociado das condições de conforto térmico, uma vez que construções com baixo conforto exigem maior consumo de energia para manter condições ambientais adequadas, gerando um ciclo de consumo elevado e impacto ambiental. Em contrapartida, estratégias de *design* passivo — como o uso de materiais com maior capacidade térmica, a ventilação cruzada, a proteção solar adequada e a maximização da luz natural — contribuem para a redução da demanda energética e para a criação de ambientes mais saudáveis e confortáveis (OLGYAY, *et al.*, 1962). No entanto, é fundamental considerar que essas estratégias não operam isoladamente: o entorno urbano exerce forte influência no microclima local, afetando diretamente o desempenho térmico das edificações. Características como densidade construtiva, vegetação, materiais predominantes nas vias e a presença de ilhas de calor podem potencializar ou comprometer a eficácia de soluções projetuais passivas. Estudos demonstram que o entorno urbano pode influenciar significativamente as temperaturas internas das edificações, com variações de até 3,3 °C no inverno, além de aumentar o consumo energético para refrigeração em até 23% em determinados meses (CANDIDO, 2020). Assim, a eficiência energética deve ser analisada em interação com o contexto urbano em que a edificação está inserida, reforçando a necessidade de abordagens integradas entre arquitetura e planejamento urbano.

3.2 Ilhas de Calor Urbanas

As Ilhas de Calor Urbanas (ICU) são fenômenos caracterizados por temperaturas mais altas em áreas adensadas em relação às regiões rurais de seu entorno. Em um contexto urbano, materiais como asfalto, concreto e cobertura de telhados possuem alta capacidade de acumular calor durante o dia e liberá-lo gradualmente à noite. Além disso, a redução da cobertura vegetal e o aporte constante de calor gerado pelo tráfego de veículos, indústrias e sistemas de ar-condicionado fazem com que as cidades atuem como verdadeiros “depósitos térmicos” (OKE, 1982, p.1-24; SANTAMOURIS, 2015, p.582-598).

Um dos principais mecanismos físicos por trás desse acúmulo e retenção de calor é a radiação de onda longa (ou radiação infravermelha). Durante o dia, a superfície dos materiais urbanos absorve predominantemente radiação solar de onda curta (visível e ultravioleta). Quando a intensidade da luz solar diminui, essas superfícies passam a emitir radiação de onda longa, liberando o calor acumulado. Porém, em ambientes urbanos densos, essa radiação infravermelha emitida por uma edificação pode ser parcialmente absorvida ou refletida de volta por fachadas vizinhas, pavimentos, sem sequer escapar diretamente para o céu noturno. Esse processo atrasa o resfriamento das fachadas e do ar adjacente, mantendo as temperaturas mais elevadas do que em áreas abertas, onde a radiação de onda longa escapa livremente para a atmosfera (EMMANUEL, 2005). Em outras palavras, a geometria urbana — ruas estreitas, prédios altos e superfícies extensas — cria um efeito de acumulador radiativo, impedindo que o calor saia rapidamente (MILLS, 1999).

As estações do ano interferem diretamente em como as ICU se manifestam, alterando a intensidade do fenômeno conforme variam a radiação solar incidente e as condições climáticas gerais. Durante o período de verão, período em que as Ilhas de Calor Urbanas tendem a ser mais evidentes, a intensidade da radiação solar de onda curta é alta, fazendo com que as superfícies asfaltadas e edificações armazenem grande quantidade de energia térmica. À medida que a tarde avança, a liberação de radiação de onda longa é intensa, mas a configuração de “*canyons* urbanos” faz com que esse calor seja retido próximo ao solo. As noites permanecem quentes, muitas vezes vários graus acima das áreas rurais, aumentando a demanda por ar-condicionado e contribuindo para picos de consumo energético (ROSENFELD *et al.*, 1995, p.255-265; SANTAMOURIS, 2014, p.100-113). Já no outono e primavera, períodos de transição, a radiação solar diminui em comparação ao verão, mas ainda é suficiente para aquecer as superfícies urbanas durante o dia. O acúmulo de calor é moderado, e a liberação de radiação de onda longa tende a manter as noites ligeiramente mais quentes nos centros urbanos, embora a diferença em relação à zona rural seja menor do que no auge do verão. Em dias mais nublados ou chuvosos, o resfriamento noturno é mais eficiente, amenizando o efeito de ilha de calor (GARTLAND, 2010). Por fim, no inverno, ainda que a intensidade solar seja reduzida, as superfícies urbanas continuam a absorver o que chega de radiação de onda curta. Durante o dia, o aquecimento é menos intenso, mas, à noite, o calor retido pelos

materiais é liberado em forma de radiação de onda longa, retardando o resfriamento. Como resultado, as madrugadas em áreas adensadas podem ser de 1 a 3 °C mais quentes do que no campo ou em bairros de baixa densidade. Esse fenômeno reduz a sensação de frio noturno. Porém, quando surgem dias de sol no inverno, as fachadas e calçadas, ao partirem de uma temperatura inicial mais elevada, aquecem mais rapidamente, promovendo desconforto térmico matinal e demanda por ventilação natural antes do meio-dia (OKE, 1987).

Em suma, as Ilhas de Calor Urbanas surgem da combinação entre materiais urbanos de elevada retenção térmica, aporte antropogênico de calor e geometria das ruas e edifícios que restringe a emissão de radiação de onda longa. As estações do ano modulam a intensidade desse fenômeno: no verão, o acúmulo e a retenção de calor são máximos, enquanto no inverno a diferença de temperatura é menos pronunciada, mas ainda suficiente para alterar o microclima local, reduzindo picos de frio noturno e antecipando picos de insolação diurna. Compreender essas interações é fundamental para planejar estratégias de mitigação — como arborização, escolha de materiais de alta refletância e posicionamento adequado de aberturas — de modo a minimizar o impacto das ICU no conforto térmico e no consumo de energia (GARTLAND, 2010; SANTAMOURIS, 2015, p.582-598).

3.3 O Impacto dos Parâmetros do Local

Diversos estudos investigam o impacto dos parâmetros urbanos locais — como vegetação, materiais urbanos e edificações adjacentes — sobre o desempenho térmico das construções, utilizando tanto medições de campo quanto simulações computacionais. Lima (2018) analisou edifícios de escritórios em Maceió - Alagoas e constatou que a consideração das alterações proporcionadas pelo entorno urbano nas simulações (variáveis climáticas, geometria e aproveitamento de luz natural) resultou em redução de 16% a 18% na carga de resfriamento em cenários urbanos homogêneos, em comparação a cenários sem entorno. Das modificações isoladas, a geométrica apresentou o maior impacto, com diminuição média de 20% na carga térmica anual, seguida pela redução de 4,5% decorrente do aproveitamento de luz natural; por outro lado, as alterações climáticas implicaram em aumento médio de 3%. Na análise detalhada da geometria, o sombreamento proporcionado pelo entorno

urbano foi responsável por 14% a 16% de redução na carga térmica, enquanto a reflexão solar contribuiu com 3% a 4% (LIMA, 2018). Em contexto diferente, Luo *et al.* (2020) integraram o ENVI-met ao EnergyPlus para contabilizar as trocas de radiação de onda longa entre superfícies externas em um distrito urbano em Chicago, os resultados apontaram aumento de 19% na carga de resfriamento e redução de 18% na demanda de aquecimento de edifícios individuais, enquanto, ao avaliar o conjunto do distrito, verificou-se decréscimo de 0,45% na demanda de aquecimento e acréscimo de 1,39% no consumo para resfriamento. Esse estudo ressaltou que a radiação de onda longa pode elevar em até 10 °C a temperatura de determinadas fachadas, interferindo diretamente nas curvas de carga térmica. Ainda propuseram um algoritmo para cálculo de fatores de vista no EnergyPlus, a fim de quantificar especificamente as trocas de radiação de onda longa entre edifícios em diferentes alturas e orientações; os autores verificaram que esse fenômeno provocou variações de 0,1% a 3,3% no consumo anual de energia para resfriamento e de 0,3% a 3,6% na energia de aquecimento. Em Wuhan, China, Pei *et al.* (2021) acoplaram o ENVI-met ao COMFIE (ferramenta de simulação energética semelhante ao EnergyPlus) para gerar arquivos climáticos locais que consideram os efeitos da ilha de calor urbano e a variação térmica vertical; as simulações comparativas revelaram superestimação de 5,8% na carga de aquecimento e subestimação de 8,7% na carga de resfriamento quando as condições microclimáticas locais foram ignoradas, bem como diferenças de até 8,2% na energia de aquecimento e 10,8% na de resfriamento ao utilizar perfis de temperatura a 3 m de altura. Esses resultados confirmam que o entorno urbano, incluindo a radiação de onda longa emitida por superfícies aquecidas, exerce influência quantitativamente significativa no consumo de energia das edificações (PEI *et al.*, 2021).

Além desses efeitos diretos, outros estudos têm se concentrado na influência da vegetação e da configuração urbana sobre o microclima local, por meio de ferramentas de simulação ambiental. Modelos como o ENVI-met vêm sendo utilizados para representar o papel de gramados, árvores e superfícies urbanas nas condições térmicas externas. No entanto, grande parte desses estudos limita-se à análise do conforto térmico ao ar livre, sem avaliar diretamente o impacto dessas alterações microclimáticas no consumo energético das edificações. Morakinyo *et al.* (2016), por exemplo, integraram os *softwares* ENVI-met e EnergyPlus para simular os efeitos do

sombreamento arbóreo nas temperaturas internas e externas, evidenciando melhorias no conforto térmico, mas sem realizar a quantificação energética completa. Isso reforça a necessidade de estudos que articulem o microclima urbano com o desempenho energético das edificações de forma mais integrada e quantificável.

Embora muitos estudos abordem os efeitos da forma urbana sobre o conforto térmico externo, ainda há lacunas significativas na compreensão de como esses fatores impactam diretamente o consumo energético das edificações. Explorar essas interações por meio da integração entre *softwares* de simulação microclimática e *Building Energy Simulation* (BES), como o EnergyPlus, representa uma oportunidade promissora para o avanço das análises termoenergéticas em ambientes urbanos.

3.3.1 Nível Climático no Local

Os dados mais precisos sobre as condições microclimáticas podem ser obtidos por meio da instalação de uma estação meteorológica no local. No entanto, isso é incomum, pois exige muito esforço e leva um longo tempo para registrar dados completos de todas as estações do ano. Por isso, é mais comum coletar informações sobre o clima em escala mais ampla e observar as características específicas do local, como topografia e elementos paisagísticos.

Bailey (2005) divide as condições climáticas do local em três níveis: macroclima, mesoclima e microclima. De forma geral, o macroclima refere-se às condições climáticas típicas de uma grande região. Ele é influenciado pela latitude (distância do equador), altitude (elevação em relação ao nível do mar) e situação geográfica ao redor. As informações macroclimáticas são baseadas em indicadores fornecidos por estações meteorológicas, como temperatura, umidade, movimento e pressão do ar, além da radiação e duração da exposição solar. Em uma área menor dentro da região, as condições macroclimáticas gerais podem sofrer alterações devido às características físicas do entorno imediato. Essas mudanças no clima são chamadas de mesoclima. O mesoclima é influenciado por elementos locais, como grandes obstáculos geométricos, vegetação em larga escala, corpos d'água e cobertura do solo. Com base nas características físicas, o mesoclima pode ser classificado em várias regiões: áreas costeiras, campos abertos, florestas, vales, cidades e áreas montanhosas (GOULDING *et al.*, 1993). O terceiro nível é o

microclima, que se refere às condições específicas do local e do seu ambiente imediato. O microclima é fortemente determinado pelos elementos paisagísticos e pelo ambiente construído. Por exemplo, árvores plantadas e edifícios vizinhos podem influenciar a incidência de sol e vento no local.

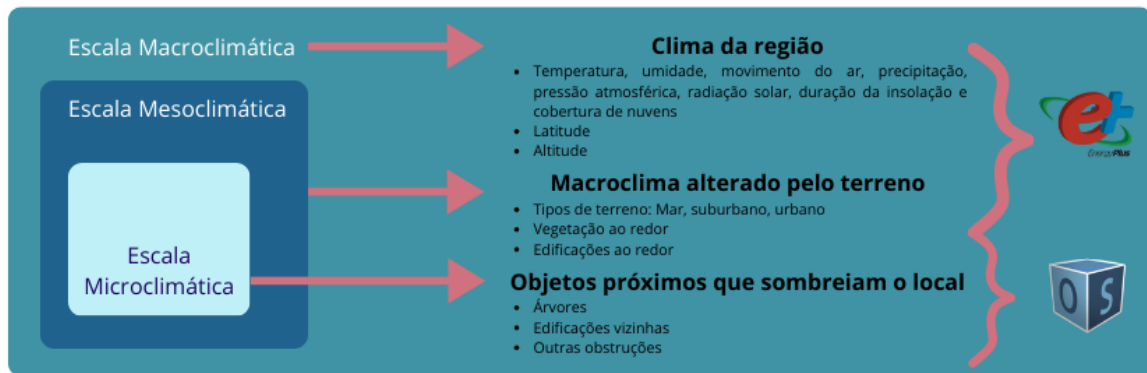


Figura 01 - Exemplificação de condição climática no local e softwares responsável pela modelagem.

Fonte: Sunarya (2020), modificado pela autora.

3.3.2 Elementos Climáticos que Afetam o Consumo de Energia

As condições térmicas internas são determinadas pelos fluxos de calor no edifício. Esses fluxos são principalmente causados por:

- A transferência de calor através dos invólucros do edifício (**Qt**);
- A troca de ar por ventilação e infiltração (**Qv**);
- O ganho de calor interno gerado por ocupantes e aparelhos domésticos (**Qi**);
- O ganho de calor solar devido à radiação solar (**Qs**).

O consumo de energia para resfriamento ou aquecimento (**ΔQ**) é determinado pela soma de todos esses fluxos de energia, que devem ser fornecidos ou extraídos do edifício para manter um clima interno confortável. Dessa forma, os elementos climáticos — sol, vento, temperatura do ar e umidade — atuam diretamente sobre esses quatro fluxos, modificando os padrões de ganho e perda térmica em cada estação do ano.

Em períodos de frio (inverno):

Qt: O calor sai da casa para o ambiente externo mais frio, ou seja, é uma perda de calor.

Qv: O ar frio entra e esfria o interior, também se caracteriza por uma perda de calor.

Qi: Calor gerado por pessoas e aparelhos ajudam a aquecer o ambiente, é positivo nesse caso.

Qs: A radiação solar aquece o ambiente, o que é benéfico no frio.

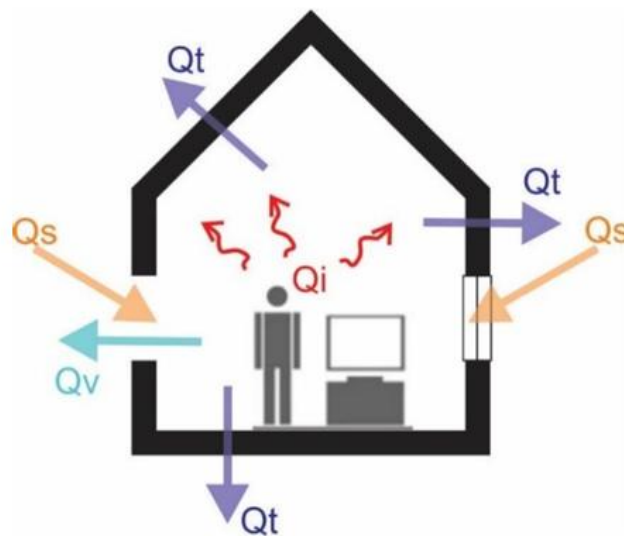


Figura 02 - Elementos climáticos que afetam o consumo de energia da casa, períodos frios

Fonte: Sunarya (2020).

Em períodos quentes (verão):

Qt: O calor externo pode entrar na casa através das paredes e telhados, tendo assim um ganho de calor indesejado.

Qv: Ventilação pode ajudar a remover calor interno, então pode ser positivo, mas o ar externo pode estar mais quente, o que pode ser negativo (variável).

Qi: Calor gerado internamente agrava o desconforto térmico, é um ganho de calor indesejado.

Qs: Radiação solar intensa aquece ainda mais o interior sendo um dos principais fatores de aquecimento em regiões como Belo Horizonte.

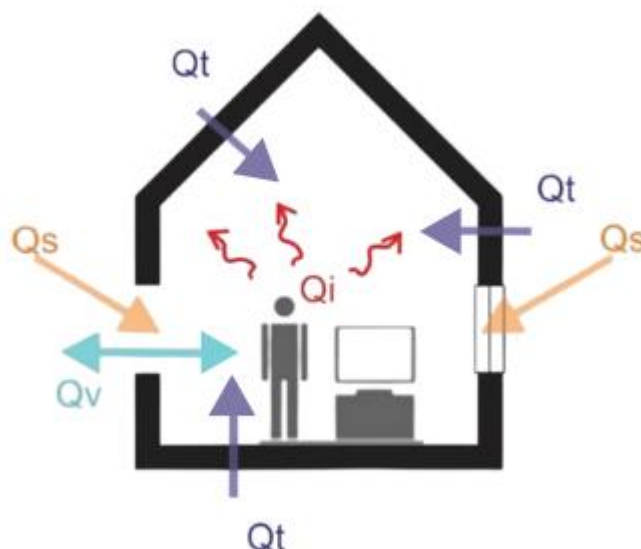


Figura 03 - Elementos climáticos que afetam o consumo de energia da casa, períodos quentes.

Fonte: Sunarya (2020), modificado pela autora.

Ainda, o entorno urbano modifica diretamente cada um dos fluxos de calor descritos, como evidenciado na literatura:

Qt: O sombreamento causado por edifícios adjacentes e vegetação reduz a irradiância incidente sobre fachadas e coberturas, diminuindo a condução de calor para dentro do ambiente. Por outro lado, a radiação de onda longa emitida por superfícies urbanas aquecidas pode aumentar o ganho térmico das fachadas internas dos edifícios. Oke (1988) demonstra que, em centros urbanos densos, a radiação de onda longa proveniente de fachadas vizinhas pode elevar em até 8 °C a temperatura superficial das paredes, afetando significativamente as trocas condutivas.

Qv: A configuração de quarteirões, altura de edifícios e largura de vias altera o padrão de vento local. Áreas densas criam corredores de vento que podem acelerar ou inibir o fluxo de ar natural. Kruger *et al.* (2011) observaram que, em malhas urbanas típicas, a velocidade do vento pode ser reduzida em até 50% em relação a áreas abertas, reduzindo as trocas convectivas e aumentando a inércia térmica interna.

Qi: Embora os ganhos internos provenham de ocupantes e equipamentos, a temperatura externa elevada — resultante do entorno urbano — faz com que aparelhos como refrigeradores e ar-condicionado operem com menor coeficiente de performance (COP), gerando maior calor residual dentro do ambiente. Santamouris (2013) relata que, em dias de ilha de calor urbano, o aumento de 2°C na temperatura

externa pode elevar em até 5% o calor dissipado por aparelhos elétricos comuns, repercutindo no ganho interno equivalente.

Qs: A presença de vegetação e de superfícies refletivas ou absorventes modifica a incidência direta e difusa da radiação solar. Segundo Ali-Toudert e Mayer (2007), o sombreamento proporcionado por árvores em *canyons* urbanos pode reduzir em até 60% a irradiância solar direta sobre fachadas verticais, enquanto superfícies pavimentadas claras podem refletir radiação que incide sobre prédios vizinhos, aumentando o ganho solar indireto.

Assim, considerar o entorno urbano é imprescindível para estimar com precisão todos os termos de transferência de calor — Q_t , Q_v , Q_i e Q_s — e, conseqüentemente, o consumo energético das habitações.

3.4 EnergyPlus

O uso de ferramentas computacionais de simulação termoenergética permite prever o desempenho de edificações em diferentes cenários climáticos e urbanos, fornecendo suporte técnico essencial ao processo de projeto (CRAWLEY *et al.*, 2001). O EnergyPlus, desenvolvido pelo U.S. *Department of Energy* (DOE), é atualmente uma das ferramentas mais reconhecidas para esse fim, possibilitando análises robustas e detalhadas do comportamento térmico e energético de edificações.

O EnergyPlus foi lançado em 2001 como sucessor dos programas BLAST (*Building Loads Analysis and System Thermodynamics*) e DOE-2, incorporando melhorias substanciais na modelagem térmica (CRAWLEY *et al.*, 2001). O *software* permite a análise detalhada de vários aspectos de desempenho térmico e energético, incluindo: cálculo da troca de calor entre superfícies internas e externas, influência da radiação solar e impactos das cargas internas (equipamentos e ocupantes); simulação de diferentes sistemas de aquecimento, ventilação e ar-condicionado, considerando estratégias de controle e eficiência energética; modelagem da interação entre o ambiente externo e interno; consideração do sombreamento causado por edifícios vizinhos e obstruções urbanas; análise do consumo de energia, permitindo avaliações anuais, mensais e horárias; cálculo dos índices PMV (*Predicted Mean Vote*) e PPD (*Predicted Percentage of Dissatisfied*), com base em normas como ASHRAE 55 e ISO 7730.

Embora o EnergyPlus seja amplamente reconhecido como uma ferramenta robusta para a simulação termoenergética de edificações, ele apresenta limitações significativas na representação do entorno urbano. O *software* considera simplificada os elementos externos à edificação, como a introdução de obstáculos para sombreamento à radiação solar ou o uso de parâmetros genéricos (ATTIA *et al.*, 2013). Além disso, o programa calcula exclusivamente a radiação solar de onda curta incidente sobre fachadas e coberturas — incluindo sombreamento causado por obstáculos definidos pelo usuário e o uso de parâmetros genéricos, como o fator de forma —, mas não o cômputo da radiação de onda longa nas simulações (ENERGYPLUS DEVELOPMENT TEAM, 2023, p. 6-11). Dessa forma, em contextos urbanos densos, onde a radiação de onda longa emitida por fachadas vizinhas e superfícies pavimentadas aquecidas pode elevar significativamente a temperatura externa efetiva, as simulações de EnergyPlus subestimam ou deixam de representar adequadamente ganhos e perdas térmicas. Conseqüentemente, aspectos como morfologia urbana, orientação das edificações adjacentes, materiais predominantes no entorno e características microclimáticas somente podem ser incluídos de forma aproximada, limitando a precisão das estimativas de consumo energético em áreas com alta densidade construtiva (ENERGYPLUS DEVELOPMENT TEAM, 2023, p. 6-11).

Segundo Reinhart e Dávila (2016), a modelagem energética urbana é um campo emergente justamente pela necessidade de superar essas simplificações e integrar de forma mais realista os efeitos do ambiente urbano nas análises energéticas. Os autores destacam que, apesar do avanço de ferramentas como o EnergyPlus e sua integração com plataformas de modelagem 3D como SketchUp, OpenStudio e DesignBuilder, a representação precisa do meio urbano ainda é um desafio técnico e metodológico.

Dessa forma, o presente trabalho propõe-se a enfrentar essa lacuna, buscando aplicar uma metodologia que possibilite ao EnergyPlus considerar adequadamente as variáveis urbanas relevantes, a fim de aprimorar a análise do conforto térmico e do consumo energético em edificações inseridas em diferentes contextos urbanos.

3.4.1 Microclima no Cálculo do EnergyPlus

A partir das referências de engenharia do *software* EnergyPlus e da revisão do estudo de Yang *et al.* (2012), é possível compreender a lógica do balanço de energia aplicado em uma zona térmica simulada. O programa utiliza um modelo baseado na equação de conservação de energia, considerando múltiplas fontes de trocas térmicas para determinar as cargas necessárias ao equilíbrio térmico da edificação. A equação abaixo representa uma forma simplificada desse balanço, contemplando os principais fluxos de calor sensível:

$$\mathbf{Qloads = Qint \pm Qconv,int \pm Qinf \pm Eair}$$

Onde:

Qloads = Cargas térmicas de aquecimento/resfriamento do edifício;

Qint = Ganhos de calor internos de iluminação, ocupantes e equipamentos;

Qconv, int = Transferência de calor convectivo entre superfícies internas da zona e o ar da zona;

Qinf = Transferência de calor devido à infiltração de ar externo;

Eair = Mudança na energia armazenada no ar da zona.

