

Rayner Maurício e Silva Machado

**MODELAGEM DO IMPACTO DA ILHA DE CALOR SOBRE O
DESEMPENHO ENERGÉTICO DE ESCRITÓRIOS CONDICIONADOS
ARTIFICIALMENTE**

Dissertação submetida ao Programa
de Pós-Graduação em Engenharia
Civil da Universidade Federal de
Santa Catarina para a obtenção do
Grau de Mestre em Engenharia de
Engenharia Civil.

Orientador: Prof. Roberto Lamberts, PhD.

Florianópolis

2019

Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor,
através do Programa de Geração Automática da Biblioteca Universitária da UFSC.

Machado, Rayner Maurício e Silva
MODELAGEM DO IMPACTO DA ILHA DE CALOR SOBRE O
DESEMPENHO ENERGÉTICO DE ESCRITÓRIOS CONDICIONADOS
ARTIFICIALMENTE / Rayner Maurício e Silva Machado ;
orientador, Roberto Lamberts, 2019.
99 p.

Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de
Santa Catarina, Centro Tecnológico, Programa de Pós
Graduação em Engenharia Civil, Florianópolis, 2019.

Inclui referências.

1. Engenharia Civil. 2. Ilha de calor urbana. 3.
Desempenho energético de escritórios. 4. Análise de
sensibilidade e incerteza. I. Lamberts, Roberto.
II. Universidade Federal de Santa Catarina.
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil. III.
Título.

Rayner Maurício e Silva Machado

**MODELAGEM DO IMPACTO DA ILHA DE CALOR SOBRE O
DESEMPENHO ENERGÉTICO DE ESCRITÓRIOS CONDICIONADOS
ARTIFICIALMENTE**

Esta Dissertação foi julgada adequada para a obtenção do Título de “Mestre em Engenharia de Engenharia Civil”, e aprovada em sua forma final pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil.

Florianópolis, 28 de Fevereiro de 2019.

Prof. Glicério Trichês, Dr.
Coordenador do Curso
Universidade Federal de Santa Catarina

Banca Examinadora:

Prof. Roberto Lamberts, PhD.
Orientador
Universidade Federal de Santa Catarina

Prof. Ricardo Rütter, PhD.
Universidade Federal de Santa Catarina

Prof. Saulo Guths, Dr.
Universidade Federal de Santa Catarina

Profa. Denise Helena Silva Duarte, Dra.
Universidade de São Paulo

RESUMO

Introdução - O comportamento térmico de uma edificação é predominantemente impactado pelas variáveis climáticas e características do entorno. Todavia, os consultores e pesquisadores tradicionalmente a modelam desconsiderando completamente qualquer impacto da ilha de calor urbana, principalmente com relação à temperatura superficial do entorno e as condições climáticas locais. **Objetivo** - Avaliar o impacto da radiação de onda longa e do clima urbano sobre o desempenho energético de edifícios de escritórios condicionados artificialmente. **Metodologia** - Através da aplicação do hipercubo latino, uma amostra de 1000 casos de edifícios de escritórios foi submetida à simulação computacional, obtendo-se o valor das cargas térmicas para análise dos resultados. As simulações foram realizadas por meio dos programas EnergyPlus e UWG, considerando o clima de Santa Maria/ RS. Para efeitos de comparação, a amostra foi simulada mediante quatro métodos de modelagem, os quais se diferem pelo nível de detalhamento dado ao clima e à radiação de onda longa, definindo-se como: radiação detalhada em clima modificado (RDCM), radiação detalhada em clima padrão (RDCP), radiação simplificada em clima modificado (RSCM) e radiação simplificada em clima padrão (RSCP). **Resultados e Discussões** - A ilha de calor (RDCM) promove um aumento na carga térmica de resfriamento dos casos em relação ao RSCP, apresentando variação percentual de 5% a 59%, com erro médio de 24%. A absorvância do pavimento foi o parâmetro com maior índice de sensibilidade, seguido das características volumétricas da configuração urbana e do fator solar da janela do escritório. **Conclusões** - Quando o ganho por radiação solar é menor, as variações percentuais são maiores. Assim, cenários que enquadram-se nesse perfil, potencialmente apresentam um maior erro associado à modelagem simplificada (RSCP).

Palavras-chave: Ilha de calor urbana. Desempenho energético de escritórios. Análise de sensibilidade e incerteza.