Além do balanço de energia das zonas internas, o EnergyPlus também considera o balanço de energia nas superfícies externas da edificação. Esse cálculo é essencial para determinar a quantidade de calor que entra ou sai do edifício através de suas envoltórias. A equação abaixo representa o balanço energético simplificado para uma superfície externa, como uma parede, cobertura ou janela:

$$\mathbf{Qsol \pm Qlw \pm Qconv \pm Qcond = 0}$$

Onde:

Qsol = Radiação solar absorvida (direta e difusa);

Qlw = Trocas por radiação de onda longa com o ambiente (céu, solo e superfícies próximas);

Qconv = Trocas de calor por convecção com o ar externo (natural ou forçada);

Qcond = Fluxo de calor que atravessa o material da superfície por condução em direção ao interior da edificação.

Com base nessas equações, pode-se concluir que o **microclima local** afeta os cálculos de energia no EnergyPlus por meio de vários fatores expressos na Tabela 01.

Tabela 01 - Relação entre os fatores que influenciam o consumo de energia no EnergyPlus, os elementos climáticos do microclima e os parâmetros do local.

Fator no EnergyPlus	Elemento Climático Influyente	Parâmetros do Entorno Urbano Influentes
Radiação Solar	Posição do sol	Relevo, vegetação e edificações vizinhas
Fluxo de Calor Convectivo	Velocidade do vento e temperatura do ar	Altitude, tipo de terreno, vegetação e obstruções urbanas
Radiação de Onda Longa	Temperatura do ar, nuvens, composição da atmosfera	Altitude, tipo de superfície (material e inclinação), vegetação, edificações
Infiltração de Ar	Vento, temperatura e umidade do ar	Topografia, vegetação, presença de edificações no entorno e qualidade das esquadrias

Fonte: Elaboração da autora com base em dados do EnergyPlus, 2025.

3.4.1.2 Microclima Influenciado pelas Zonas Térmicas do Entorno Urbano

Para aprimorar a representação do entorno urbano no EnergyPlus, o estudo de Pereira *et al.* (2021) avalia a influência da refletância do entorno urbano no balanço de radiação e na carga térmica de edificações, utilizando para isso simulações realizadas no EnergyPlus, versão 9.3.0. A fim de modelar as trocas de radiação de onda longa entre a edificação e o entorno, foi necessário estimar as temperaturas superficiais externas das edificações vizinhas. Para isso, os autores simularam previamente essas edificações como zonas térmicas com características construtivas semelhantes às da edificação principal. As saídas dessas simulações forneceram a variável *Surface Outside Face Temperature*, utilizada como entrada na modelagem das interações radiativas (PEREIRA *et al.*, 2021).

Além disso, os autores calcularam os fatores de forma, ou fatores de visão, entre as superfícies das zonas térmicas, utilizando a ferramenta *VIEW3D*, disponibilizada pelo EnergyPlus. Essa ferramenta calcula geometricamente o percentual de visada entre superfícies, considerando a configuração espacial do modelo tridimensional. Essas informações foram inseridas no arquivo de entrada do EnergyPlus por meio dos objetos *SurfaceProperty:SurroundingSurfaces* e *SurfaceProperty:LocalEnvironment*, configurando o microclima local para cada zona térmica (PEREIRA *et al.*, 2021).

Dessa forma, o EnergyPlus pôde simular as trocas radiativas de onda longa entre a edificação e seu entorno urbano, permitindo que as temperaturas superficiais e fatores de visão influenciassem diretamente o balanço térmico das superfícies externas. Essa metodologia evidencia que o detalhamento do entorno, por meio da modelagem das zonas térmicas vizinhas e da incorporação das interações radiativas locais, é fundamental para obter simulações mais realistas, especialmente em contextos urbanos adensados (PEREIRA *et al.*, 2021).

Assim, a aplicação deste procedimento, incorporado ao presente trabalho, possibilita uma análise mais acurada do impacto do entorno urbano no conforto térmico.

Cabe destacar que, embora o tema de simulação termoenergética tenha ganhado novos desdobramentos nos últimos anos, ainda são escassas as publicações recentes que abordem com profundidade a influência do entorno urbano em edificações residenciais, especialmente com foco no uso do EnergyPlus para modelagens integradas. Assim, algumas das referências utilizadas neste trabalho são mais antigas, mas permanecem fundamentais por representarem marcos conceituais e metodológicos na área. A ausência de literatura atualizada reforça, por outro lado, a urgência e pertinência de estudos como o presente, que buscam avançar na compreensão dos efeitos microclimáticos urbanos no desempenho térmico das edificações.

4 METODOLOGIA

Para avaliar o impacto do entorno urbano no conforto térmico e desempenho energético de edificações residenciais, foi elaborado um modelo representando o cânion urbano adensado. As simulações foram realizadas pelo *software* EnergyPlus versão 24.1.0 para a cidade de Belo Horizonte, Minas Gerais – Brasil, localizada a uma latitude de -19.92° e longitude $-43,94^\circ$, com altitude média de 852 metros acima do nível do mar tendo seu clima² classificado como Aw (clima tropical com estação seca).

Para validar a metodologia que considera a radiação térmica nas simulações realizadas no EnergyPlus, foram conduzidas três simulações, das quais duas são consideradas cruciais: (i) considerando a modelagem padrão de elementos sombreadores para representação do entorno urbano existente, modelo este que considera apenas a radiação de onda curta em seus cálculos; e (ii) a modelagem com dados de entrada para a caracterização da radiação de onda longa existente no entorno e seu cômputo nos cálculos do programa. A primeira simulação será utilizada como referência a ser comparada com a segunda simulação, de forma a avaliar se o programa apresentou sensibilidade à radiação de onda longa.

As características e os parâmetros de simulação são apresentados nesta seção.

4.1 Descrição Modelo do Cânion Urbano e das Edificações de Análise

A escolha do cânion urbano como modelo de entorno foi feita para maximizar a influência desses ambientes sobre os resultados da simulação. Com base no estudo de Ferreira (2024), em função da disponibilidade de informações para a cidade de

² O clima de Belo Horizonte já foi frequentemente classificado como Cwa (clima subtropical úmido com inverno seco, segundo Köppen-Geiger) devido à sua altitude e ao fato de apresentar temperaturas mais amenas no inverno. No entanto, a classificação mais aceita atualmente é Aw (clima tropical com estação seca), porque a temperatura média do mês mais frio fica acima de 18°C , o que a enquadra na faixa tropical. Contudo, Belo Horizonte está em uma zona de transição climática, o que pode levar alguns pesquisadores a argumentarem que a cidade apresenta características tanto do Cwa quanto do Aw, dependendo da área específica analisada e das variações climáticas ao longo dos anos.

Belo Horizonte – Minas Gerais, optou-se por trabalhar com altura das edificações, indicada pelo número de pavimentos, e a tipologia multifamiliar, com o intuito de representar respectivamente a largura e a densidade das construções.

As Figuras 04 e 05 apresentam a tipologia de uso e ocupação de lotes para a cidade de Belo Horizonte para os anos de 2011 e 2022, abrangendo assim o período de interesse da pesquisa. Pelas Figuras pode-se perceber a predominância da tipologia unifamiliar (indicado em verde claro nos mapas) no território da cidade (FERREIRA, 2024).

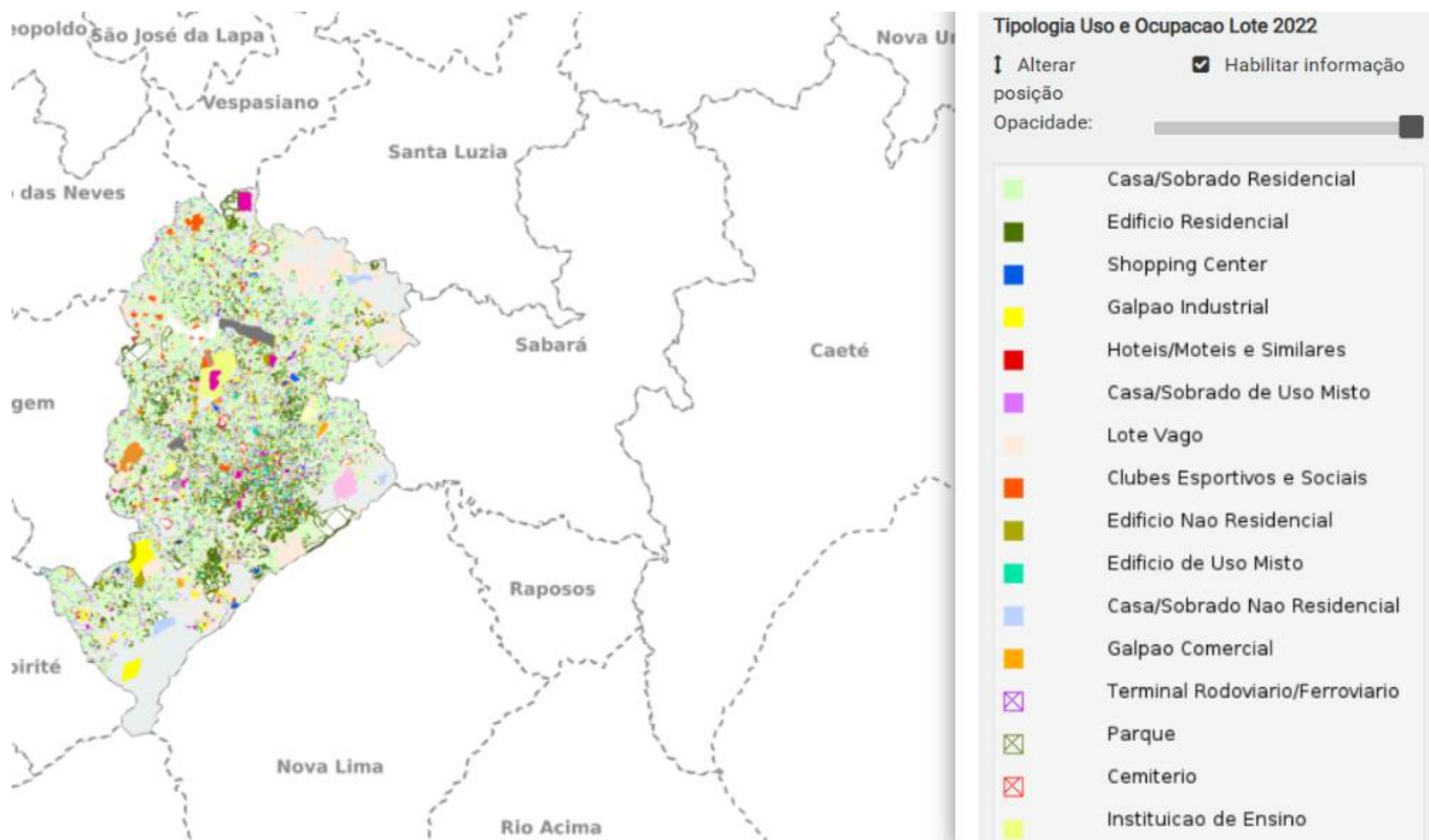


Figura 05 - Tipologia de uso e ocupação dos lotes para Belo Horizonte no ano de 2022.

Fonte: BH Maps (bhmap.pbh.gov.br)

Em relação às tipologias de uso e ocupação dos lotes de Belo Horizonte em 2022 (conforme ilustrado na Figura 05), as principais tipologias residenciais identificadas são: casa/sobrado de uso exclusivamente residencial (cor verde claro), casa/sobrado de uso misto (representada pela cor lilás), edifício de uso misto (cor ciano) e edifício exclusivamente residencial (cor verde musgo).

Observa-se que as edificações residenciais multifamiliares — tanto de uso exclusivamente residencial quanto misto — concentram-se predominantemente na área central da cidade, especialmente no interior da Avenida do Contorno e em seu entorno imediato. Outro ponto de destaque é o bairro Buritis, localizado na porção oeste de Belo Horizonte MG, que também apresenta alta densidade de edifícios multifamiliares, consolidando-se como uma das principais áreas de verticalização fora da região central.

4.1.1 Definição de Metodologia para a Identificação de Áreas Amostrais com Características Urbanas Distintas

Ferreira (2024) propôs uma metodologia de classificação do tecido urbano capaz de representar adequadamente a diversidade urbana de Belo Horizonte - MG. A proposta baseou-se na análise de dados estatísticos e morfológicos, considerando critérios como densidade, tipologia construtiva, uso predominante e renda da população residente. Essa abordagem possibilitou a identificação de bairros com perfis urbanos representativos da cidade, os quais foram utilizados como referência para a aplicação do programa computacional EnergyPlus (FERREIRA, 2024).

A análise do tecido urbano realizada por Ferreira (2024) foi com base na coleta de dados sobre os bairros de Belo Horizonte, considerando aspectos como a população, quantidade de domicílios e o uso residencial dos lotes, seja unifamiliar ou multifamiliar. Além disso, foi examinada a morfologia das edificações, classificando-as em categorias conforme sua altura e disposição, incluindo edificações isoladas ou em conjuntos de até 4 pavimentos, de 5 a 8 pavimentos e acima de 8 pavimentos, além de galpões e lotes vagos. As informações utilizadas foram disponibilizadas pela Prefeitura Municipal de Belo Horizonte (FERREIRA, 2024).

A fim de classificar o tecido urbano com base no adensamento, aplicou-se um tratamento estatístico aos dados utilizando percentis, método que segmenta a

amostra em partes de distribuição semelhante. Foram empregados os percentis 10 (muito baixo), 25 (baixo), 50 (médio), 75 (alto) e 90 (muito alto). Os resultados dessa análise estão apresentados na Tabela 02 (FERREIRA, 2024).

Tabela 02 - Tratamento estatístico dos dados para caracterização do tecido urbano

Estatística	Uso residencial do lote		Morfologia		
	Unifamiliar	Multifamiliar	Edif. até 4 pavtos	Edif. de 5 a 8 pavtos	Edif. acima de 8 pavtos
Percentil 10	0,46%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%
Percentil 25	6,75%	0,00%	42,63%	0,00%	0,00%
Percentil 50	30,01%	0,43%	60,47%	0,56%	0,00%
Percentil 75	62,49%	2,41%	69,98%	1,82%	0,00%
Percentil 90	73,81%	10,73%	80,72%	8,42%	1,25%
Mínimo	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%
Máximo	73,81%	10,73%	97,56%	33,33%	40,00%

Fonte: Ferreira, 2024.

Ao final das análises estatísticas, foram estabelecidos os limites a serem aplicados nos dados, conforme é exibido na Tabela 03.

Tabela 03 - Tratamento estatístico dos dados para caracterização do tecido urbano.

Classificação	Uso residencial do lote		Morfologia		
	Unifamiliar	Multifamiliar	Edif. até 4 pavtos	Edif. de 5 a 8 pavtos	Edif. acima de 8 pavtos
Muito baixo	0,50%	0,50%	15,00%	1,00%	1,00%
Baixo	5,00%	10,00%	30,00%	5,00%	5,00%
Intermediário	30,00%	30,00%	40,00%	15,00%	10,00%
Alto	60,00%	45,00%	50,00%	20,00%	20,00%
Muito Alto	70,00%	60,00%	60,00%	30,00%	25,00%

Fonte: Ferreira, 2024.

Após a caracterização do tecido urbano, a renda da população foi considerada como variável influente para análise das simulações termo energéticas de edificações (FERREIRA, 2024).

Belo Horizonte apresenta marcantes disparidades socioeconômicas. Segundo o Mapa das Desigualdades (2021), moradores do bairro Belvedere, na Região Centro-Sul, possuem renda média de 11,6 salários mínimos, no bairro Lourdes também na região Centro-Sul a renda é igual ou superior a 14,5 salários mínimos, enquanto em bairros como Grotinha, Distrito Industrial do Jatobá e Vila Real II, a média é de apenas

0,3 salários mínimos. Estudos anteriores corroboram esse cenário: em 2011, bairros como Belvedere, Mangabeiras, São Bento e Lourdes apresentavam rendimentos mensais entre R\$ 9.500 e R\$ 15.000, contrastando com bairros populares cuja renda não ultrapassava R\$ 710 (IPEA, 2011).

Para fins analíticos, foi adotada uma classificação da renda média do chefe de domicílio em quatro grupos, com base nos dados disponíveis e na distribuição das faixas salariais na cidade:

Popular: renda inferior a 5 salários mínimos;

Médio: renda entre 5 e 8,5 salários mínimos;

Alto: renda entre 8,5 e 14,5 salários mínimos;

Luxo: renda igual ou superior a 14,5 salários mínimos.

Com base no estudo de Ferreira (2024), as informações de renda per capita foram então relacionadas às classificações de adensamento conforme os nove tipos de tecido urbano identificados:

1. Maior adensamento uso misto: predomínio de edificações comerciais altas e residenciais de todas as morfologias;
2. Maior adensamento com predomínio de uso residencial: predomínio de edificações multifamiliares e com mais de 8 pavimentos;
3. Adensamento médio a alto com predomínio de uso residencial: predomínio de edificações multifamiliares de 5 a 8 pavimentos e representatividade de edificações com mais de 8 pavimentos;
4. Adensamento médio com predomínio de uso residencial: predomínio de edificações multifamiliares de 5 a 8 pavimentos;
5. Adensamento médio a baixo com predomínio de uso residencial: predomínio de edificações multifamiliares de até 4 pavimentos;
6. Adensamento de transição com predomínio de uso residencial: predomínio de edificações unifamiliares e multifamiliares;
7. Adensamento baixo a médio com predomínio de uso residencial: predomínio de edificações unifamiliar e representatividade de multifamiliar até 4 pavimentos;
8. Adensamento baixo com predomínio de uso residencial: predomínio de edificações unifamiliar;

9. Adensamento muito baixo com predomínio de uso residencial: basicamente edificações unifamiliares.

Tabela 04 - Tratamento estatístico dos dados para caracterização do tecido urbano.

Faixa de renda	Grupos de adensamento estabelecidos								
	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Baixa							28,1%	34,7%	37,3%
Baixa a média						2,2%	44,3%	44,5%	8,9%
Média				1,3%		1,2%	65,0%	27,8%	4,7%
Média a alta	9,8%				13,9%		72,5%	0,4%	3,4%
Alta		12,2%	6,8%	10,2%	22,9%	32,4%	13,0%	1,8%	0,7%

Fonte: Ferreira, 2024.

Com base na análise conjunta de adensamento e renda, realizada por Ferreira (2024) foram selecionados bairros representativos de cada grupo. Para o grupo 7, foram escolhidos dois bairros: um com renda média e outro com renda média a alta. Os bairros selecionados foram (FERREIRA, 2024):

1. Maior adensamento uso misto: Centro, Região Centro-Sul;
2. Maior adensamento com predomínio de uso residencial: Lourdes, Região Centro Sul;
3. Adensamento médio a alto com predomínio de uso residencial: Sion, Região Centro-Sul;
4. Adensamento médio com predomínio de uso residencial: Buritis, Região Oeste;
5. Adensamento médio a baixo com predomínio de uso residencial: Cruzeiro, Região Centro-Sul;
6. Adensamento de transição com predomínio de uso residencial: Grajaú, Região Oeste;
7. Adensamento baixo a médio com predomínio de uso residencial: Carlos Prates, Região Noroeste, e Prado, Região Oeste;
8. Adensamento baixo com predomínio de uso residencial: Céu Azul, Região de Venda Nova;
9. Adensamento muito baixo com predomínio de uso residencial: Tiradentes, Região Nordeste.

Após estabelecer tais parâmetros, foi selecionado um núcleo para as simulações termo energéticas de edificação, sendo ele, o bairro Lourdes na região centro-sul, que apresenta maior adensamento com predominância de uso residencial.



Figura 06 - Adensamento do bairro selecionado para simulação. Rua Thomás Gonzaga, altura do número 299, bairro Lourdes, Belo Horizonte – grupo 02.

Fonte: Google Maps, 2025.

A definição do bairro que compõe a análise — Lourdes — representa uma etapa fundamental na construção metodológica da pesquisa. A partir dessa amostragem, torna-se possível aplicar o modelo simulado no EnergyPlus de forma representativa e contextualizada, estabelecendo um vínculo direto entre as características do entorno urbano e o desempenho termo energético da edificação.

O ponto específico adotado para análise situa-se na Rua Thomás Gonzaga, número 299, bairro Lourdes, Belo Horizonte – Minas Gerais. Esse local foi selecionado com base em critérios técnicos, morfológicos e socioeconômicos, alinhados à proposta de representar bairros com alta densidade edificada, uso predominantemente residencial e tipologia vertical. As características físicas e urbanas do entorno são:

- Tipo de terreno: urbano consolidado, classificado como "*city*" no programa EnergyPlus.
- Elevação: o ponto de análise encontra-se a uma altitude média de 892 metros acima do nível do mar, valor ligeiramente superior à média da cidade (≈ 852 m). O bairro apresenta uma variação altimétrica que vai de 833 metros (mínima) a 1.007 metros (máxima), com relevo moderadamente ondulado, o que influencia diretamente na ventilação natural, na exposição solar e nas condições microclimáticas locais (*TOPOGRAPHIC-MAP*, 2024).
- Edificações vizinhas: o entorno imediato é composto por edificações de grande porte, com altura média entre 60 m e 65 m nas construções confrontantes. Outras edificações do quarteirão e entorno variam entre 8,5 m e 70 m de altura, resultando em um contexto urbano altamente verticalizado. A média de espaçamento entre os prédios é de aproximadamente 10 metros, com maior obstrução nas orientações leste, oeste e norte. A fachada norte, no entanto, é voltada para uma rua com espaçamento de 21,5 metros, o que confere maior abertura visual e incidência solar nessa direção.

Essas condições geométricas e contextuais foram incorporadas à modelagem no EnergyPlus, a fim de assegurar a representação fiel da interação entre a edificação e o entorno urbano real.³

³ O EnergyPlus não considera para fins de cálculos os elementos incluídos na fachada Sul, sendo assim, os edifícios presentes nesta fachada não são representados na modelagem.

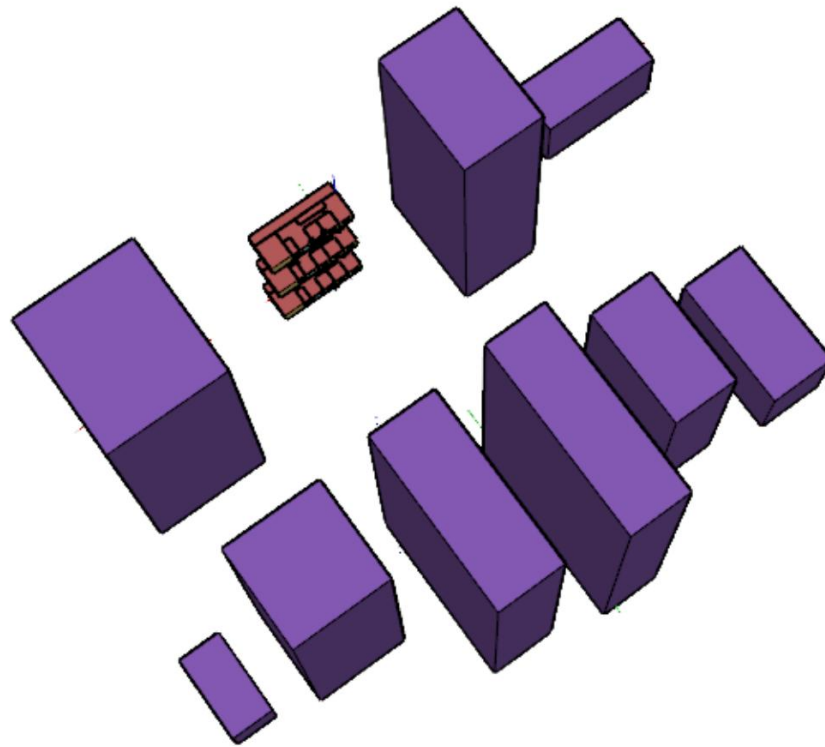


Figura 07 - Edificações circundantes ao arquétipo residencial multifamiliar.

Fonte: Elaboração da autora com dados geométricos das referidas edificações encontrados em IDE BHGEO (<https://bhmap.pbh.gov.br>), 2025.

4.2 Modelagem no *Software Energyplus*

Esta seção apresenta como os fatores do microclima e os parâmetros do local (revisados na seção anterior) serão modelados/inseridos no EnergyPlus para fins desta pesquisa.

Foram conduzidas quatro simulações distintas, variando-se os dados de entrada conforme as abordagens adotadas: (i) simulação baseada em zonas térmicas, utilizada para gerar os dados de temperatura superficial externa dos elementos do entorno, empregados na simulação (iv); (ii) simulação sem a inserção de elementos sombreadores (denominada em alguns tópicos de forma simplificada como “sem elementos”); (iii) simulação com inserção de elementos sombreadores (radiação de onda curta) e (iv) aplicação da metodologia proposta, que integra a representação dos elementos sombreadores com a definição das respectivas zonas térmicas e o cálculo do fator de forma (*view factor calculation*).

Essa abordagem foi adotada para permitir, de forma clara e progressiva, a avaliação do impacto de cada variável referente ao entorno urbano e aos elementos sombreadores sobre o desempenho termoenergético. Ao comparar resultados de simulações que vão da configuração básica até a metodologia aplicada (zonas térmicas, sombreamentos e cálculo de *view factor*), é possível isolar o efeito de cada entrada no IDF e identificar o quanto cada nível de detalhamento altera as estimativas de carga térmica e consumo de energia. Dessa forma, a estratégia justifica-se pela necessidade de quantificar a contribuição específica do sombreamento, da consideração do microclima urbano e da precisão no cálculo do fator de forma, asseverando que a metodologia proposta traz ganhos de acurácia em relação às abordagens simplificadas.

4.2.1 Definição dos Parâmetros do Local

4.2.1.1 Condição Macroclimática

A condição macroclimática no EnergyPlus é representada por meio de dados meteorológicos organizados em arquivos climáticos, que devem ser inseridos antes da execução da simulação. Neste estudo, foi adotado o arquivo climático no formato EPW, da estação Carlos Prates, localizada em Belo Horizonte — BRA_MG_Belo.Horizonte-Prates.AP.836724_TMYx.2009-2023. Esse arquivo fornece as variáveis necessárias para a simulação no EnergyPlus (U.S. *DEPARTMENT OF ENERGY*, 2016a), reunindo dados meteorológicos com frequência horária ao longo de um ano típico. Entre essas variáveis, destacam-se: temperatura do ar, umidade relativa, ponto de orvalho, pressão atmosférica, velocidade e direção do vento, radiação solar (global, direta e difusa), cobertura do céu, altura das nuvens, visibilidade e precipitação.

Optou-se pela estação de Carlos Prates por estar localizada em uma região central e densamente urbanizada de Belo Horizonte, o que favorece a representatividade climática da área estudada.

Para garantir a consistência entre todas as simulações realizadas, o mesmo arquivo climático foi utilizado em todas as etapas.

4.2.1.2 Condição Mesoclimática

A condição mesoclimática é representada pelo terreno, que pode ser configurado no arquivo *Input Data File* - IDF do EnergyPlus. Sendo assim, foi selecionado o tipo de terreno “City” (urbano denso), conforme opções disponíveis no EnergyPlus, de modo a representar a interação do vento com edificações e a configuração típica de bairros adensados de Belo Horizonte. Essa escolha reflete a rugosidade do entorno imediato da edificação em análise, influenciando os coeficientes de resistência do vento e a distribuição das pressões externas no modelo.

Também foi adotado o modelo de distribuição solar “*FullInteriorAndExteriorWithReflections*” na configuração *Building > Solar Distribution* do EnergyPlus. Essa opção foi escolhida por oferecer uma abordagem mais precisa na simulação da radiação solar direta e refletida, tanto no ambiente interno quanto externo. Diferentemente do modelo *FullExterior*, que assume que toda a radiação solar transmitida incide diretamente no piso, o *FullInteriorAndExteriorWithReflections* permite que o programa calcule a quantidade de radiação do feixe solar que atinge cada superfície interna da zona — incluindo piso, paredes e janelas — ao projetar os raios solares através das aberturas, considerando o impacto das superfícies externas de sombreamento e dos dispositivos de sombreamento nas janelas. Essa configuração foi mantida de forma idêntica em todas as simulações, garantindo comparabilidade e coerência entre os resultados obtidos.

A configuração do terreno influencia diretamente o modelo de cálculo da radiação térmica utilizado nas simulações. O EnergyPlus considera, por padrão, a incidência de radiação solar direta e difusa (onda curta), bem como a radiação térmica de onda longa emitida entre cada superfície externa da edificação e o céu. Entretanto, o programa não realiza, de forma nativa, o cálculo da troca de radiação de onda longa entre superfícies externas vizinhas (como edificações ao redor). Para representar essa interação de forma aproximada, foi aplicado, apenas na simulação IV, o cálculo de fator de forma (*view factor*), que quantifica a fração do céu visível a partir de cada superfície. Os dados foram inseridos na tabela *View3D*, fornecida pelo EnergyPlus e preenchida com os dados geométricos e com as coordenadas dos edifícios vizinhos. Assim, os resultados obtidos através da tabela, foram inseridos no EnergyPlus através da entrada *Surface Property: Surrounds Surfaces*. Esse fator permite simular de forma

mais realista a obstrução do céu e a consequente redução da troca radiativa com o ambiente, o que é especialmente relevante em cenários urbanos adensados.

Tabela 05 – Resumo das entradas de condições mesoclimáticas no EnergyPlus.

Dados de Entrada	Sem Elementos Sombreadores	Com Elementos Sombreadores	Com Elementos Sombreadores e Radiação de Onda Longa
<i>Terrain</i>	<i>City</i>	<i>City</i>	<i>City</i>
<i>Solar Distribution</i>	<i>Full Interior and Exterior with Reflections</i>	<i>Full Interior and Exterior with Reflections</i>	<i>Full Interior and Exterior with Reflections</i>
<i>Surface Property: Surrounds Surfaces</i>	-	-	<i>View 3D (resultados)</i>

Fonte: Elaboração da autora, 2025.

4.3 Parâmetros e Modelo da Edificação

4.3.1 Definição do Modelo

Uma consideração importante é a contextualização do modelo à realidade da cidade de Belo Horizonte, Minas Gerais. Assim, o dimensionamento dos ambientes internos, as proporções das fachadas, as esquadrias e os materiais construtivos foram definidas com base nos padrões construtivos mais comuns da região, respeitando as normas técnicas vigentes e os parâmetros locais de ocupação e uso do solo.

4.3.1.1 Arquétipo

O modelo de referência multifamiliar adotado é um prédio de aproximadamente 30 metros de altura, com 11 andares. Trata-se de um arquétipo representativo de edificações multifamiliares da região sudeste para a classe socioeconômica A, conforme definido por Telles (2016) a partir de levantamento nacional e validação estatística. O modelo escolhido reflete a tipologia mais comum observada em zonas urbanas adensadas de Minas Gerais, sendo composto por unidades residenciais com três dormitórios, ventilação cruzada, área útil entre 80 e 90 m² e sistemas construtivos

em alvenaria de bloco cerâmico, lajes e coberturas em concreto maciço, conforme apontamento da Pesquisa de Posses e Hábitos de Consumo (PPH, 2019). As fachadas apresentam elevado percentual de abertura e absorvência média a alta, características que influenciam diretamente no comportamento térmico do edifício (TELLES, 2016). A escolha deste arquétipo justifica-se por sua ampla representatividade no cenário urbano mineiro e por sua aderência à empreendimentos residenciais verticais.

Sua simulação foi considerada por vinte e quatro zonas. Cada uma dessas zonas foi dividida entre três pavimentos tipos, sendo eles o primeiro pavimento, o sexto pavimento — incorporando o pavimento central do edifício — e o décimo primeiro pavimento, correspondente ao último andar. Em cada um desses pavimentos, foram definidas oito zonas térmicas, distribuídas da seguinte maneira: zona 01 representa o dormitório 01; zona 02, o dormitório 02; zona 03, o dormitório 03; zona 04, a sala de estar; zona 05, a cozinha; zona 06, o banheiro; zona 07 refere-se à circulação; e zona 08 representa a área adjacente, abrangendo as demais utilizações dos pavimentos.

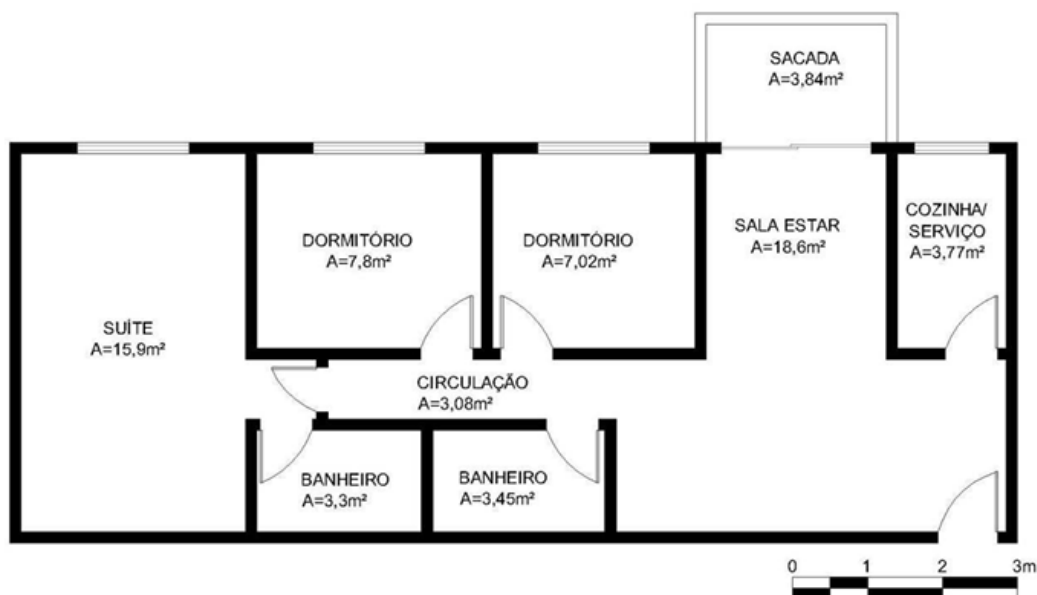


Figura 08 - Planta inicial do modelo residencial multifamiliar.

Fonte: Telles, 2016.

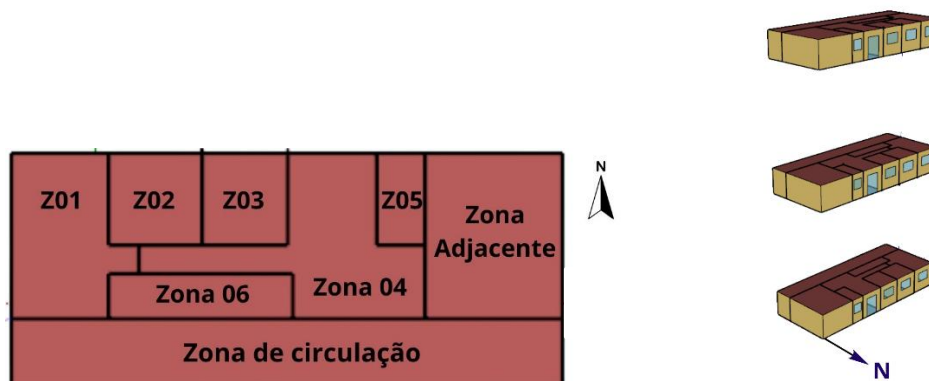


Figura 09: Arquétipo residencial multifamiliar simulado.

Fonte: Elaboração da autora, 2025.

4.4 Entradas e Cenários Considerados

4.4.1 Dados de Entrada no Arquivo EnergyPlus *Input Data File* - IDF

Para realizar uma simulação precisa, o programa requer um conjunto detalhado de informações sobre o edifício e suas condições operacionais. Essas informações são fornecidas por meio do arquivo de entrada conhecido como *Input Data File* (IDF), que possui a extensão “.idf”.

4.4.1.1 Objetos de Entrada Utilizados no Arquivo IDF

As simulações foram baseadas em elementos fundamentais presentes no arquivo de entrada (.idf) do EnergyPlus. Na classe *Building*, considerou-se o modelo inserido em ambiente urbano (*Terrain: City*) e adotou-se o método de distribuição solar "*FullInteriorAndExteriorWithReflections*", o qual considera reflexões internas e externas da radiação solar, proporcionando maior precisão no cálculo das cargas térmicas.

Os materiais das superfícies construtivas foram definidos conforme arquétipos representativos de edificações residenciais, especificados por meio dos objetos *Material* e *Construction* – Tabela 06. Os elementos transparentes foram descritos com o uso do objeto *WindowMaterial:Glazing*, configurado com propriedades óticas e

térmicas uniformes entre os modelos simulados, destacando-se a condutividade térmica de 0,9 W/m.K.

Tabela 06 – Propriedades físicas e térmicas dos materiais utilizados na simulação termoenergética

PROPRIEDADES DOS MATERIAIS					
Nome	Argamassa Externa	Argamassa Interna	Argamassa Laje Pré Moldada	Cerâmica Telha	Porta Madeira (3cm)
Espessura (m)	0,025	0,025	0,01	0,01	0,03
Condutividade (W/m)	1,15	1,15	1,15	1,05	0,15
Densidade (Kg/m ³)	2000	2000	2000	2000	614
Calor Específico (J)	1000	1000	1000	920	2300
Absorção Térmica	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9
Absorção Solar	0,3	0,7	0,7	0,7	0,9
Absorção Visível	0,3	0,7	0,7	0,7	0,9
Nome	Cerâmica Laje Tabela	Cerâmica Tijolo	Concreto Bloco	Concreto Laje Alveolar	Concreto Laje Maciça
Espessura (m)	0,012	0,0165	0,03	0,05	0,1
Condutividade (W/m)	1,05	0,9	1,75	1,15	1,15
Densidade (Kg/m ³)	2000	1800	2400	2200	2200
Calor Específico (J)	920	920	1000	1000	1000
Absorção Térmica	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9
Absorção Solar	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7
Absorção Visível	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7
Nome	Concreto Laje Nervurada c/ Câmara de Ar	Concreto Laje Nervurada c/ EPS	Concreto Laje Pré Moldada	Concreto+EPS Laje Tabela	Forro PVC
Espessura (m)	0,0985	0,075	0,04	0,07	0,01
Condutividade (W/m)	1,75	1,75	1,75	0,223	0,071
Densidade (Kg/m ³)	2200	2200	2200	373	273
Calor Específico (J)	1000	1000	1000	1000	960
Absorção Térmica	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9
Absorção Solar	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7
Absorção Visível	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7
Nome	Forro Gesso	Forro Gesso (Laje Nervurada)	Gesso Interno	Granito	Piso Cerâmico
Espessura (m)	0,01	0,01	0,02	0,025	0,0075
Condutividade (W/m)	0,35	0,35	0,35	3	1,05
Densidade (Kg/m ³)	900	900	900	2600	2000
Calor Específico (J)	870	870	870	800	920
Absorção Térmica	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9
Absorção Solar	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7
Absorção Visível	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7
Nome	Placa de Alumínio Composto	Placa Gesso			
Espessura (m)	0,003	0,002			
Condutividade (W/m)	2,3	0,35			
Densidade (Kg/m ³)	2700	900			
Calor Específico (J)	880	870			
Absorção Térmica	0,9	0,9			
Absorção Solar	0,7	0,7			
Absorção Visível	0,7	0,7			

Fonte: Elaboração da autora, 2025.

Tabela 07 – Demonstração da aplicabilidade dos materiais utilizados na simulação termoenergética.

MATERIAL	ETAPA DA CONSTRUÇÃO
Argamassa Externa	<i>Exterior Wall; Interior Wall; Paredes;</i>
Argamassa Interna	<i>Exterior Wall; Interior Wall; Paredes;</i>
Argamassa Laje Pré Moldada	Cobertura 21; Cobertura 05;
Cerâmica Telha	Cobertura 05; Cobertura 06;
Porta Madeira	<i>Exterior Door; Interior Door;</i>
Cerâmica Laje Tabela	Cobertura 05; Cobertura 21;
Cerâmica Tijolo	<i>Exterior Wall; Interior Wall; Paredes;</i>
Concreto Bloco	Paredes;
Concreto Laje Maciça	<i>Interior Floor; Interior Ceiling;</i>
Concreto Laje Nervurada c/ Câmara de Ar	Cobertura 22;
Concreto Laje Nervurada c/ EPS	Cobertura 23;
Concreto Laje Pré Moldada	Cobertura 05;
Concreto + EPS + Laje Tabela	Cobertura 21;

Forro PVC	Cobertura 06;
Forro Gesso (laje nervurada)	Cobertura 22;
Gesso Interno	Paredes;
Granito	Parede 32;
Piso Cerâmico	Cobertura 22; Cobertura 23; <i>Exterior Floor</i> ;
Placa Alumínio Composto	Parede 26; Cobertura 21;

Fonte: Elaboração da autora, 2025.

Também foram inseridas cargas internas correspondentes à ocupação (*People*), iluminação (*Lights*) e equipamentos elétricos (*ElectricEquipment*), com base em perfis de uso derivados da Pesquisa de Posses e Hábitos de Consumo (PPH, 2019), frequentemente utilizada em estudos de desempenho energético no país. Esses perfis foram associados a agendamentos específicos de operação (*Schedule:Compact*), a fim de refletir a dinâmica diária das cargas.

Para os equipamentos elétricos, não foram considerados aparelhos de climatização ativa. A iluminação foi modelada com densidade de 9 W/m² para salas e dormitórios e 20W/m² para cozinhas e banheiros, condizente com padrões atuais de eficiência. A ocupação foi definida com densidade de aproximadamente 02 a 03 pessoas por ambiente. A tabela a seguir exemplifica como os dados são utilizados:

Tabela 08 - Dados de entrada para equipamentos, iluminação e ocupação da zona quatro (sala).

Objeto	Zona	Unidade	Valor	Perfil de Uso
<i>ElectricEquipment</i>	Sala	W/m ²	*4	Equipamentos_Sala
<i>People</i>	Sala	Pessoas/m ²	2	Ocupacao_Sala / Ativo
<i>Lights</i>	Sala	W/m ²	9	Iluminação_Sala

Fonte: Elaboração da autora, 2025.

Optou-se por não incluir estratégias de ventilação natural ou controle automatizado de aberturas nos modelos simulados, ou seja, não foram inseridos

⁴ Os valores atribuídos aos equipamentos elétricos variam entre si em função de suas potências e características de uso. Dessa forma, optou-se por utilizar a notação " * " na Tabela 08, a fim de representar a diversidade de valores presentes neste quadro, indicando que não se trata de um único valor fixo, mas de uma variação conforme o tipo de equipamento considerado.

objetos do tipo *ZoneVentilation:DesignFlowRate*, *ZoneVentilation:WindandStackOpenArea* ou sistemas complexos de fluxo de ar, como *AirFlowNetwork*.

Essa decisão metodológica fundamenta-se em duas razões principais. Primeiramente, visa-se a eliminação de variáveis adicionais que possam interferir nos resultados da simulação, de modo a concentrar a análise nos efeitos das trocas térmicas por condução e radiação entre a edificação e seu entorno. A inclusão da ventilação natural adicionaria variabilidade relacionada a parâmetros climáticos momentâneos, direções de vento e regras de controle, o que dificultaria a interpretação isolada do impacto geométrico e térmico do entorno urbano. Em segundo lugar, a ausência de ventilação natural assegura maior consistência entre os diferentes cenários simulados (sem entorno, com elementos sombreadores no entorno (radiação de onda curta) e com zonas térmicas no entorno – radiação de onda longa). Tal abordagem permite que as comparações entre os modelos reflitam, com maior precisão, exclusivamente os efeitos do adensamento urbano e dos elementos vizinhos sobre as variáveis internas da edificação.

Para manter a consistência entre todas as simulações, foram preservados os mesmos perfis de uso e ocupação (“*Schedule:Compact*”, “*Schedule:TypeLimits*” e “*Schedule:Constant*”), bem como as cargas internas definidas em “*People*”, “*Lights*” e “*ElectricEquipment*”. Isso garante que as diferenças observadas nos resultados sejam atribuídas exclusivamente à inclusão dos elementos sombreadores, das zonas térmicas vizinhas e ao cálculo dos fatores de visão, e não a variações nos padrões de uso ou nas condições internas do edifício.

Além das entradas presentes em todos os modelos (exemplificadas em parágrafos anteriores), as configurações adicionais que foram necessárias para cada tipo de simulação, serão apresentadas nas subseções seguintes.

4.4.1.2 Zonas Térmicas

A simulação com zonas térmicas foi empregada com o objetivo de obter as temperaturas superficiais dos elementos que compõem o entorno urbano da edificação em estudo. Essa abordagem fundamenta-se na metodologia descrita por Pereira *et al.* (2021), na qual zonas térmicas são atribuídas às superfícies do entorno

modelado, a fim de estimar a distribuição térmica e os fluxos de radiação refletida que incidem sobre a edificação principal.

Com base nisso, a modelagem tridimensional do entorno — caracterizado como zona térmica — foi realizada no SketchUp por meio da extensão OpenStudio, permitindo a representação precisa das geometrias urbanas. Em seguida, a simulação foi executada mantendo-se o padrão base dos objetos *Material*, *Construction* e demais parâmetros. O dado de saída considerado foi o *Output:Surface Face Temperature*, utilizado para obtenção dos dados térmicos das zonas que compõem o entorno, os quais serão posteriormente empregados na simulação IV.

4.4.1.3 Cenário sem Interferência do Contexto Urbano

Ao adotar uma simulação termoenergética sem elementos sombreadores e sem qualquer representação do entorno urbano, o modelo é configurado de forma a considerar somente a edificação isolada, exposta integralmente ao céu e à radiação incidente. Nessa abordagem, todos os objetos relacionados a sombreamento — tais como *Shading:Building:Detailed*, *Shading:Property:Reflectance* e o cálculo de sombras (*ShadowCalculation*) — são omitidos do arquivo IDF do EnergyPlus, de modo que não há perdas ou bloqueios de radiação por edificações vizinhas ou vegetação (DOE, 2021).

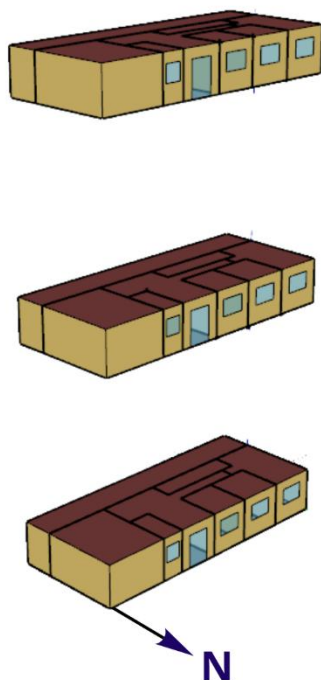


Figura 10 – Cenário sem interferência do entorno urbano.

Fonte: Elaboração da autora, 2025.

Ao não incluir objetos de sombreamento, o simulador assume que toda a radiação solar disponível atinge as fachadas sem impedimentos. Tal condição tende a superestimar as demandas de resfriamento, pois desconsidera a atenuação de ganhos solares que ocorreria em situações reais de entorno urbano mais adensado (BOGNÁR *et al.*, 2021; HASHEMI *et al.*, 2025).

4.4.1.4 Elementos Sombreadores

A inserção de elementos sombreadores no modelo tem papel fundamental nas simulações termoenergéticas, especialmente quando se busca compreender a influência do entorno urbano sobre o desempenho térmico da edificação. Elementos como edificações vizinhas, foram modelados no *SketchUp* por meio da extensão *OpenStudio*, a fim de representar os sombreamentos reais que ocorrem ao longo do dia e do ano. Esses componentes influenciam diretamente a quantidade de radiação solar incidente sobre as superfícies do edifício, impactando as cargas térmicas internas e, conseqüentemente, o consumo de energia para condicionamento ambiental (SANTOS *et al.*, 2019). No arquivo de entrada, os sombreamentos foram

representados com o uso dos objetos *Shading:Building:Detailed* e *Shading:Property:Reflectance*, este último com valor de refletância solar de 0,2 para superfícies adjacentes. Além disso, o cálculo de sombras foi ativado por meio do objeto *ShadowCalculation*, permitindo o rastreamento preciso das sombras projetadas ao longo do tempo.

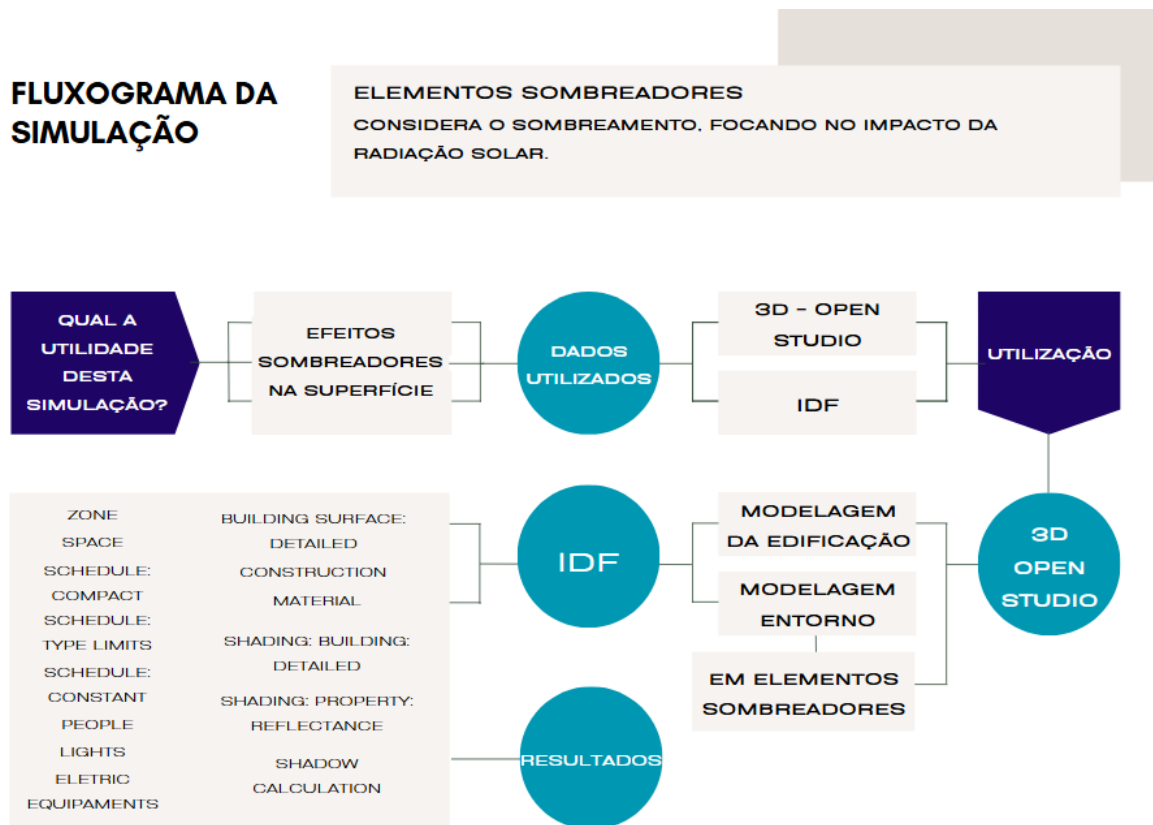


Figura 11 - Fluxograma da simulação com elementos vizinhos modelados através de elementos sombreadores.

Fonte: Elaboração da autora, 2025.

4.4.1.5 Metodologia Aplicada: Inserção Conjunta da Zona Térmica, Elementos Sombreadores e *View Factor Calculation*

A integração da zona térmica, dos elementos sombreadores e do fator de forma em um mesmo modelo de simulação aposta em um avanço importante na análise do desempenho termoenergético e do conforto das edificações em diferentes contextos urbanos. A inserção conjunta desses elementos no arquivo IDF (*Input Data File*) possibilita que o motor de simulação do EnergyPlus considere, de maneira articulada,

a influência do microclima urbano sobre o conforto térmico interno, refletindo em tese, condições reais mais próximas das encontradas em campo. A seguir detalha-se o passo a passo para execução desta metodologia:

- Definição do modelo arquétipo e levantamento do entorno urbano: O ponto de partida foi a utilização de um modelo arquétipo residencial, previamente parametrizado com construção típica, zonas térmicas, materiais, perfis de uso e cargas internas, conforme metodologia PPH (Pesquisa de Posses e Hábitos), já validada para estudos de edificações da região sudeste do Brasil. A zona térmica foi configurada com os objetos de *ElectricEquipment*, *Lights* e *People*, além dos respectivos agendamentos de ocupação e uso. A partir do arquétipo, foi definido o entorno urbano a ser considerado na simulação. Para isso, foram levantadas informações reais sobre edificações vizinhas, incluindo: altura das construções adjacentes; distância horizontal até a edificação simulada e orientação (ângulo) das obstruções em relação às fachadas (como demonstrados em tópicos anteriores).
- Cálculo dos fatores de forma (*View Factor*): Com os dados do entorno urbano, foi utilizada a planilha *View3D*, fornecida com o *software* EnergyPlus, para calcular o fator de forma. Essa planilha permite simular diferentes obstáculos ao redor de um ponto e estimar a fração do céu visível a partir dele. O preenchimento da planilha exigiu a definição das coordenadas horizontais e verticais dos obstáculos, suas alturas, distâncias e ângulos, além das coordenadas geográficas da edificação. Como resultado, obteve-se um valor numérico do *3D view factor*.
- Inserção de elementos sombreadores no modelo: Com base nos dados levantados, os elementos sombreadores que foram modelados geometricamente no SketchUp utilizando a extensão OpenStudio, representam as edificações vizinhas com suas dimensões e posicionamentos reais. Esses elementos foram exportados para o EnergyPlus no formato IDF por meio da classe *Shading:Building:Detailed*. Essa etapa é fundamental, pois permite que os sombreamentos gerados por construções adjacentes ao longo do dia e do ano sejam considerados dinamicamente na simulação, impactando diretamente a radiação solar incidente sobre as superfícies da edificação analisada.

- Configuração dos objetos complementares no EnergyPlus: Os dados e objetos necessários foram manualmente inseridos no arquivo IDF para permitir que o EnergyPlus integrasse as variáveis do entorno urbano no cálculo termoenergético. As inserções ocorreram conforme descrito abaixo:

Schedule:File: Os resultados de temperatura superficial horária anual gerados pela simulação da Zona Térmica foram extraídos e reintroduzidos no modelo por meio do objeto *Schedule:File*. Esse recurso permite que os fatores de trocas térmicas entre a edificação e o entorno sejam representados com maior precisão temporal.

SurfaceProperty:SurroundingSurfaces: Os valores de fator de forma, extraídos da planilha *View3D*, foram inseridos nessa classe, associando diferentes superfícies do entorno urbano (obstáculos) ao modelo. Cada superfície foi definida com sua área, orientação e altura relativa, além da respectiva temperatura superficial média.

SurfaceProperty:LocalEnvironment: Este objeto foi utilizado para associar as paredes externas da edificação às superfícies do entorno definidas anteriormente. Essa relação permite que o EnergyPlus considere os efeitos combinados de obstrução visual e troca radiativa com os elementos urbanos adjacentes.

ShadingProperty:Reflectance: Foi definido o valor de refletância das superfícies sombreadoras como 0,2, representando materiais construtivos urbanos típicos (ex: alvenaria, concreto exposto). Esse parâmetro influencia a quantidade de radiação refletida que pode incidir sobre a edificação analisada.

FLUXOGRAMA DA METODOLOGIA APLICADA

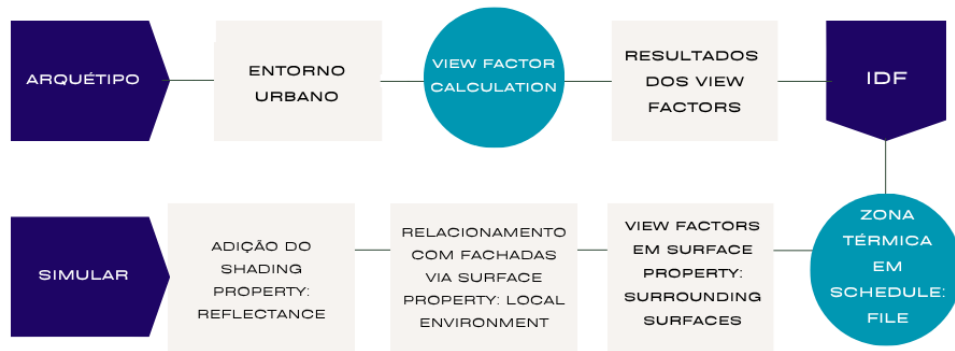


Figura 12 - Fluxograma da metodologia aplicada.

Fonte: Elaboração da autora, 2025.

A inserção conjunta da zona térmica, dos elementos sombreadores e dos fatores de visão do céu num único modelo de simulação permite que o EnergyPlus represente, com maior fidelidade, as trocas térmicas entre a edificação e o seu entorno urbano imediato. Isso proporciona um modelo mais realista, especialmente em cenários de alta densidade urbana, onde a obstrução ao céu e os sombreamentos constantes alteram significativamente o balanço energético das construções. No tópico 05, serão apresentados os resultados que suportam essa conclusão.

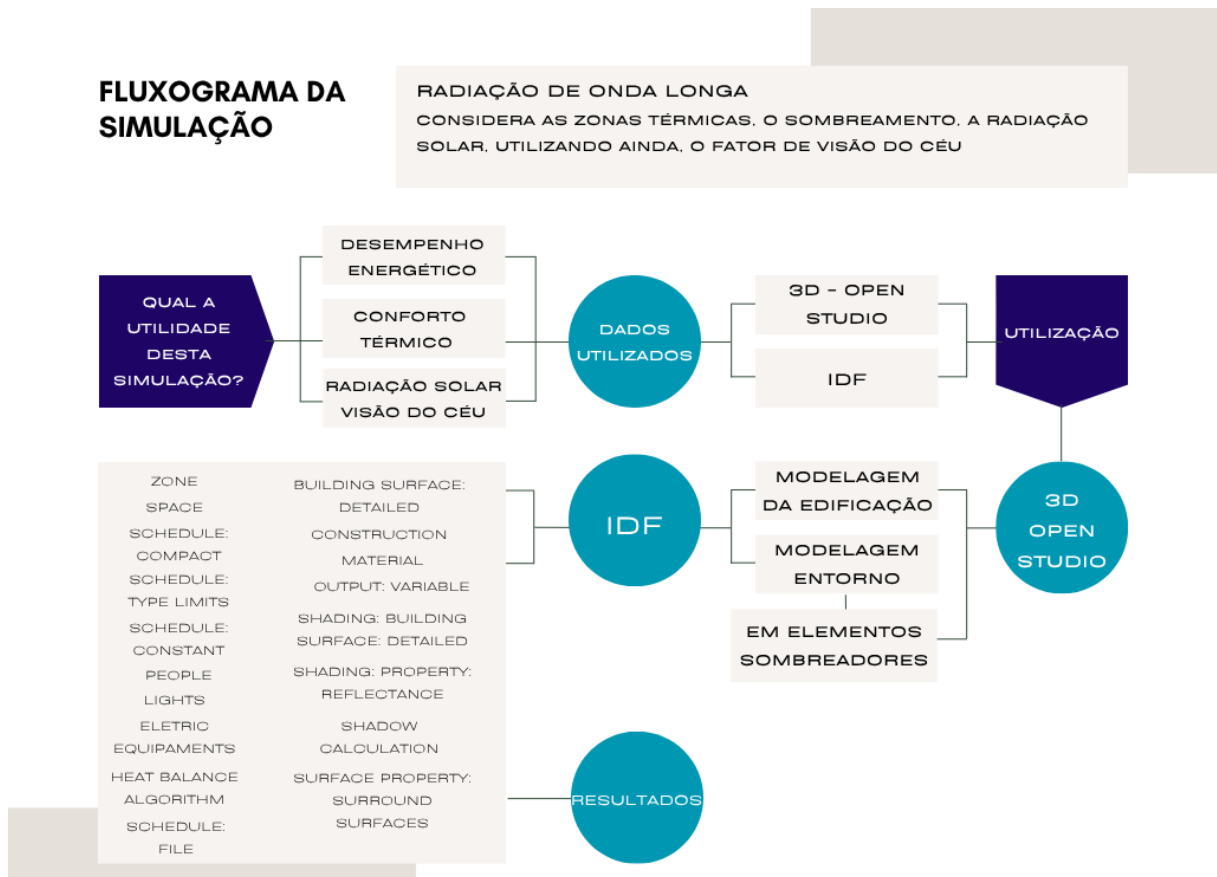


Figura 13 - Fluxograma da simulação com elementos vizinhos modelados através da metodologia aplicada.

Fonte: Elaboração da autora, 2025.

4.5 Dados de Saída Considerados

A definição e o tratamento das variáveis de saída no EnergyPlus constituíram etapas fundamentais desta metodologia, pois forneceram as bases quantitativas para a análise do conforto térmico e do desempenho termoenergético da edificação simulada. A seleção das variáveis foi orientada pela necessidade de responder diretamente aos objetivos da pesquisa, em especial no que se refere à avaliação da influência do entorno urbano nas trocas térmicas externas e nas condições internas de conforto.

As variáveis escolhidas foram configuradas por meio do objeto *Output:Variable* no arquivo IDF, com frequência horária (*hourly*), garantindo a extração contínua ao longo das 8.760 horas do ano. A seguir, detalha-se a seleção, o tratamento e a justificativa técnica para cada uma das variáveis utilizadas.

4.5.1 Dados de Saída no Arquivo EnergyPlus *Input Data File* - IDF

As principais variáveis analisadas foram:

- **Surface Outside Face Net Surface Thermal Radiation Heat Gain Rate per Area [W/m²]:** esta variável representa a taxa líquida de ganho de calor por radiação térmica de onda longa na face externa das superfícies da edificação. Valores positivos indicam que a superfície está absorvendo radiação térmica proveniente de outras superfícies ou do entorno; valores negativos indicam que a superfície está emitindo calor para o ambiente externo. Essa métrica é essencial para entender o impacto do ambiente urbano, incluindo sombreamento e obstruções visuais, sobre o balanço térmico das fachadas (DOE, 2023).
- **Zone Operative Temperature [°C]:** indica a temperatura operativa da zona térmica. Essa variável é amplamente utilizada para avaliar o conforto térmico percebido pelos ocupantes, pois considera os principais mecanismos de transferência térmica no ambiente interno (DOE, 2023). Em especial, utilizou-se também o dado de saída denominado *Zone Thermal Comfort ASHRAE 55 Adaptive Model Temperature*, que representa a temperatura operativa adaptativa de conforto para cada zona térmica, calculada pelo modelo adaptativo da norma ASHRAE 55, que considera a adaptação térmica dos ocupantes ao clima externo.

Para analisar os efeitos da radiação de onda longa (*Surface Outside Face Net Surface Thermal Radiation Heat Gain Rate per Area [W/m²]*), os dados foram extraídos para as três simulações distintas. Após a extração, foram estipulados os valores mínimos, médios e máximos para cada uma das superfícies e respectivos pavimentos. Assim, foram definidos dois dias representativos do comportamento térmico sazonal: 22 de dezembro (verão) e 21 de junho (inverno)⁵. Esses dias foram escolhidos por corresponderem aos solstícios de verão e inverno no hemisfério sul, representando,

⁵ **Nota:** Apesar da escolha dos solstícios como referência para análise das condições de radiação solar, é importante considerar que, em função da orientação da edificação e da latitude de Belo Horizonte, dias próximos aos equinócios (como março e setembro) podem apresentar condições de insolação mais críticas em determinadas fachadas. Isso ocorre especialmente em orientações menos favorecidas pela trajetória solar nos solstícios, como a fachada norte, que tende a permanecer sombreada durante o verão. Assim, a análise sazonal deve ser sempre contextualizada de acordo com a geometria da edificação e sua inserção urbana.

respectivamente, os períodos de maior e menor incidência solar do ano. O dia 22 de dezembro permite avaliar o desempenho da edificação sob condições críticas de superaquecimento, enquanto o dia 21 de junho possibilita a análise de perdas térmicas e do resfriamento passivo, evidenciando o impacto da presença ou ausência do entorno urbano nas trocas radiativas. A escolha desses extremos sazonais é uma prática consolidada em estudos de desempenho termoenergético e está alinhada a diretrizes técnicas, como a NBR 15220. Os valores foram organizados por hora, superfície e pavimento, possibilitando o cálculo da média horária da radiação de onda longa incidente; a identificação de picos de carga térmica radiativa ao longo do dia; e a comparação direta entre os cenários, destacando o efeito da presença ou ausência do entorno urbano.

Para avaliação das horas em conforto ao longo do ano (*Zone Operative Temperature* [°C]), a temperatura operativa horária de cada zona foi comparada aos limites de conforto definidos pela ASHRAE 55, com ajuste de $\pm 3,5$ °C para representar a variação adaptativa realista frente à dinâmica térmica dos ambientes simulados. O tratamento seguiu com a extração da temperatura operativa horária para as zonas simuladas; com o estabelecimento da faixa de conforto adaptativo ajustada para cada hora; com a classificação de cada hora - “em conforto”, se dentro da faixa ajustada e “fora do conforto”, se fora da faixa -; contagem do total anual de horas em conforto por zona e pavimento e comparação entre os três modelos simulados.

A escolha dessas variáveis foi orientada pela necessidade de representar, de forma objetiva e tecnicamente consistente, os efeitos do entorno urbano sobre o desempenho térmico das edificações. Enquanto a radiação de onda longa permitiu isolar os impactos das trocas térmicas externas com edificações vizinhas, a avaliação das horas em conforto térmico possibilitou mensurar a eficácia do modelo interno em manter condições adequadas para os ocupantes, sem o uso de sistemas ativos de climatização. Esse conjunto de dados forneceu as evidências necessárias para responder à primeira questão da pesquisa, ao demonstrar como as edificações vizinhas afetam diretamente as trocas térmicas externas; responder à segunda questão, ao evidenciar que a modelagem precisa das condições locais altera significativamente os resultados simulados e responder à terceira questão, ao comprovar que o EnergyPlus, com modelagens avançadas do entorno, é uma

ferramenta viável para representar o comportamento termoenergético em contextos urbanos densos.

5 RESULTADOS

A seguir, são apresentados os resultados obtidos em cada etapa da simulação, seguidos de análises comparativas que evidenciam os efeitos da modelagem do entorno urbano sobre o desempenho térmico e eficiência energética da edificação em estudo.

5.1 Zonas Térmicas

O principal dado de saída solicitado foi a variável *Surface Outside Face Temperature*, que representa a temperatura da face externa de uma superfície específica (como paredes, coberturas, entre outras), expressa em graus Celsius. Essa variável resulta do balanço térmico na superfície, levando em consideração a condução de calor através dos materiais que compõem a superfície; as trocas convectivas com o ar externo; as trocas radiativas com o ambiente, incluindo céu, solo e objetos adjacentes e as propriedades térmicas e radiativas dos materiais envolvidos.

Essas temperaturas fornecem uma estimativa de como o entorno urbano — especialmente em contextos mais adensados e termicamente ativos — influencia o comportamento térmico superficial da edificação. Os valores obtidos dessa variável foram utilizados como entrada no objeto *Schedule:File*, conforme descrito na seção 4.4.1.5, permitindo assim a representação mais precisa das trocas térmicas entre as superfícies da edificação e o ambiente urbano no modelo final de simulação.

5.2 *Surface Outside Face Net Surface Thermal Radiation Heat Gain Rate per Area [W/m²]*

Nas três simulações propostas, foi analisada a variável de saída denominada *Surface Outside Face Net Surface Thermal Radiation Heat Gain Rate per Area [W/m²]*, que representa a taxa líquida de ganho de calor por radiação térmica de onda longa na face externa das superfícies, normalizada por área.

Foram selecionadas como referência as superfícies externas mais representativas da envoltória da edificação, totalizando dezoito superfícies distribuídas entre diferentes pavimentos e orientações:

P01Z01PAVTO01, P01Z01PAVTO06, P01Z01PAVTO11, P02Z01PAVTO01,
 P02Z01PAVTO06, P02Z01PAVTO11, P02Z02PAVTO01, P02Z02PAVTO06,
 P02Z02PAVTO11, P02Z03PAVTO01, P02Z03PAVTO06, P02Z03PAVTO11,
 P07Z04PAVTO01, P07Z04PAVTO06, P07Z04PAVTO11, P02Z05PAVTO01,
 P02Z05PAVTO06 e P02Z05PAVTO11.

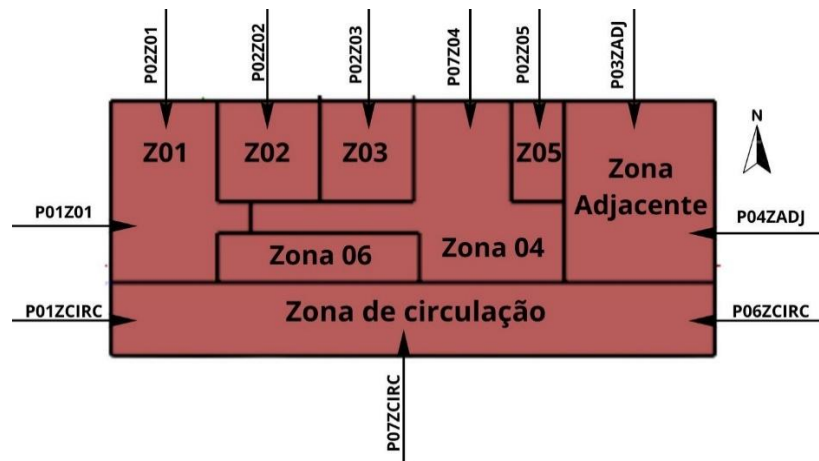


Figura 14 - Referenciamento das paredes externas e suas nomenclaturas.

Fonte: Elaboração da autora, 2025.

A análise foi realizada inicialmente com a simulação do modelo-base (arquétipo), ou seja, sem a presença de elementos do entorno urbano ou sombreamento. Esta etapa permitiu a identificação do comportamento térmico das superfícies da edificação em condição isolada, servindo como parâmetro de comparação para as simulações seguintes. Verificou-se que, no tocante à radiação de onda longa — conforme apresentado na Tabela 09 —, ocorreram variações expressivas nas trocas térmicas líquidas, cujos valores médios variaram entre $-29,61 \text{ W/m}^2$ e $-34,02 \text{ W/m}^2$. Os fluxos máximos ultrapassaram 30 W/m^2 , evidenciando o ganho de calor em certos momentos do dia, enquanto os valores mínimos alcançaram $-126,44 \text{ W/m}^2$, indicando perdas relevantes de calor, principalmente no período da noite.

Na sequência, os resultados da simulação com a inserção de elementos sombreadores (considerando apenas a radiação de onda curta) mostram a diferença que a inserção do entorno urbano causa no modelo estudado. Entre as superfícies

analisadas, destaca-se P01Z01PAVTO01, localizada no 1º pavimento, zona 01. Esta superfície, mais próxima do solo e dos edifícios adjacentes, apresenta uma média de $-9,84 \text{ W/m}^2$ e uma perda mínima de $-36,30 \text{ W/m}^2$, sendo uma das menos negativas da amostra. Esse comportamento sugere que, apesar de estar em uma zona mais sombreada, a proximidade com as massas edificadas vizinhas contribui para um maior bloqueio do céu.

Em contraste, as superfícies localizadas em pavimentos superiores, como P01Z01PAVTO11, P02Z03PAVTO11 e P07Z04PAVTO11 (11º pavimento), exibem os valores médios mais negativos (entre $-17,41 \text{ W/m}^2$ e $-17,79 \text{ W/m}^2$) e perdas mínimas que chegam a $-86,69 \text{ W/m}^2$. Esses resultados indicam maior exposição ao céu e, portanto, maior emissão líquida de radiação de onda longa, especialmente durante a noite, quando a edificação perde calor para um céu frio e pouco obstruído.

Tabela 09 - Resultados [W/m^2] por superfícies externas, radiação de onda longa. Comparação entre simulação sem elementos sombreadores e com elementos sombreadores.

Zona térmica	Simulação Sem Elementos Sombreadores			Simulação Com Elementos Sombreadores		
	Mínima	Média	Máxima	Mínima	Média	Máxima
P01Z01PAVTO01	-125,60	-29,91	29,24	-36,30	-09,84	42,49
P02Z01PAVTO01	-113,11	-30,97	30,09	-52,70	-10,06	45,78
P01Z01PAVTO06	-121,16	-30,05	29,57	-37,57	-11,55	42,55
P02Z01PAVTO06	-107,28	-30,45	30,42	-58,40	-12,10	44,70
P01Z01PAVTO11	-126,44	-29,61	29,85	-43,12	-12,78	42,41
P02Z01PAVTO11	-106,86	-29,85	30,70	-82,67	-14,78	43,49
P02Z02PAVTO01	-115,92	-32,26	30,09	-56,00	-08,66	45,18
P02Z02PAVTO06	-111,44	-31,96	30,41	-59,61	-12,15	43,98
P02Z02PAVTO11	-107,07	-30,91	30,73	-82,56	-16,13	42,41
P02Z03PAVTO01	-116,64	-32,65	30,09	-61,28	-11,48	44,80
P02Z03PAVTO06	-112,20	-32,41	30,40	-62,82	-14,23	43,52
P02Z03PAVTO11	-109,78	-31,11	30,69	-85,88	-17,41	41,86
P07Z04PAVTO01	-116,17	-32,39	30,09	-60,92	-12,19	43,94
P07Z04PAVTO06	-111,52	-32,29	30,40	-64,07	-14,62	43,16
P07Z04PAVTO11	-109,40	-31,05	30,68	-86,31	-17,76	41,55
P02Z05PAVTO01	-119,20	-34,02	30,07	-59,50	-11,97	44,65
P02Z05PAVTO06	-116,08	-33,62	30,38	-62,05	-13,79	44,31
P02Z05PAVTO11	-111,73	-32,00	30,68	-86,69	-17,79	42,55

Fonte: Elaboração da autora a partir de dados simulados no EnergyPlus, 2025.

A Tabela 10 apresenta os valores mínimos, médios e máximos da radiação líquida de onda longa por unidade de área (W/m^2) nas superfícies externas simuladas com a metodologia aplicada, que incorporou dados de radiação de onda longa emitida pelo entorno urbano real.

A superfície P02Z05PAVTO11, no 11º pavimento, registrou a maior média da amostra ($-16,77 W/m^2$) e a maior perda pontual ($-86,64 W/m^2$), reforçando o padrão observado na simulação anterior. Por outro lado, a superfície P01Z01PAVTO01, situada no 1º pavimento e fortemente influenciada pelo entorno imediato (edificações vizinhas), apresentou a menor perda média ($-7,46 W/m^2$) e um valor mínimo significativamente menos negativo ($-31,78 W/m^2$), indicando que a presença do entorno reduz a perda de calor por radiação ao fornecer superfícies que reemitem calor ao longo do dia e da noite.

Tabela 10 - Resultados [W/m²] por superfícies externas, radiação de onda longa. Comparação entre todas as simulações.

Zona térmica	Simulação Sem			Simulação Com			Simulação Com		
	Elementos Sombreadores			Elementos Sombreadores			Radiação de Onda Longa no Entorno		
	Mín.	Méd.	Máx.	Mín.	Méd.	Máx.	Mín.	Méd.	Máx.
P01Z01PAVTO01	-125,60	-29,91	29,24	-36,30	-09,84	42,49	-31,78	-07,46	21,26
P02Z01PAVTO01	-113,11	-30,97	30,09	-52,70	-10,06	45,78	-52,46	-09,84	35,54
P01Z01PAVTO06	-121,16	-30,05	29,57	-37,57	-11,55	42,55	-33,50	-08,69	21,49
P02Z01PAVTO06	-107,28	-30,45	30,42	-58,40	-12,10	44,70	-56,20	-11,65	35,67
P01Z01PAVTO11	-126,44	-29,61	29,85	-43,12	-12,78	42,41	-38,78	-09,58	21,60
P02Z01PAVTO11	-106,86	-29,85	30,70	-82,67	-14,78	43,49	-83,45	-13,95	33,92
P02Z02PAVTO01	-115,92	-32,26	30,09	-56,00	-08,66	45,18	-55,41	-08,34	35,98
P02Z02PAVTO06	-111,44	-31,96	30,41	-59,61	-12,15	43,98	-58,87	-11,46	34,23
P02Z02PAVTO11	-107,07	-30,91	30,73	-82,56	-16,13	42,41	-82,70	-15,39	33,91
P02Z03PAVTO01	-116,64	-32,65	30,09	-61,28	-11,48	44,80	-60,79	-11,07	34,77
P02Z03PAVTO06	-112,20	-32,41	30,40	-62,82	-14,23	43,52	-61,87	-13,55	34,72
P02Z03PAVTO11	-109,78	-31,11	30,69	-85,88	-17,41	41,86	-85,73	-16,27	32,65
P07Z04PAVTO01	-116,17	-32,39	30,09	-60,92	-12,19	43,94	-60,16	-11,71	34,99
P07Z04PAVTO06	-111,52	-32,29	30,40	-64,07	-14,62	43,16	-63,43	-13,81	33,58
P07Z04PAVTO11	-109,40	-31,05	30,68	-86,31	-17,76	41,55	-85,58	-16,69	33,22
P02Z05PAVTO01	-119,20	-34,02	30,07	-59,50	-11,97	44,65	-58,99	-11,54	34,66
P02Z05PAVTO06	-116,08	-33,62	30,38	-62,05	-13,79	44,31	-61,38	-13,23	35,36
P02Z05PAVTO11	-111,73	-32,00	30,68	-86,69	-17,79	42,55	-86,64	-16,77	33,19

Fonte: Elaboração da autora a partir de dados simulados no EnergyPlus, 2025.

Comparando com os dados da simulação com elementos do entorno, tanto com elementos sombreadores tanto quanto com radiação de onda longa, observa-se que a simulação com a radiação de onda longa nos elementos de entorno (metodologia aplicada), resultou em valores máximos consideravelmente menores, como em P01Z01PAVTO11, que passou de +42,41 W/m² para +21,60 W/m². Isso indica que, com a inserção de dados mais realistas do entorno (e sua temperatura radiativa efetiva), houve uma redução na intensidade das trocas radiativas positivas, provavelmente porque a radiação emitida pelos elementos urbanos vizinhos é mais estável e menos intensa do que as idealizações assumidas na simulação com elementos geométricos apenas.

Um aspecto central que emerge desses resultados é a influência da Ilha de Calor Urbana (ICU) sobre o comportamento térmico das superfícies externas. A ICU é caracterizada pelo acúmulo e reemissão de calor em áreas urbanizadas, especialmente em função da substituição de superfícies naturais por materiais com alta capacidade de armazenamento térmico (asfalto, concreto, alvenaria) e pela redução da vegetação. Essa dinâmica intensifica a temperatura média do ar e das superfícies nas áreas densamente construídas, afetando diretamente o balanço radiativo das edificações.

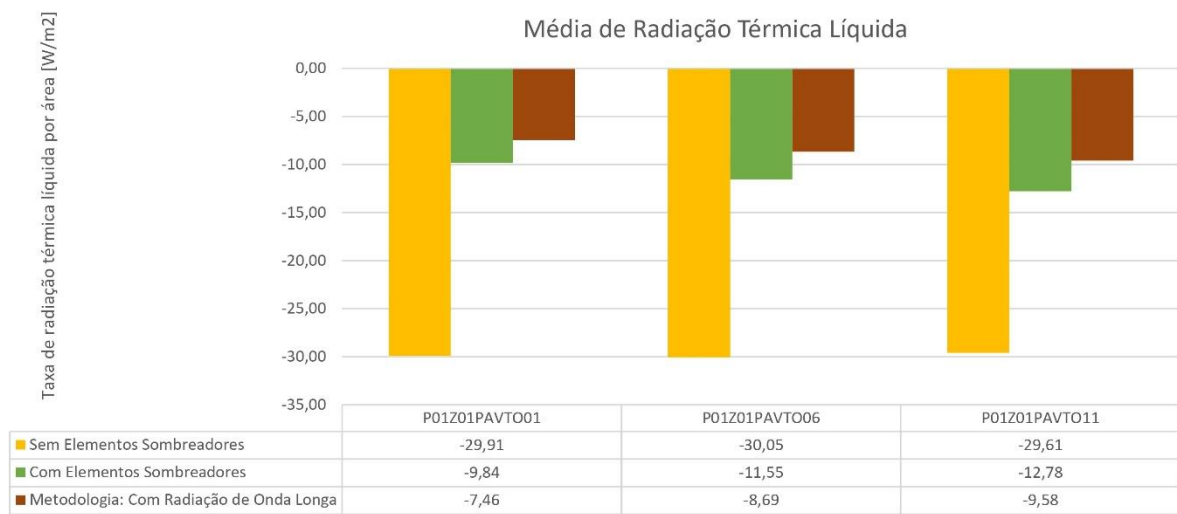


Gráfico 01 - Taxa média de radiação térmica líquida por área, zona um [W/m²].

Fonte: Elaboração da autora a partir de dados simulados no EnergyPlus, 2025.

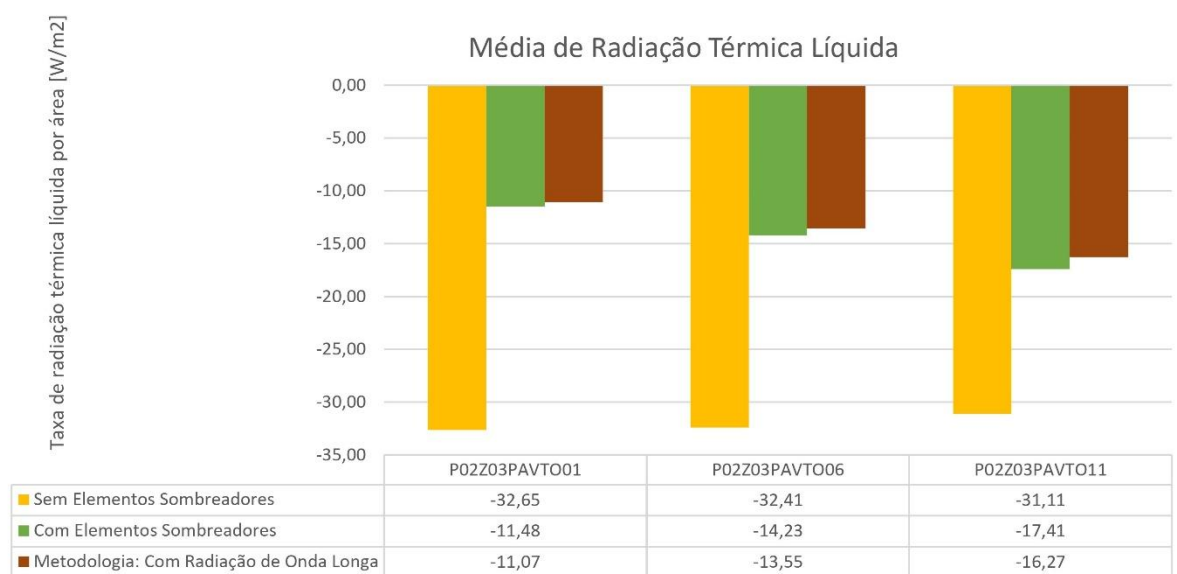


Gráfico 02 - Taxa média de radiação térmica líquida por área, zona três [W/m²].

Fonte: Elaboração da autora a partir de dados simulados no EnergyPlus, 2025.

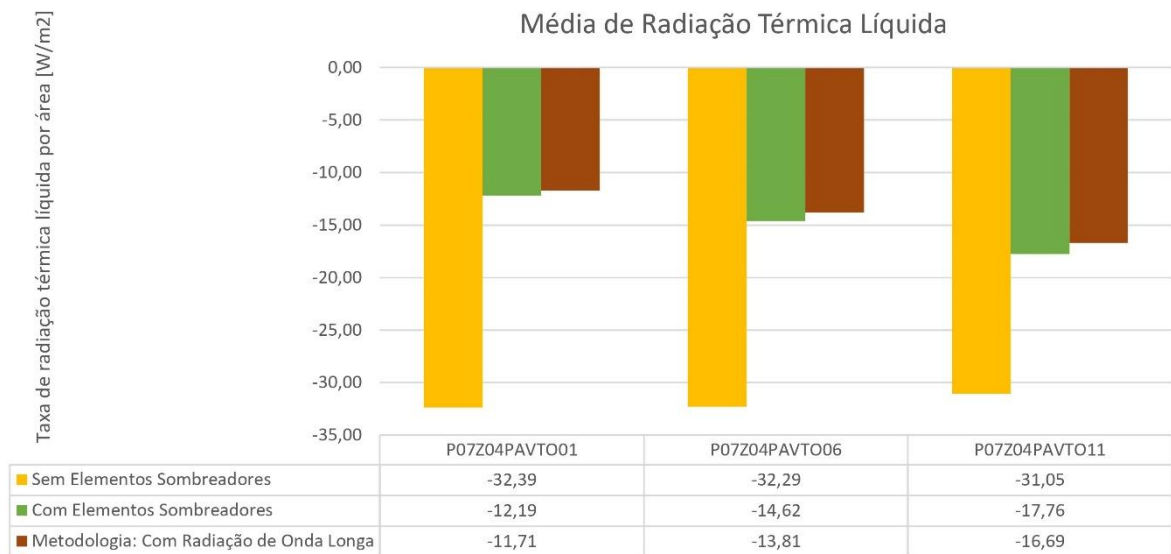


Gráfico 03 - Taxa média de radiação térmica líquida por área, zona quatro [W/m²].

Fonte: Elaboração da autora a partir de dados simulados no EnergyPlus, 2025.

Assim, os resultados indicam que a metodologia aplicada é sensível à presença da Ilha de Calor Urbana, e sua consideração é fundamental para avaliações termoenergéticas mais realistas. Ao incluir o efeito da radiação de onda longa emitida pelo entorno, torna-se possível quantificar melhor o impacto da densidade urbana e da morfologia do tecido urbano sobre o conforto térmico e o desempenho energético das edificações residenciais.

5.2.1 Dia Típico de Verão e Dia Típico de Inverno

A análise das cargas térmicas nos pavimentos 01, 06 e 11 da edificação, considerando dias típicos de verão e inverno - 22 de dezembro e 21 de junho, respectivamente -, utilizando a variável *Surface Inside Face Net Surface Thermal Radiation Heat Gain Rate per Area [W/m²]*, permitiu compreender os efeitos do entorno urbano e dos elementos sombreadores sobre o comportamento térmico das diferentes zonas ao longo das 24 horas do dia. As zonas térmicas foram simuladas no *software* EnergyPlus, e os resultados revelam padrões distintos entre os pavimentos, entre as simulações e entre as estações.

A análise das superfícies externas do edifício durante o dia típico de verão, na simulação sem elementos sombreadores, revela uma significativa variação da carga

térmica incidente ao longo do dia, com picos expressivos no período da tarde. As magnitudes das trocas de calor por radiação (representadas em W/m^2) são negativas, indicando perda de calor das superfícies para o meio externo. Durante a madrugada e início da manhã (entre 01h e 08h), os valores se mantêm relativamente constantes, com oscilações em torno de -15 a -22 W/m^2 , sinalizando uma estabilidade térmica nesse intervalo. A partir das 09h, observa-se um aumento gradual nas perdas, com destaque para os horários entre 13h e 18h, em que os valores atingem os maiores picos negativos, especialmente em superfícies como P01Z01PAVTO06 e P01Z01PAVTO11, chegando a $-90,97$ W/m^2 e $-84,79$ W/m^2 às 17h, respectivamente. Isso evidencia a intensa exposição à radiação solar nessas fachadas, agravada pela ausência de dispositivos de sombreamento, o que acentua o ganho térmico no interior do edifício. A partir das 19h, os valores voltam a diminuir em magnitude, refletindo a redução da radiação solar e o início do resfriamento noturno.

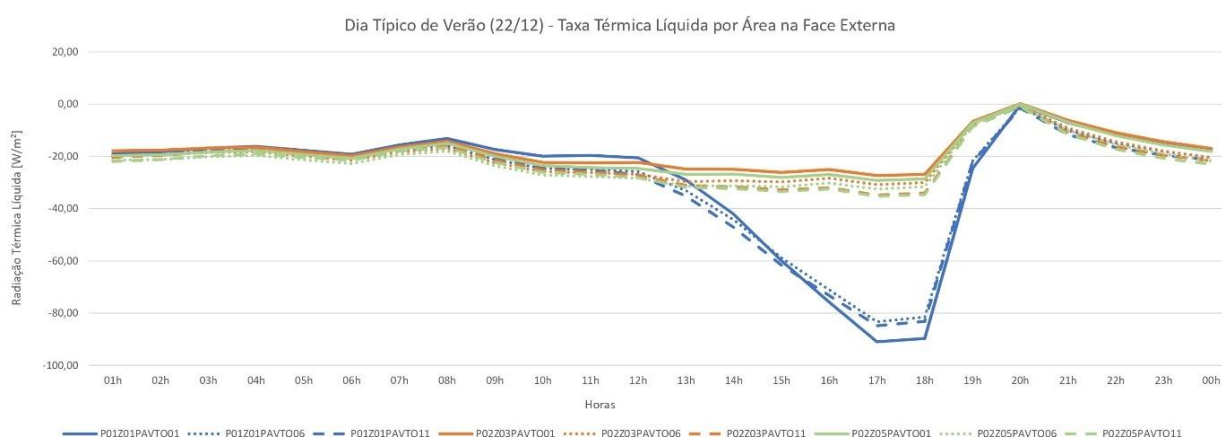


Gráfico 04 - Radiação térmica líquida por área na face externa em diferentes pavimentos e zonas térmicas no dia típico de verão (22/12), simulação do modelo sem elementos sombreadores ao entorno. Fonte: Elaboração da autora a partir de dados simulados no EnergyPlus (2025).

Já a análise da irradiância superficial externa ao longo do dia típico de verão, com a presença de elementos sombreadores, revela um comportamento dinâmico e distinto entre as diversas superfícies do edifício. Durante as primeiras horas da madrugada até o amanhecer (01h às 06h), os valores de irradiância se mantêm predominantemente negativos, indicando uma forte influência da radiação refletida e difusa com baixa incidência solar direta, em virtude da ausência de luz solar direta nesse período. A partir do início da manhã (07h), observa-se um aumento gradual na

irradiância, ainda que os valores permaneçam majoritariamente negativos ou próximos de zero, refletindo o efeito mitigador dos sombreadores que reduzem significativamente a exposição direta à radiação solar nas fachadas. Entre 08h e 18h, horário de maior incidência solar, os valores negativos se intensificam, atingindo picos de até $-37,03 \text{ W/m}^2$ em determinadas superfícies às 18h, demonstrando a eficácia dos dispositivos de sombreamento na redução da carga térmica transmitida às superfícies externas. Já ao entardecer e início da noite (19h às 21h), verifica-se uma transição para valores positivos em algumas superfícies, indicando a redução do efeito sombreador e o impacto da radiação solar refletida e difusa, conforme a orientação e posicionamento das fachadas

Considerando a simulação realizada com a metodologia aplicada que inclui a radiação de onda longa proveniente do entorno urbano, revela variações significativas na carga térmica ao longo do dia. Durante as primeiras horas da manhã (01h às 06h), as superfícies apresentam cargas negativas, indicando predominância de perdas térmicas, com valores próximos a -10 W/m^2 , refletindo o resfriamento noturno. A partir das 07h, observa-se uma rápida transição para valores menos negativos e, a partir das 08h, algumas superfícies atingem valores próximos de zero ou positivos, sugerindo o início do ganho térmico devido à incidência solar direta e ao aumento da radiação ambiente. No período da tarde, entre 13h e 18h, as superfícies registram as maiores cargas térmicas negativas, com picos que ultrapassam -20 W/m^2 , evidenciando a forte influência do entorno urbano na radiação de onda longa. Essa tendência é especialmente perceptível nas simulações que consideram o entorno urbano com a inclusão da radiação de onda longa e curta (linhas azuis), que apresentam valores mais negativos em comparação às simulações que consideram apenas a radiação de onda curta (linhas laranjas). Observa-se que o acréscimo da radiação de onda longa não apenas intensifica o armazenamento térmico nas superfícies externas, como também evidencia um gradiente vertical na distribuição de calor. O pavimento térreo (linhas contínuas) tende a apresentar maior acúmulo térmico devido à presença de superfícies vizinhas próximas e com maior obstrução ao céu noturno, reduzindo a dissipação radiativa. Esse fenômeno está alinhado ao conceito de *sky view factor* (OKE, 1981), que se mostra reduzido nas zonas mais adensadas, promovendo acúmulo térmico mais persistente, enquanto os pavimentos mais elevados (linhas pontilhadas e tracejadas) registram variações menos intensas,

possivelmente em razão da menor obstrução por elementos adjacentes. À noite (19h às 00h), a maioria das superfícies voltam a apresentar cargas térmicas próximas de zero ou ligeiramente positivas, associadas ao aquecimento residual do ambiente e à radiação urbana refletida, especialmente em fachadas voltadas para as regiões mais densas do entorno.

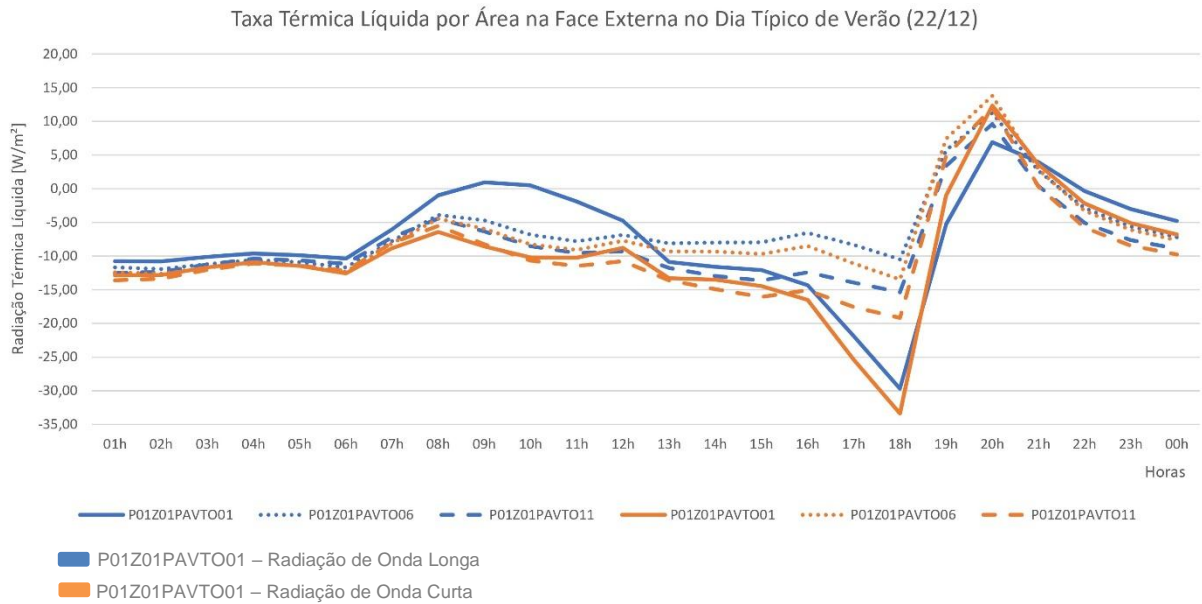


Gráfico 05 - Radiação térmica líquida [W/m²] no dia típico de verão (22/12), zona um.

Fonte: Elaboração da autora a partir de dados simulados no EnergyPlus (2025).

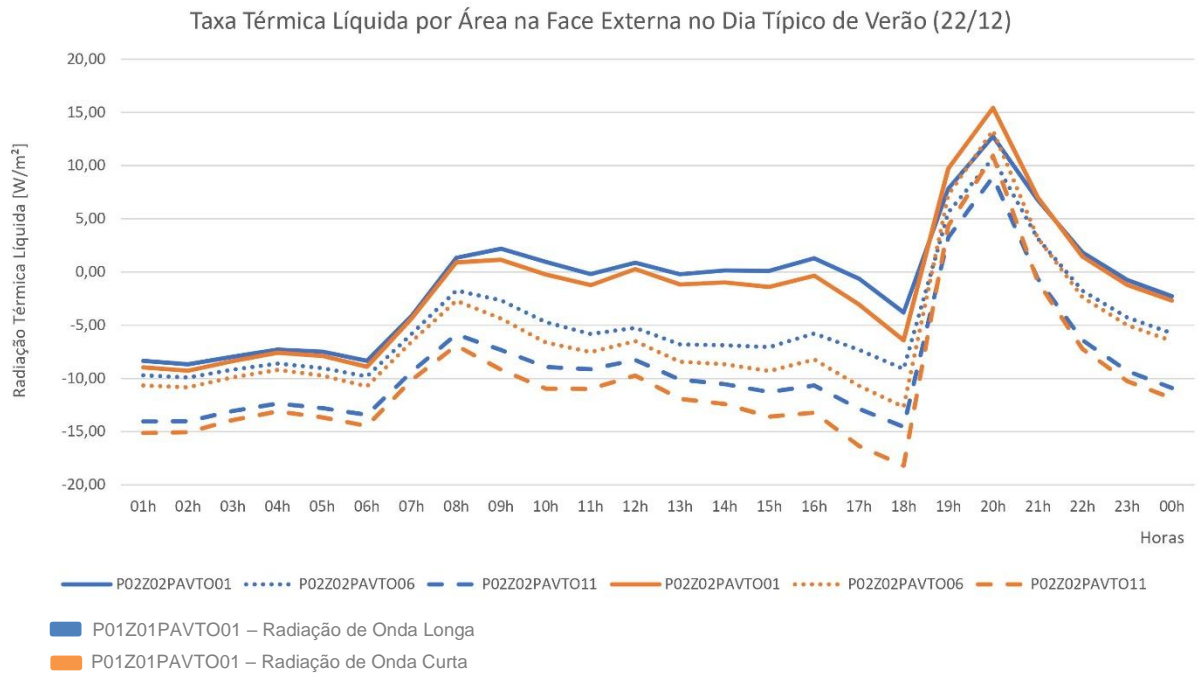


Gráfico 06 - Radiação térmica líquida [W/m²] no dia típico de verão (22/12), zona dois.

Fonte: Elaboração da autora a partir de dados simulados no EnergyPlus (2025).

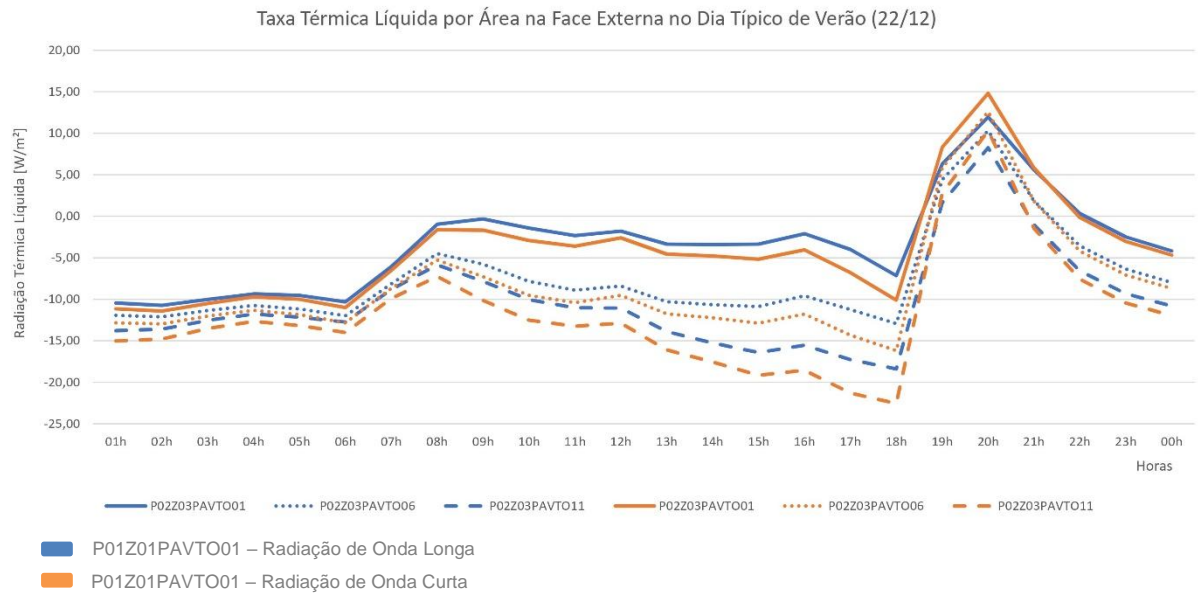


Gráfico 07 - Radiação térmica líquida [W/m²] no dia típico de verão (22/12), zona três.

Fonte: Elaboração da autora a partir de dados simulados no EnergyPlus (2025).

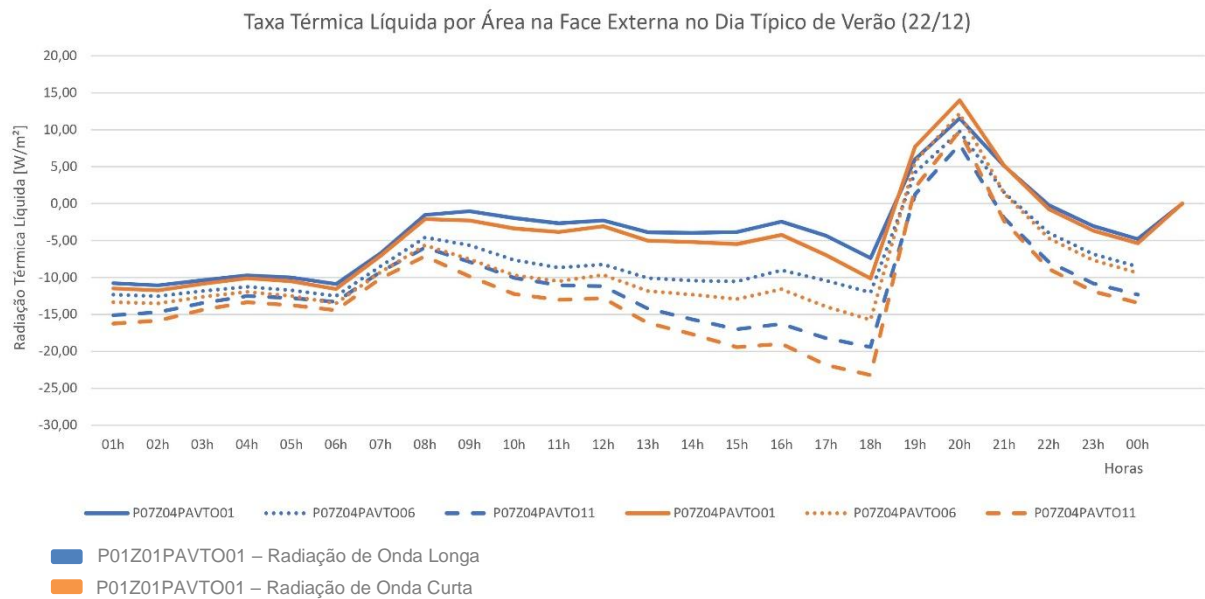


Gráfico 08 - Radiação térmica líquida [W/m²] no dia típico de verão (22/12), zona quatro.

Fonte: Elaboração da autora a partir de dados simulados no EnergyPlus (2025).

Foi realizada uma análise comparativa entre as três simulações nos horários de 07h, 12h e 19h, com o objetivo de verificar as variações das cargas térmicas em W/m² em diferentes períodos do dia. Esses horários foram escolhidos para representar momentos-chave do ciclo diário: o início da manhã, o pico da radiação solar ao meio-dia e o início da noite. A comparação possibilitou identificar como a radiação de onda longa do entorno urbano e as condições climáticas influenciam o comportamento térmico das superfícies externas ao longo do dia, evidenciando as diferenças de ganho e perda de calor que impactam diretamente no desempenho energético do edifício e no conforto ambiental dos seus ocupantes.

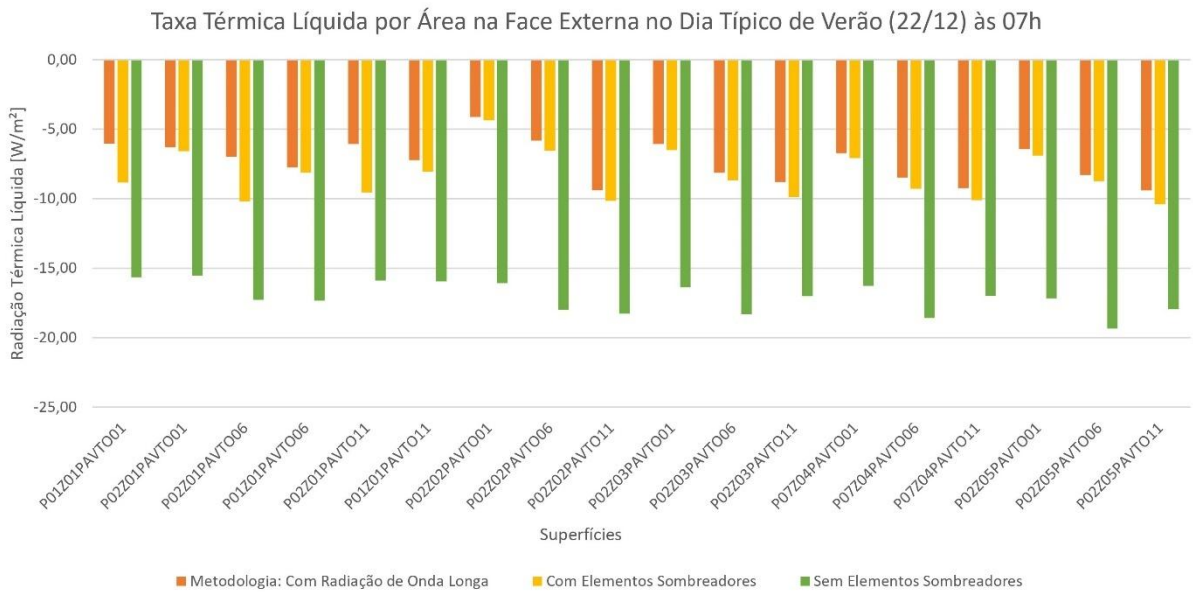


Gráfico 09 - Radiação térmica líquida [W/m²] no dia típico de verão (22/12) às 07h.

Fonte: Elaboração da autora a partir de dados simulados no EnergyPlus (2025).

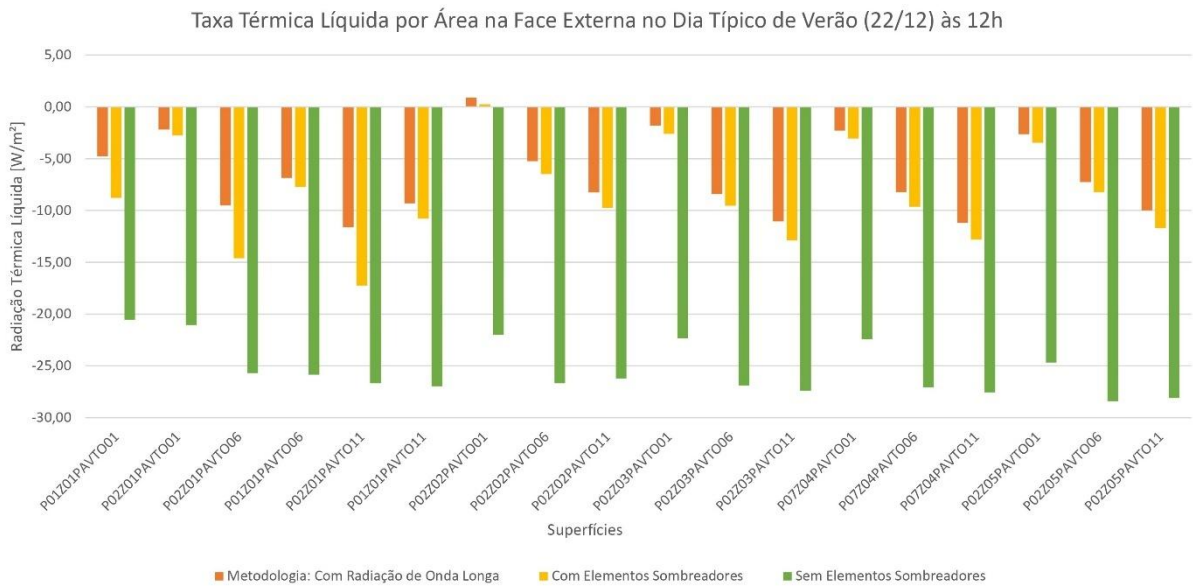


Gráfico 10 - Radiação térmica líquida [W/m²] no dia típico de verão (22/12) às 12h.

Fonte: Elaboração da autora a partir de dados simulados no EnergyPlus (2025).

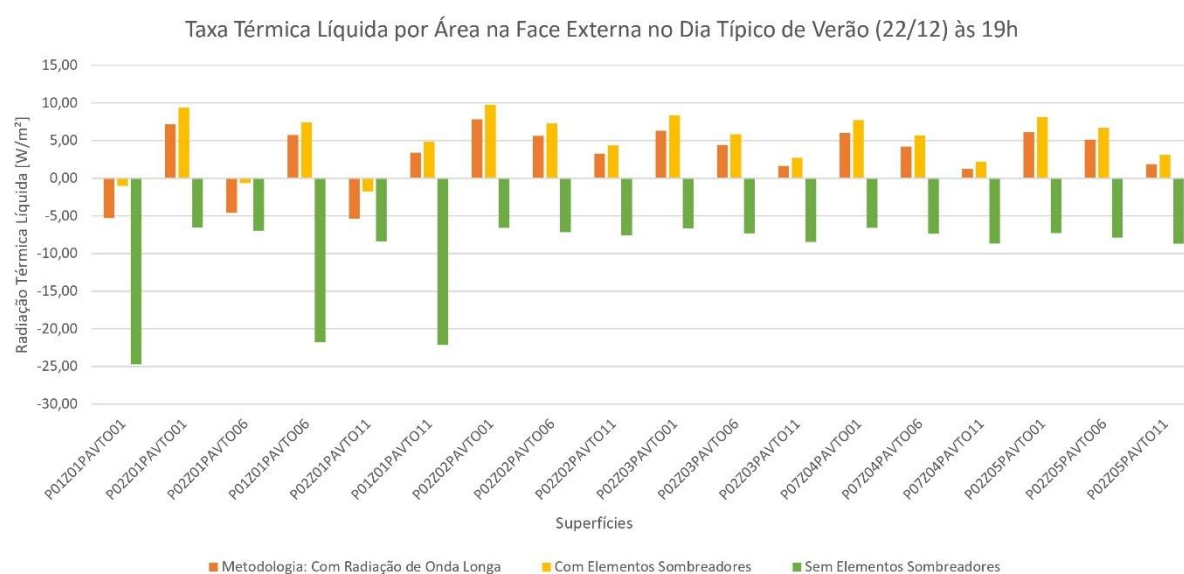


Gráfico 11 - Radiação térmica líquida [W/m²] no dia típico de verão (22/12) às 19h.

Fonte: Elaboração da autora a partir de dados simulados no EnergyPlus (2025).

Apesar de a simulação com radiação de onda longa apresentar menores perdas térmicas nas superfícies externas às 07h e às 12h, esse comportamento está relacionado à troca de calor entre os edifícios e o entorno urbano, característica comum em áreas densamente construídas. Essa troca contribui para manter as superfícies mais aquecidas, o que pode ser benéfico em momentos de menor incidência de radiação solar direta. No entanto, quando analisada em escala urbana, essa dinâmica também intensifica o fenômeno das ilhas de calor urbanas, ao dificultar o resfriamento natural do ambiente — sobretudo durante a noite, como evidenciado no Gráfico 11, em que as superfícies, em vez de perderem calor, continuam absorvendo energia térmica. À noite ou em dias muito quentes, essa troca contínua impede a dissipação do calor acumulado durante o dia, mantendo tanto as superfícies quanto o ar mais aquecidos. Isso resulta em maior desconforto térmico e aumento no consumo de energia com sistemas de resfriamento, como o ar-condicionado, caracterizando o efeito das Ilhas de Calor Urbanas (ICU). Assim, ainda que a radiação de onda longa possa mitigar perdas térmicas pontuais, ela representa um fator relevante no aumento da temperatura média das cidades, com impactos negativos tanto no conforto ambiental quanto no desempenho energético das edificações.

Continuando à análise, a simulação referente ao dia típico de inverno (21 de junho) foi inicialmente realizada sem a inserção de elementos sombreadores, de forma a avaliar a radiação incidente direta sobre as superfícies externas do edifício ao longo

das 24 horas. Esse cenário permite compreender, com maior nitidez, a exposição solar natural das fachadas e coberturas em condições inalteradas, revelando os horários de maior ganho térmico e o desempenho termoenergético das superfícies no período de inverno, caracterizado por menores ângulos solares e dias mais curtos. A análise dos dados obtidos fornece subsídios importantes para o entendimento da influência do entorno urbano e da orientação solar no comportamento térmico da edificação, especialmente no que tange à necessidade de estratégias passivas de aquecimento.

Com base no Gráfico 12, observou-se que, durante a madrugada e o início da manhã (entre 01h e 08h), as superfícies externas apresentaram valores negativos de fluxo de calor superficial, indicando perda de calor para o ambiente externo — um comportamento típico em dias frios, especialmente em superfícies expostas ao céu noturno. A partir das 09h, os valores diminuem consideravelmente, com exceção da superfície P01Z01PAVTO001, que apresentou perdas mais amenas entre 08h e 17h. As demais superfícies registraram picos negativos entre 12h e 14h, com destaque para a superfície identificada como P02Z05PAVTO01, que alcançou $-104,33 \text{ W/m}^2$ às 14h. A partir das 15h, há uma elevação gradual desses valores, até que, no final da tarde e início da noite, os fluxos voltam a uma taxa acima de -50 W/m^2 , contudo, acompanha a queda da temperatura e ausência de radiação solar. O comportamento geral dos dados evidencia a relevância do posicionamento solar mesmo no inverno, com impacto significativo sobre as cargas térmicas das superfícies externas ao longo do dia.

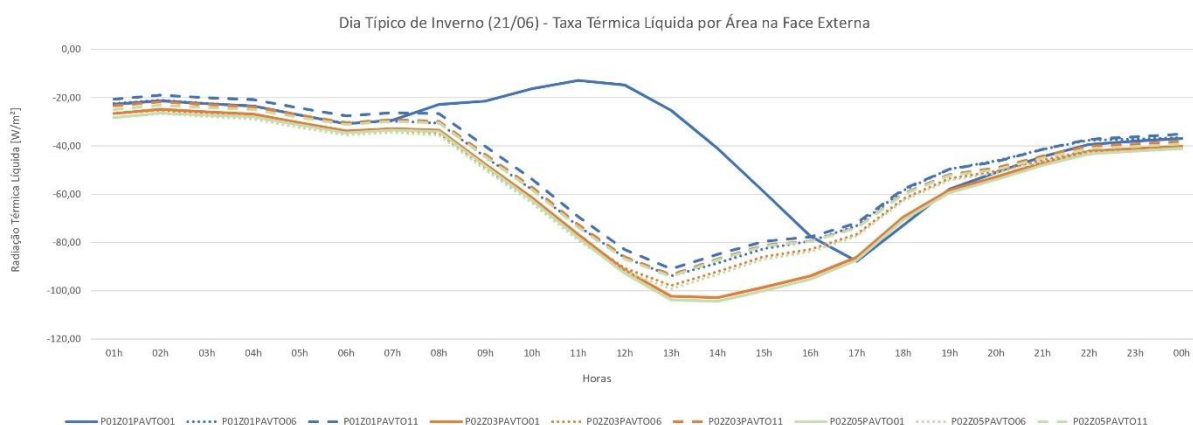


Gráfico 12 - Radiação térmica líquida por área na face externa em diferentes pavimentos e zonas térmicas no dia típico de inverno (21/06), simulação do modelo sem elementos sombreadores ao entorno.

Fonte: Elaboração da autora a partir de dados simulados no EnergyPlus (2025).

Considerando a presença de elementos sombreadores (radiação de onda curta), evidencia-se um comportamento característico da radiação solar incidente ao longo do dia. Durante a madrugada e nas primeiras horas da manhã (entre 01h e 07h), os valores se mantêm negativos em todas as superfícies, indicando perda de calor por radiação para o céu noturno. A partir das 08h, observa-se um aumento gradual da incidência solar, ainda que moderada devido à baixa altura solar típica do inverno. O pico de ganho solar ocorre por volta das 11h e 12h apenas em algumas superfícies voltadas para direções mais favoráveis (como as fachadas oeste e norte), com valores positivos em poucas zonas (ex: P01Z01PAVTO01 e P02Z01PAVTO01), o que sugere algum recebimento de radiação direta antes que os efeitos dos sombreamentos se intensifiquem. Após esse período, nota-se uma acentuada queda nos valores, com as superfícies voltando a registrar valores negativos ou fortemente reduzidos, em especial nas zonas superiores e mais expostas (como P02Z01PAVTO11 e P02Z02PAVTO11), resultado direto da atuação dos dispositivos de sombreamento e da variação angular do sol. No período vespertino e noturno, os valores permanecem negativos, indicando novamente predominância da perda de calor.

A análise da radiação líquida nas superfícies externas do edifício durante o dia típico de inverno, conforme a simulação realizada com a modelagem termoenergética da metodologia aplicada, revela o impacto significativo dos elementos do entorno na dinâmica energética das fachadas. Observa-se que, nas primeiras horas do dia (entre 01h e 07h), os valores de fluxo de calor superficial líquida permanecem negativos em todas as superfícies, variando entre aproximadamente -10 W/m^2 e -20 W/m^2 , o que indica perda de calor para o ambiente externo. À medida que o sol se eleva, há um breve aumento da radiação incidente, com algumas superfícies apresentando valores positivos entre 10h e 12h, especialmente aquelas mais expostas à radiação direta, como P01Z01PAVTO01 e P02Z01PAVTO01, sugerindo algum ganho solar momentâneo. No entanto, grande parte das superfícies continuam a registrar valores acentuadamente negativos no período entre 12h e 16h, como P02Z02PAVTO11 e P02Z03PAVTO11, que chegam a apresentar perdas superiores a -60 W/m^2 . Esse comportamento evidencia a influência expressiva dos elementos do entorno urbano na redução do ganho solar durante o inverno, o que, por sua vez, contribui para a diminuição do conforto térmico passivo. Ressalta-se, portanto, a importância de considerar as zonas térmicas e os obstáculos do entorno na simulação

termoenergética para estimativas mais precisas do desempenho ambiental das edificações.

É importante notar que os valores obtidos com a simulação que computa a radiação de onda longa emitida pelos edifícios do entorno apresentam menores perdas térmicas nas superfícies externas, especialmente na superfície P01Z01PAVTO01. Esse comportamento remete à influência do entorno urbano denso, que contribui para um maior acúmulo de calor nas fachadas por meio da troca de radiação térmica entre as edificações. Tal troca reduz a perda de calor por radiação nos períodos mais frios do dia, como observado nas primeiras horas da manhã e ao final da tarde. Esse fenômeno evidencia o papel da radiação de onda longa na modulação do balanço térmico superficial.

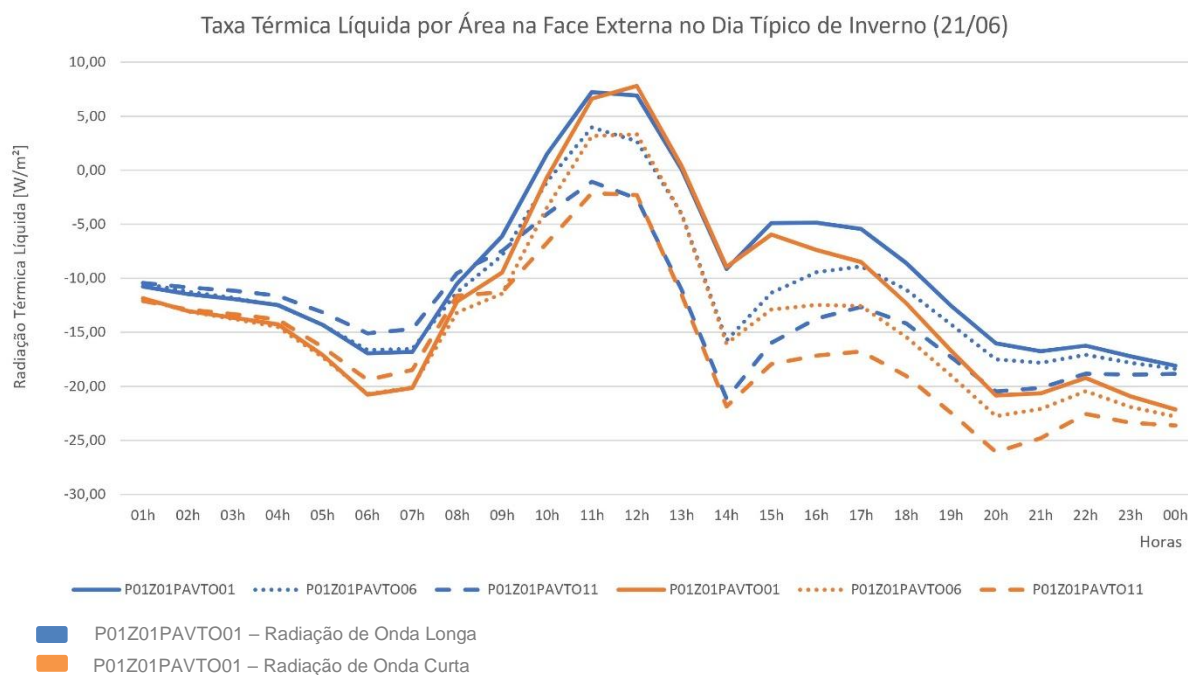


Gráfico 13 - Radiação térmica líquida [W/m²] no dia típico de inverno (21/06), zona um.

Fonte: Elaboração da autora a partir de dados simulados no EnergyPlus (2025).

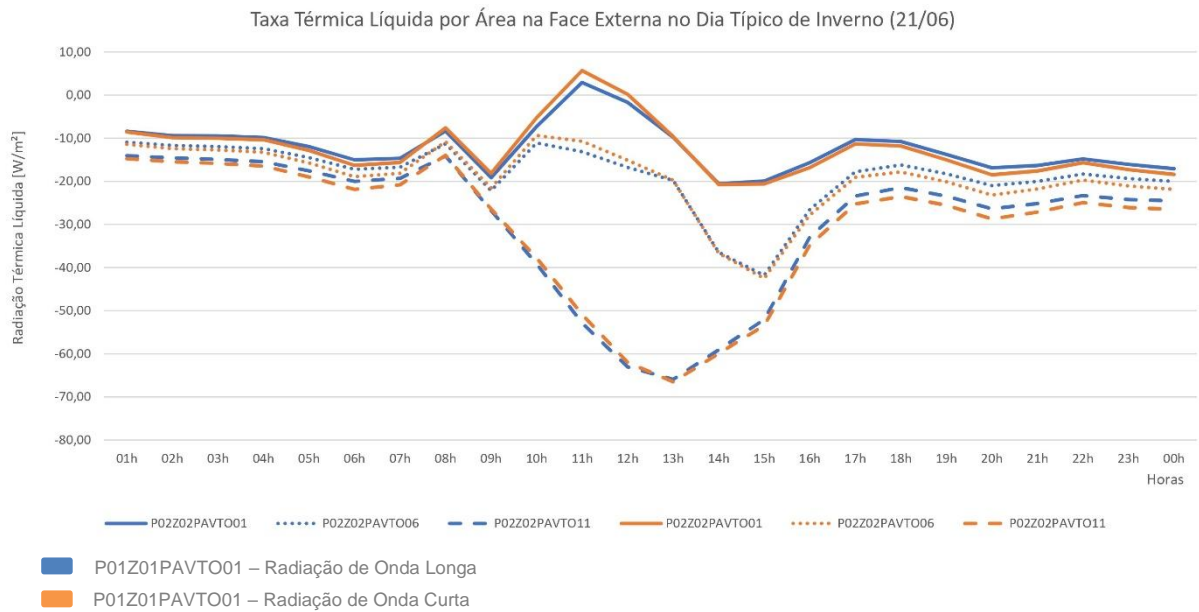


Gráfico 14 - Radiação térmica líquida [W/m²] no dia típico de inverno (21/06), zona dois.

Fonte: Elaboração da autora a partir de dados simulados no EnergyPlus (2025).

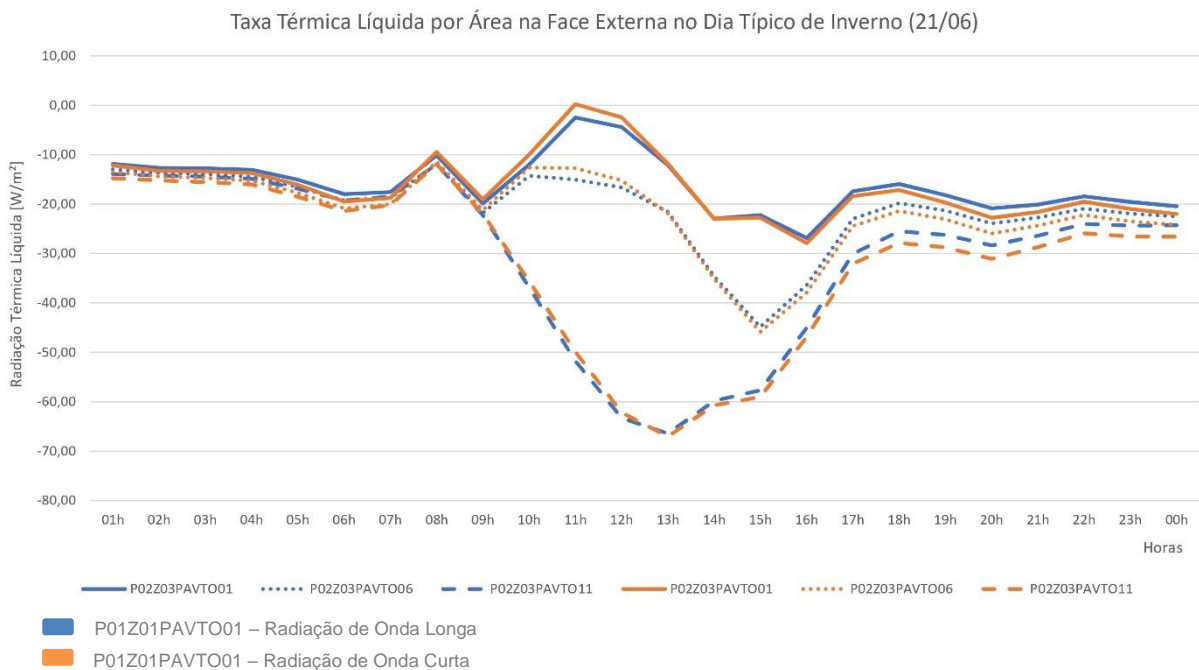


Gráfico 15 - Radiação térmica líquida [W/m²] no dia típico de inverno (21/06), zona três.

Fonte: Elaboração da autora a partir de dados simulados no EnergyPlus (2025).

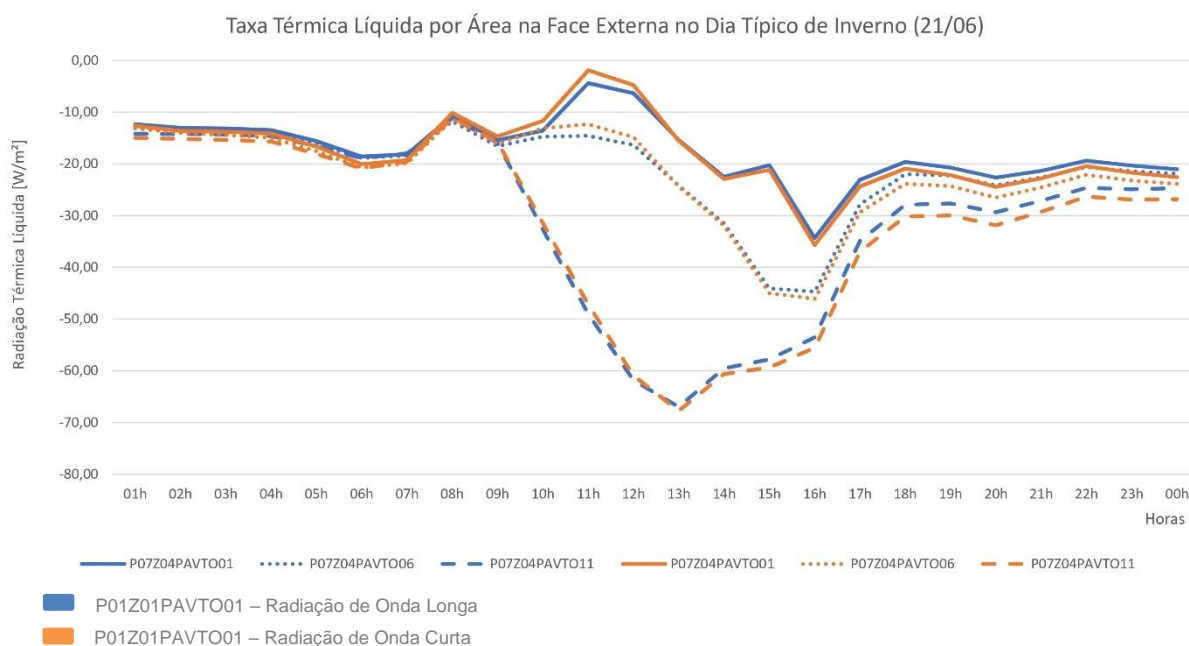


Gráfico 16 - Radiação térmica líquida [W/m²] no dia típico de inverno (21/06), zona quatro.

Fonte: Elaboração da autora a partir de dados simulados no EnergyPlus (2025).

Como no dia típico de verão, também foi realizada uma comparação entre as três simulações desenvolvidas para verificar o impacto do entorno urbano na resposta térmica da edificação durante o dia típico de inverno. Para isso, foram selecionados os horários de 07h, 12h e 19h, representando os períodos da manhã, meio-dia e início da noite, respectivamente. A análise desses momentos permitiu identificar as diferenças significativas na densidade de fluxo térmico (W/m²) nas superfícies externas, evidenciando como o sombreamento e a configuração do entorno influenciam o ganho e a perda de calor da edificação. Observou-se que, especialmente ao meio-dia, a simulação que considera o entorno com radiação de onda longa apresentou valores menores de taxa líquida de radiação térmica. Já nos períodos da manhã e da noite, as variações também ressaltaram o efeito do entorno urbano na modulação térmica, refletindo diferenças importantes que corroboram a existência da Ilha de Calor Urbana, uma vez que as áreas com maior densidade construtiva mostraram maior absorção e retenção de calor.

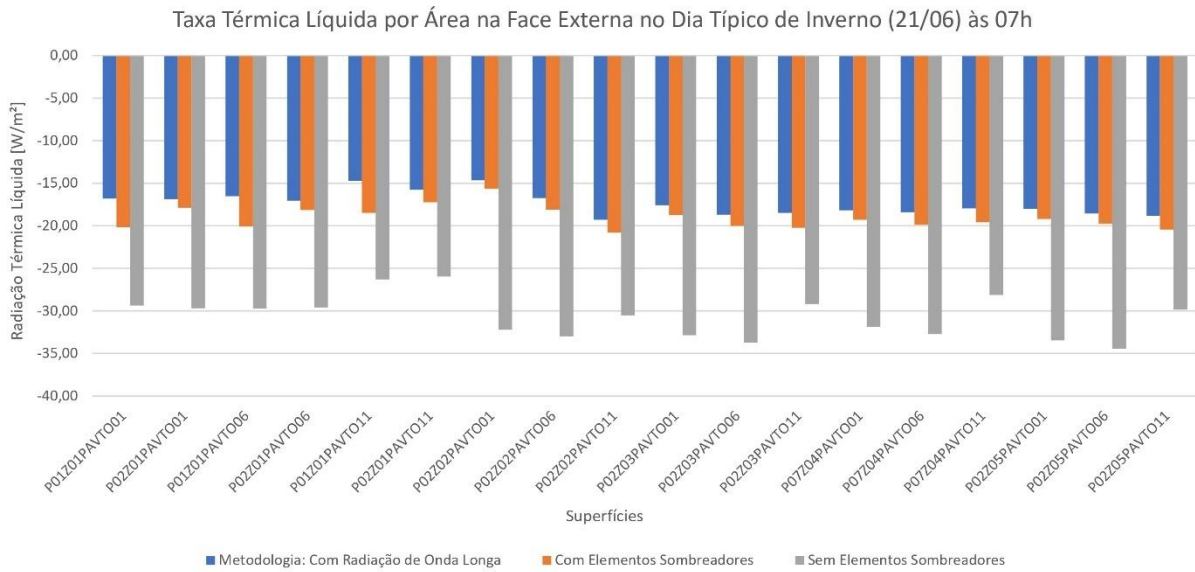


Gráfico 17 - Radiação térmica líquida [W/m²] no dia típico de inverno (21/06) às 07h.

Fonte: Elaboração da autora a partir de dados simulados no EnergyPlus (2025).

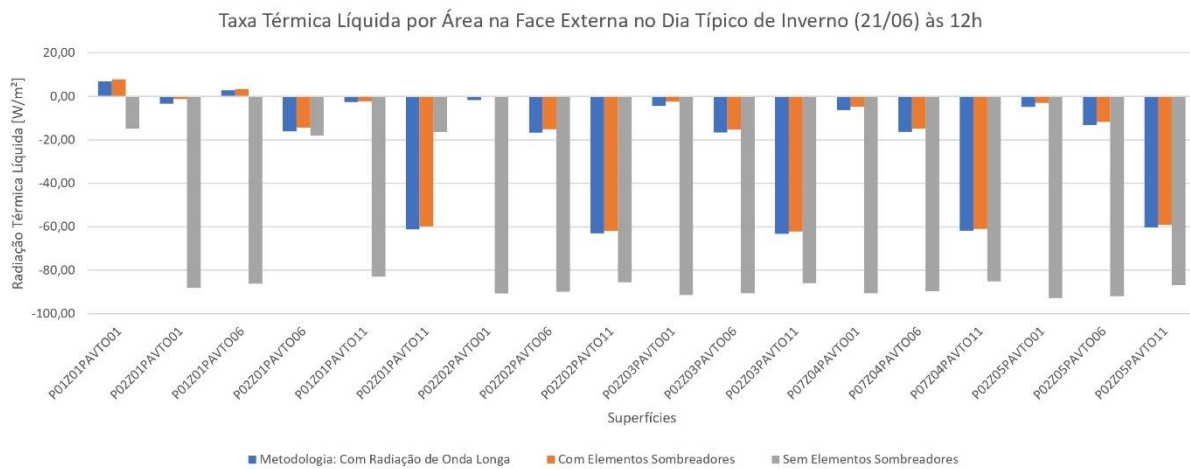


Gráfico 18 - Radiação térmica líquida [W/m²] no dia típico de inverno (21/06) às 12h.

Fonte: Elaboração da autora a partir de dados simulados no EnergyPlus (2025).

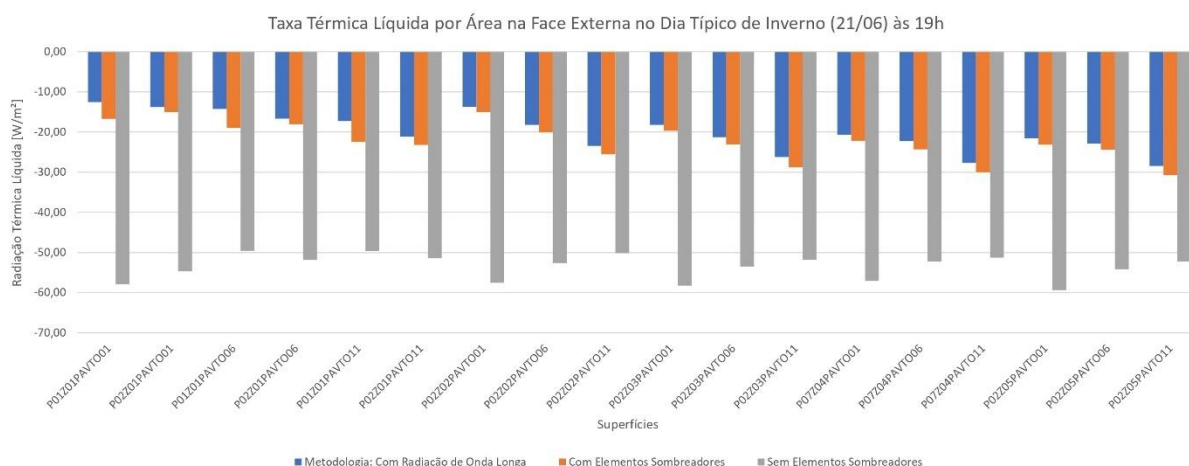


Gráfico 19 - Radiação térmica líquida [W/m²] no dia típico de inverno (21/06) às 07h.

Fonte: Elaboração da autora a partir de dados simulados no EnergyPlus (2025).

Esses resultados reforçam a importância de considerar o entorno urbano na avaliação do desempenho térmico das edificações, sobretudo em regiões com alta densidade construtiva. A metodologia aplicada demonstra ser eficaz para captar as nuances do microclima local e seus efeitos sobre a edificação, permitindo identificar estratégias que podem mitigar os impactos negativos da Ilha de Calor Urbana.

5.3 Horas em Conforto Térmico ao Longo do Ano: *Zone Operative Temperature* [°C]

A avaliação do conforto térmico foi realizada considerando as 8.760 horas que compõem o ano completo, permitindo uma análise detalhada da resposta térmica da edificação em diferentes condições ambientais. Foram comparadas três metodologias de simulação: (i) sem elementos sombreadores, (ii) com elementos sombreadores e (iii) com radiação de onda longa.

A análise do número de horas anuais em que os ambientes na simulação sem elementos sombreadores permaneceram dentro da faixa de conforto térmico — conforme demonstrado na Tabela 10 — evidenciou uma variação significativa entre as zonas avaliadas. Em determinadas áreas, o desempenho foi bastante positivo, como na zona Z01PAVTO01, que registrou, 8.727 horas (100%) em condições confortáveis ao longo do ano.

Já os dados de *Zone Operative Temperature* na simulação com elementos sombreadores reforçam a influência de sombreamento sobre o conforto térmico interno ao longo das horas simuladas. As zonas localizadas nos pavimentos térreos (PAVTO01), que em geral apresentam maior proteção por sombreamento de muros ou da própria volumetria da edificação, registraram os maiores percentuais de horas dentro da faixa de conforto, com destaque para Z04PAVTO01 com 100% das horas simuladas em conforto. Em contraste, as zonas localizadas no pavimento superior (PAVTO11), mais expostas à radiação solar direta e com menor cobertura por elementos de sombreamento, apresentaram os menores índices, como Z04PAVTO11 (57%) e Z01PAVTO11 (64%). Já as zonas intermediárias (PAVTO06) demonstram desempenho térmico relativamente estável, com percentuais entre 94% e 97%.

Tabela 11 - Horas em conforto térmico [C°].

Zona Térmica	Simulação Sem Elementos Sombreadores		Simulação Com Elementos Sombreadores	
	Horas em Conforto	Percentual (%)	Horas em Conforto	Percentual (%)
Z01PAVTO01	8727	100%	8656	99%
Z01PAVTO06	7150	82%	8476	97%
Z01PAVTO11	4920	56%	5609	64%
Z02PAVTO01	7337	84%	4240	48%
Z02PAVTO06	3735	43%	8197	94%
Z02PAVTO11	4292	49%	6592	75%
Z03PAVTO01	6741	77%	8662	99%
Z03PAVTO06	2853	33%	8384	96%
Z03PAVTO11	4455	51%	5688	65%
Z04PAVTO01	7073	81%	8759	100%
Z04PAVTO06	2473	28%	8525	97%
Z04PAVTO11	4174	48%	5002	57%

Fonte: Elaboração da autora a partir de dados simulados no EnergyPlus (2025).

Por fim, os resultados obtidos na simulação utilizando radiação de onda longa evidenciou o papel decisivo da geometria urbana e do sombreamento mútuo no conforto térmico interno. Nos pavimentos térreos (PAVTO01), onde as fachadas receberam sombreamento contínuo dos blocos adjacentes, a zona Z04PAVTO01, atingiu 100 % das horas dentro da faixa de conforto. Nos pavimentos intermediários

(PAVTO06), com sombreamento parcial durante as horas críticas, os índices variaram entre 94 % e 97 % de horas em conforto. Em contrapartida, nos pavimentos superiores (PAVTO11), as zonas apresentaram quedas expressivas nesses indicadores: Z01PAVTO11 alcançou apenas 64 % de horas em conforto, Z03PAVTO11 ficou em 65 %, Z04PAVTO11 em 57 %.

Tabela 12 - Horas em conforto térmico [C°].

Zona Térmica	Simulação Sem Elementos Sombreadores		Simulação Com Elementos Sombreadores		Simulação Com Radiação de Onda Longa	
	Horas em Conforto	Percentual (%)	Horas em Conforto	Percentual (%)	Horas em Conforto	Percentual (%)
Z01PAVTO01	8727	100%	8656	99%	8671	99%
Z01PAVTO06	7150	82%	8476	97%	8474	97%
Z01PAVTO11	4920	56%	5609	64%	5605	64%
Z02PAVTO01	7337	84%	4240	48%	4334	49%
Z02PAVTO06	3735	43%	8197	94%	8216	94%
Z02PAVTO11	4292	49%	6592	75%	6558	75%
Z03PAVTO01	6741	77%	8662	99%	8668	99%
Z03PAVTO06	2853	33%	8384	96%	8368	96%
Z03PAVTO11	4455	51%	5688	65%	5678	65%
Z04PAVTO01	7073	81%	8759	100%	8760	100%
Z04PAVTO06	2473	28%	8525	97%	8512	97%
Z04PAVTO11	4174	48%	5002	57%	4991	57%

Fonte: Elaboração da autora a partir de dados simulados no EnergyPlus (2025).

Os resultados indicam que as simulações que incorporam radiação de onda longa e elementos sombreados apresentam um desempenho térmico bastante semelhante, com índices elevados de horas em conforto térmico, variando entre 48% e 100% do tempo analisado, dependendo do período e da zona térmica avaliada.

Por outro lado, a simulação sem elementos sombreados apresentou uma redução significativa nas horas em conforto térmico, com valores que chegaram a 28% em alguns casos, evidenciando o papel crucial dos elementos sombreados no controle do ganho térmico e na mitigação do desconforto causado por radiações solares excessivas. Em média, a ausência dos sombreadores resultou em um decréscimo considerável no percentual de horas confortáveis, chegando a apenas 33% em

algumas zonas, o que destaca a influência direta do entorno urbano e das estratégias de proteção solar na qualidade ambiental interna.

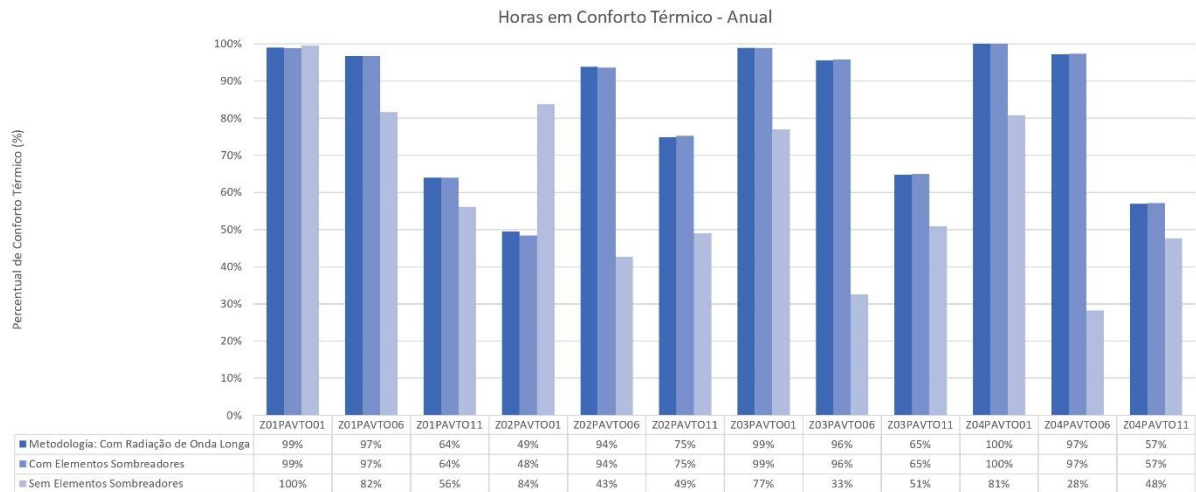


Gráfico 20 – Percentual de horas em conforto térmico [C°] anual.

Fonte: Elaboração da autora a partir de dados simulados no EnergyPlus (2025).

Esses resultados confirmam que a inserção conjunta das zonas térmicas dos edifícios vizinhos, elementos de sombreamento e cálculo de *View Factor* representa uma estratégia robusta para análises termoenergéticas em contextos urbanos densos, uma vez que evidencia com clareza como as interações radiativas e geométricas do entorno afetam as cargas térmicas superficiais e, conseqüentemente, o conforto interno e o consumo energético das edificações.

6 CONCLUSÃO

O presente estudo partiu da premissa de que simulações termoenergéticas que desconsideram o entorno urbano imediato tendem a gerar diagnósticos incompletos ou imprecisos sobre o desempenho térmico das edificações. Essa lacuna metodológica, frequentemente presente em abordagens convencionais com o *software* EnergyPlus, motivou a elaboração de uma proposta alternativa: integrar ao modelo de simulação não apenas as variáveis internas da edificação-alvo, mas também as influências térmicas do tecido urbano ao seu redor — incluindo a radiação de onda longa, convencionalmente não considerada nas simulações usuais utilizando o EnergyPlus.

A metodologia foi validada em um edifício multifamiliar situado no bairro Lourdes, em Belo Horizonte (MG). Por meio da inserção simultânea de elementos tridimensionais de sombreamento dotados de temperatura superficial realista; cálculo de *view factor* entre superfícies vizinhas e objetos específicos como *SurfaceProperty:SurroundingSurfaces* e *LocalEnvironment*, o EnergyPlus revelou sua capacidade de representar de forma mais precisa as trocas térmicas complexas entre superfícies urbanas — especialmente a emissão, absorção e reflexão da radiação infravermelha de onda longa. Isso foi possível mesmo sem o acoplamento com *softwares* microclimáticos externos, como o ENVI-met, utilizando apenas o SketchUp e o OpenStudio como suporte à modelagem geométrica. Trata-se de uma inovação metodológica que, além de otimizar tempo e recursos, democratiza o acesso a simulações mais realistas em contextos urbanos densos.

Esses resultados respondem de forma inequívoca às três perguntas de pesquisa: mostrou-se que as edificações vizinhas exercem influência substancial sobre as trocas térmicas; ficou evidenciada a importância de modelar com precisão as condições locais para obter previsões energéticas confiáveis, pois a omissão de zonas térmicas vizinhas ou de cálculos radiativos subestimava ou superestimava trocas de calor; e, por fim, demonstrou-se que o EnergyPlus, quando utilizado com a extensão OpenStudio/SketchUp para integrar malhas urbanas e fatores de forma (*View 3D*), permite abordar contextos urbanos densos de maneira mais robusta, oferecendo subsídios mais sólidos para o planejamento energético de edificações.

Ainda que a presente pesquisa apresente limitações metodológicas, tais como:

Clima de referência limitado, tendo em vista que o arquivo EPW da estação Carlos Prates contempla apenas condições macroclimáticas, sem capturar integralmente fenômenos de ilha de calor, albedo de pavimentos ou dinâmicas de ventos;

Escopo restrito de amostragem, pois a aplicação concentrou-se em um único bairro, um único arquétipo residencial e em dois dias típicos (verão e inverno), limitando a abrangência sazonal e a generalização para outros contextos urbanos;

Orientação solar fixa, já que não foi considerada a rotação do edifício em relação ao percurso solar, o que pode alterar significativamente a incidência de radiação direta e difusa;

O estudo representa um avanço metodológico relevante ao explorar, com recursos acessíveis, a modelagem urbana no EnergyPlus sem necessidade de *softwares* externos. Diferentemente de Pereira *et al.*, que aplicaram sua abordagem em ambientes comerciais, este estudo validou a metodologia em unidade residenciais multifamiliares, demonstrando sua adaptabilidade para habitações verticais e sua relevância no campo da arquitetura residencial.

Visando o aprofundamento e ampliação do escopo, tem-se o objetivo futuro de explorar análises paramétricas e de sensibilidade, avaliando diferentes tipos de albedo, alturas e espaçamento de edificações e demais variáveis urbanas; expansão tipológica e espacial, testando edifícios unifamiliares e bairros com diferentes níveis de adensamento; cenários de mudanças climáticas futuras (trajetórias RCP do IPCC) para avaliar a resiliência térmica das edificações sob condições projetadas.

A importância deste resultado não se restringe ao campo acadêmico. Na prática projetual, considerar rigorosamente o entorno pode evitar o superdimensionamento de sistemas de climatização, orientar o posicionamento de aberturas e estratégias passivas, e influenciar decisões sobre materiais e soluções arquitetônicas. Mais do que isso, as evidências aqui apresentadas oferecem subsídios técnicos para a formulação de políticas públicas voltadas à mitigação das ilhas de calor urbanas, ao uso racional da energia e ao enfrentamento das mudanças climáticas, especialmente em cidades brasileiras que seguem trajetória de verticalização acelerada.

Assim, esta pesquisa não apenas aponta caminhos técnicos para simulações mais precisas, mas também lança luz sobre a importância da modelagem termoenergética urbana como instrumento de planejamento climático. Políticas

públicas que ignorem as trocas térmicas entre edificações ou que estimulem adensamentos urbanos sem parâmetros térmicos de conforto contribuem para a intensificação do aquecimento local. Por outro lado, diretrizes que incentivem a simulação detalhada do entorno, a inclusão de vegetação urbana, a aplicação de materiais de baixa absorvância e a análise prévia das condições microclimáticas podem mitigar esses efeitos e promover ambientes urbanos mais equilibrados e sustentáveis.

Portanto, mesmo que os ganhos diretos de conforto e economia energética obtidos com a modelagem desenvolvida tenham sido variáveis, esta monografia evidencia que há um efeito mensurável e positivo na inclusão precisa das condições do entorno em simulações termoenergéticas. Esse resultado reforça a importância da integração de metodologias robustas aos processos de licenciamento e projeto urbano, contribuindo para um futuro mais resiliente às mudanças climáticas e mais eficiente em termos energéticos. Em síntese, comprova-se que o EnergyPlus, quando explorado em sua máxima potencialidade e aliado a uma modelagem contextualizada do entorno urbano, é capaz de oferecer diagnósticos significativamente mais realistas, apoiando decisões de projeto e políticas urbanas comprometidas com o conforto ambiental, a sustentabilidade e a justiça climática.

REFERÊNCIAS

AGÊNCIA INTERNACIONAL DE ENERGIA (IEA). **Buildings: Tracking Clean Energy Progress**. Paris: IEA, 2022. Disponível em: <<https://www.iea.org/reports/buildings>>. Acesso em: 23 maio 2025.

ALLEGRINI, J.; DORER, V.; CARMELIET, J. *Influence of the urban microclimate in street canyons on the energy demand for space cooling and heating of buildings*. **Energy and Buildings**, v. 55, p. 823–832, dez. 2012.

ARREGUY, C.; RIBEIRO, R. (Coords.). **Histórias de bairros de Belo Horizonte: Regional Centro-Sul**. Belo Horizonte: APCBH; ACAP-BH, 2008.

AMERICAN SOCIETY OF HEATING, REFRIGERATING AND AIR-CONDITIONING ENGINEERS (ASHRAE). ANSI/ASHRAE Standard 55-2017 – **Thermal Environmental Conditions for Human Occupancy**. Atlanta: American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, 2017.

ATTIA, S.; ELEFThERIOU, P.; XENI, F.; MORLOT, R.; MÉNÉZO, C.; KOSTOPOULOS, V.; BETSI, M.; KALAITZOGLOU, I.; PAGLIANO, L.; CELLURA, M.; ALMEIDA, M.; FERREIRA, M.; BARACU, T.; BADESCU, V.; CRUTESCU, R.; HIDALGO-BETANZOS, J. M. *Overview and future challenges of nearly zero energy buildings (nZEB) design approach*. **Energy and Buildings**, v. 85, p. 34–50, 2014.

BAILEY, W. G. *Microclimatology*. **Encyclopedia of Earth Sciences Series**, Cham: Springer, p. 486–500, 2025.

BELO HORIZONTE. Lei nº 9.725, de 19 de novembro de 2009. Dispõe sobre o Código de Edificações do Município de Belo Horizonte e dá outras providências. **Diário Oficial do Município de Belo Horizonte**, Belo Horizonte, 20 nov. 2009.

BIG LADDER SOFTWARE. **EnergyPlus Input Output Reference: *The Encyclopedic Reference to EnergyPlus Input and Output***. Version 23.2.0. Washington, DC, 2023. Disponível em: <<https://bigladdersoftware.com/epx/docs/>>. Acesso em: 21 maio 2025.

BODACH, S.; HAMHABER, J. *Energy efficiency in social housing: Opportunities and barriers from a case study in Brazil*. **Energy Policy**, v. 38, n. 12, p. 7898–7910, dez. 2010.

BORGES, V.; NASCIMENTO, G.; CELUPPI, M.C.; LÚCIO, P.; TEJAS, G.; GOBO, J.P. Zonas climáticas locais e as ilhas de calor urbanas: uma revisão sistemática. **Revista Brasileira de Climatologia**, v. 31, p. 98–127, 28 jul. 2022.

BOGNÁR, A.; LOONEN, R.; HENSEN, J. Pyrano – *A Python package for LiDAR-based solar irradiance simulations*. In: **Building Simulation Conference Proceedings**, set. 2021.

BOUYER, J.; INARD, C.; MUSY, M. *Microclimatic coupling as a solution to improve building energy simulation in an urban context*. **Energy and Buildings**, v. 43, n. 7, p. 1549–1559, jul. 2011.

CÂMARA MUNICIPAL DE BELO HORIZONTE. **Desigualdades de renda, de gênero e de raça precisam ser combatidas**. 2021. Disponível em: <<https://cmbh.mg.gov.br/comunica%C3%A7%C3%A3o/not%C3%ADcias/2021/06/de-sigualdades-de-renda-de-g%C3%AAnero-e-de-ra%C3%A7a-precisam-ser-combatidas>>. Acesso em: 26 mar. 2025.

CANDIDO, C. R. **Análise da influência do entorno urbano no desempenho térmico e energético de edificação em Curitiba**. 2020. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2020. Disponível em: <<https://acervodigital.ufpr.br/handle/1884/70767>>. Acesso em: 4 jun. 2025.

CONTRAMARCO. **Qual área de ventilação mínima ideal?** Disponível em: <<https://www.contramarco.com/post/qual-%C3%A1rea-de-ventila%C3%A7%C3%A3o-m%C3%ADnima-ideal>>. Acesso em: 17 maio 2025.

CORREA, W.; AYLAS, G.; SANTIAGO, A.; SILVA, M.E.; VALE, C.; SILVA, C.; PATUCCI, N. A Ilha de Calor Urbana em ambiente tropical: a Região Metropolitana da Grande Vitória no Brasil. **Geography Department University of Sao Paulo**, v. 42, p. e186970–e186970, 7 nov. 2022.

CRAWLEY, D.; LAWRIE, L.; WINKELMANN, F.; BUHL, W.F. *EnergyPlus: creating a new-generation building energy simulation program*. **Energy and Buildings**, v. 33, p. 319–331, 2001.

DEWALLE, D. R.; HEISLER, G. M. *Windbreak effects on air infiltration and space heating in a mobile home*. **Energy and Buildings**, v. 5, n. 4, p. 279–288, 13 fev. 2003.

ICHINOSE, T.; LEI, L.; LIN, Y. *Impacts of shading effect from nearby buildings on heating and cooling energy consumption in hot summer and cold winter zone of China*. **Energy and Buildings**, v. 136, p. 199–210, fev. 2017.

ESTADO DE MINAS. **Renda mensal varia mais de 2.000% entre os bairros de BH**. 2011. Disponível em: <https://www.em.com.br/app/noticia/economia/2011/11/16/internas_economia,262205/renda-mensal-varia-mais-de-2-000-entre-os-bairros-de-bh.shtml>. Acesso em: 26 mar. 2025.

EMMANUEL, R. ***An Urban Approach to Climate-Sensitive Design: Strategies for the Tropics***. Spon Press, 2005.

FAZIA ALI-TOUDERT; MAYER, H. ***Effects of Street Design on Outdoor Thermal Comfort***. Disponível em: <https://www.researchgate.net/publication/242157021_Effects_of_Street_Design_on_Outdoor_Thermal_Comfort>. Acesso em: 02 jun. 2025.

FERREIRA, C. C. BPD0018-22: **Desenvolvimento de modelos para estimativa de consumo de energia e potencial de geração distribuída solar considerando áreas urbanas com características distintas**. Relatório de pós-doutorado (Pós-graduação em Ambiente Construído e Patrimônio Sustentável) – Universidade Federal de Minas Gerais, 2024. Não publicado.

GARTLAND, L. M. ***Heat Islands: Understanding and Mitigating Heat in Urban Areas***. London: Earthscan, 2010.

GIVONI, B. ***Climate considerations in building and urban design***. New York: John Wiley & Sons, 1998.

GONZÁLEZ, V.; RUIZ, G.; DU, H.; SÁNCHEZ-OSTIZ, A.; BANDERA, A. *Weather Files for the Calibration of Building Energy Models*. **Applied Sciences**, v. 12, n. 15, p. 7361–7361, 22 jul. 2022.

GOULDING, J. R.; LEWIS, O. J.; STEEMERS, T. C. ***Energy in architecture: the European passive solar handbook***. London: Batsford, 1993.

GUTERRES, A. **No Dia Mundial das Cidades, ONU propõe debate acerca dos desafios da urbanização global. 2022**. Disponível em: <<https://brasil.un.org/pt-br/84506-no-dia-mundial-das-cidades-onu-prop%C3%B5e-debate-acerca-dos-desafios-da-urbaniza%C3%A7%C3%A3o-global>>. Acesso em: 23 maio 2025.

HASHEMI, F.; NAJAFIAN, P.; SALAHI, N.; GHIASI, S. ***Impacts of Urban Heat Island and Future Climate on Urban Buildings Energy Use in a U.S. Midwest Neighborhood***. 19 fev. 2025.

HUANG, Y. J.; AKBARI, H.; TAHA, H.; ROSENFELD, A.H. *The Potential of Vegetation in Reducing Summer Cooling Loads in Residential Buildings*. **Journal of Applied Meteorology and Climatology**, v. 26, n. 9, p. 1103–1116, set. 1987.

IEA – INTERNATIONAL ENERGY AGENCY. Buildings: **Tracking Clean Energy Progress**. Paris: IEA, 2022. Disponível em: <<https://www.iea.org/reports/buildings>>. Acesso em: 23 maio 2025.

INSTITUTO NACIONAL DE METEOROLOGIA (INMET). **Banco de Dados Meteorológicos para Ensino e Pesquisa – Clima de Belo Horizonte**. Disponível em: <<https://bdmep.inmet.gov.br/>>. Acesso em: 17 maio 2025.

INSTITUTO DE PESQUISA ECONÔMICA APLICADA (IPEA). **Atlas da Vulnerabilidade Social nos Municípios Brasileiros**. Brasília: IPEA, 2011. Disponível em: <<https://ivs.ipea.gov.br/>>. Acesso em: 25 maio 2025.

IPEAD/UFMG. **Classificação dos bairros de Belo Horizonte segundo a renda média do chefe do domicílio**. Disponível em: <https://ipead.face.ufmg.br/_site/wp-content/uploads/2018/11/Classes_Bairros_BH_com_mapa.pdf>. Acesso em: 26 mar. 2025.

LIMA, I. M. de. **A influência do entorno urbano na carga térmica de edificações de escritórios condicionadas artificialmente em uma cidade de clima quente e úmido**. 2018. Dissertação (Mestrado em Arquitetura e Urbanismo) – Programa de Pós-Graduação em Arquitetura e Urbanismo, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2018.

LIU, J.; HEIDARINEJAD, M.; NIKKHO, S.; MATTISE, N.; SREBRIC, J. *Quantifying Impacts of Urban Microclimate on a Building Energy Consumption—A Case Study*. **Sustainability**, v. 11, n. 18, p. 4921, 9 set. 2019.

LIU, Y.; HARRIS, D. J. *Effects of shelterbelt trees on reducing heating-energy consumption of office buildings in Scotland*. **Applied Energy**, v. 85, n. 2-3, p. 115–127, fev. 2008.

LUO, X.; HONG, T.; TANG, Y. *Modeling Thermal Interactions between Buildings in an Urban Context*. **Energies**, v. 13, n. 9, p. 2382–2382, 9 maio 2020.

MILLS, G. *Urban climatology and its relevance to urban design*. **Time-saver standards for urban design**. McGraw-Hill, 1999.

MORAKINYO, T. E.; DAHANAYAKE, K.; ADEGUN, O.; BALOGUN, A. *Modelling the effect of tree-shading on summer indoor and outdoor thermal condition of two similar buildings in a Nigerian university*. **Energy and Buildings**, v. 130, p. 721–732, out. 2016.

NGUYEN, H. T.; REITER, S. *A performance comparison of passive designs for residential buildings in hot and humid climates of Vietnam*. **Energy and Buildings**, v. 89, p. 146–157, 2015. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2014.12.035>.

NIKOOFARD, S.; UGURSAL, V. I.; BEAUSOLEIL-MORRISON, I. *Effect of external shading on household energy requirement for heating and cooling in Canada*. **Energy and Buildings**, v. 43, n. 7, p. 1627–1635, jul. 2011.

O Bairro Buritis - Meu Bairro Buritis. Acesso em 11 de junho de 2025. Disponível em: <<https://meubairroburitis.com.br/o-bairro-buritis/>>.

OKE, T. R. ***Boundary layer climates***. 2. ed. London: Methuen, 1987.

OKE, T. R. *The energetic basis of the urban heat island*. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, v. 108, n. 455, p. 1–24, 1982.

OLGYAY, V.; LYNDON, D.; REYNOLDS, J.; YEANG, K. ***Design with Climate: Bioclimatic Approach to Architectural Regionalism***. Princeton: Princeton University Press, 1962.

ONU-HABITAT. **Relatório Mundial das Cidades 2024**. Disponível em: <<https://referencia.com/mundo/cidades-devem-se-preparar-para-mudanca-climatica-e-rapida-urbanizacao-alerta-onu/>>. Acesso em: 23 maio 2025.

ONU-HABITAT. **É o momento das cidades: não há saída sem investimento em desenvolvimento sustentável urbano.** 2023. Disponível em: <<https://brasil.un.org/pt-br/252625>>. Acesso em: 23 maio 2025.

PANDIT, R.; LABAND, D. *A Hedonic Analysis of the Impact of Tree Shade on Summertime Residential Energy Consumption.* **Arboriculture & Urban Forestry**, v. 36, n. 2, p. 73–80, 1 mar. 2010.

PEI, L.; SCHALBART, P.; PEUPOORTIER, B. *Quantitative Evaluation of the Effects of Heat Island on Building Energy Simulation: A Case Study in Wuhan, China.* **Energies**, v. 16, n. 7, p. 3032–3032, 26 mar. 2023.

PEREIRA, N.; MELO, A.P.; MARINOSKI, D.; LAMBERTS, R. Avaliação Da Influência Da Refletância Do Entorno Urbano No Fluxo De Radiação E Na Carga Térmica De Uma Edificação. **Encontro Nacional De Conforto No Ambiente Construído**, v. 16, p. 1273-1282, 2021.

QUEIRÓZ, G. R. de; GRIGOLETTI, G. de C.; SANTOS, J. C. P. dos. *Interoperability between Autodesk Revit and EnergyPlus for thermal simulations of buildings.* **PARC Pesquisa em Arquitetura e Construção**, v. 10, p. e019005, 25 jan. 2019.

REDES DA MARÉ; PREFEITURA DE BELO HORIZONTE. **Mapa das Desigualdades: Indicadores Socio territoriais de Belo Horizonte.** 2021. Disponível em: <<https://prefeitura.pbh.gov.br/sites/default/files/estrutura-de-governo/politicas-urbanas/2021/mapa-das-desigualdades-bh-2021.pdf>>. Acesso em: 25 maio 2025.

REINHART, C. F.; DÁVILA, C. C. *Urban building energy modeling – A review of a nascent field.* **Building and Environment**, v. 97, p. 196–202, 2016.

ROSENFELD, A. H. et al. *Mitigation of urban heat islands: materials, utility programs, updates.* **Energy and Buildings**, v. 22, p. 255–265, 1995.

SANTAMOURIS, M. *Analyzing the heat island magnitude and characteristics in one hundred Asian and Australian cities and regions*. **Science of the Total Environment**, v. 512–513, p. 582–598, 2015.

SANTAMOURIS, M. ***Environmental design of urban buildings: an integrated approach***. 1. Ed. London: Routledge, 2006. 348 p. DOI: <<https://doi.org/10.4324/9781849771160>>. ISBN 9781849771160.

SANTAMOURIS, M. *Innovating to zero the building sector in Europe: Minimising the energy consumption, eradication of the energy poverty and mitigating the local climate change*. **Solar Energy**, v. 128, p. 61–94, abr. 2016.

SANTAMOURIS, M. *On the energy impact of urban heat island and global warming on buildings*. **Energy and Buildings**, v. 82, p. 100–113, 2014.

Secretary-General's remarks at C40 World Mayors Summit | United Nations Secretary-General. Disponível em: <<https://www.un.org/sg/en/content/sg/statement/2019-10-11/secretary-generals-remarks-c40-world-mayors-summit>>. Acesso em: 20 mai 2025.

SHARIF, M. M. **Discurso da diretora-executiva do ONU-Habitat sobre urbanização e clima**. ONU-Habitat, 2023.

SIMPSON, J. R.; MCPHERSON, E. G. *Tree shade impacts on residential energy use: Sacramento results*. **Journal of Arboriculture**, v. 22, n. 1, p. 10–18, 1996.

SIMPSON, J. R.; MCPHERSON, E. G. *Potential of tree shade for reducing residential energy use in California*. **Journal of Arboriculture**. 22(1): 10-18, v. 22, p. 10–18, 2022.

SUNARYA, W.; ISAACS, N.; DONN, M. R. The importance of site on house heating energy modelling. In: **INTERNATIONAL CONFERENCE OF THE ARCHITECTURAL SCIENCE ASSOCIATION**, 52., 2018, Melbourne: Architectural Science Association; RMIT University, 2018. p. 647–655.

TELLES, C. P de. **Proposta de simplificação do RTQ-R**. Dissertação (Mestrado em Arquitetura e Urbanismo) - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2016.

TOPOGRAPHIC MAP. **Lourdes**. Topographic Map. Disponível em: <<https://pt-br.topographic-map.com/map-sjzff3/Lourdes/?center=-19.92166%2C-43.9475&zoom=15>>. Acesso em: 15 maio 2025.

U.S. DEPARTMENT OF ENERGY. **EnergyPlus Input Output Reference: The Encyclopedic Reference to EnergyPlus Input and Output**. Version 23.2.0. Washington, DC, 2023. Disponível em: <<https://energyplus.net/documentation>>. Acesso em: 21 maio 2025.

U.S. DEPARTMENT OF ENERGY. **EnergyPlus Engineering Reference**. Washington, DC, 2016a.

U.S. DEPARTMENT OF ENERGY. **EnergyPlus Input Output Reference**. Version 9.5.0. Washington, DC, 2023.

WU, X.; HOU, J.; HUI, J.; TANG, Z.; WANG, W. *Revealing Microclimate around Buildings with Long-Term Monitoring through the Neural Network Algorithms*. **Buildings**, v. 12, n. 4, p. 395–395, 23 mar. 2022.

YANG, X.; ZHAO, L.; BRUSE, M.; MENG, Q. *An integrated simulation method for building energy performance assessment in urban environments*. **Energy and Buildings**, v. 54, p. 243–251, nov. 2012.