ABSTRACT

Introduction - The building thermal behavior is mainly impacted by climatic variables and by the surrounding. However, consultants and researchers have commonly model the building disregarding any impact of the urban heat island, especially regarded by temperatures of the surrounding surfaces and local climatic conditions. **Objective** - To evaluate the impact of longwave radiation and urban climate on the energy performance of artificially conditioned office buildings. **Method** - Through the application of the Latin hypercube, a sample of 1000 cases of office buildings was submitted to the computational simulation, obtaining it the value of the thermal loads to analyze the results. The simulations were performed through the EnergyPlus and UWG programs, considering the Santa Maria/RS climate. For comparison, the sample was simulated using four modeling methods, which differ by the level of detail of the climate and the longwave radiation, defined as detailed radiation in modified climate (RDCM), detailed radiation in standard climate (RDCP), simplified radiation in modified climate (RSCM), and simplified radiation in standard climate (RSCP). **Results and Discussions** - Comparing with RSCP, it is notable that the urban heat island (RDCM) increases the cooling thermal load showing a percentual change of 5% until 59%, with an average of 24%. The absorptance of the pavement was the parameter with greater sensitivity index, following by the urban morphology and solar heat gain coefficient of the office window. **Conclusions** - When the gain from solar radiation is lower, the percentage change is larger. Thus, a configuration such as these potentially present a larger error associated with simplified modeling (RSCP).

Keywords: Urban heat Island. Building Energy performance. Uncertainty and sensitivity analysis.

LISTA DE FIGURAS

2.1	Balço energético de superfície aplicado ao volume de controle da camada do dossel urbano (urban canopy layer)	23
2.2	Escala climática urbana	24
2.3	Mapa da classificação climática de Köppen-Geiger	26
3.1	Fluxograma dos procedimentos metodológicos	37
3.2	Localização geográfica da cidade de Santa Maria	39
3.3	Valores médio mensais das variáveis que compõem o arquivo climático de Santa Maria/RS	39
3.4	Carta solar (esquerda) e Radiação média diária mensal (direita) de Santa Maria (kWh/m ²)	40
3.5	Representação gráfica do contexto urbano	41
3.6	Representação gráfica do edifício de escritórios	42
4.1	Carga térmica de resfriamento do método RSCP em função dos métodos de modelagem RDCP, RSCM e RDCM	54
4.2	Carga térmica de aquecimento do método RSCP em função dos métodos de modelagem RDCP, RSCM e RDCM	55
4.3	Carga térmica de resfriamento do método RSCP em função da variação percentual dos métodos RDCP, RSCM e RDCM	56
4.4	Balço térmico do ar das classes determinadas segundo a carga térmica de resfriamento	58
4.5	Balço térmico do ar das classes determinadas segundo a variação percentual na carga térmica de resfriamento .	59
4.6	Comportamento térmico dos arquivos climáticos	61
4.7	RMSE do arquivo climático modificado (CM) com relação ao arquivo climático padrão (CP)	62
4.8	Temperatura do entorno	64
4.9	RMSE das temperaturas dos elementos externos do escritório do método RDCM para RSCM	65
4.10	Índice de sensibilidade da amostra perante a carga de resfriamento pelo método RDCM	66
4.11	Índice de sensibilidade da amostra perante a variação percentual da carga de resfriamento	68
F.1	Histograma do balço térmico agrupado segundo a carga térmica de resfriamento	87
F.2	Histograma do balço térmico agrupado segundo a variação percentual da carga térmica de resfriamento . .	88
F.3	Diferença de temperatura do entorno durante o dia	89

F.4	Histogramas das diferenças entre as temperaturas superficiais externas do escritório do método RDCM e RSCM .	90
G.1	Índice de sensibilidade amostra perante a carga de resfriamento pelo método RSCP	91

LISTA DE TABELAS

3.1	Distribuição de frequência das variáveis do contexto urbano utilizadas na amostragem realizada pelo LHS . . .	40
3.2	Distribuição de frequência das variáveis da edificação utilizadas na amostragem realizada pelo LHS	43
3.3	Parâmetros dos edifícios (em análise e entorno) que permanecem fixados ao longo das simulações	44
F.1	Parâmetros descritores do caso máximo, mínimo e médio do RMSE das superfícies do entorno (RDCM-RSCM) . .	87
F.2	Parâmetros descritores do caso máximo, mínimo e médio do RMSE das superfícies do escritório (RDCM-RSCM) . .	88

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

CAR	Zone Air Heat Balance Air Energy Storage
CFD	Fluidodinâmica computacional
CIN	Zone Air Heat Balance Internal Convective Heat Gain
Cp	Calor específico à pressão constante
CP	Clima padrão
CM	Clima modificado
D	Dimensão características da folha
Es	Emissividade da planta
EPW	Arquivo climático do EnergyPlus
INF	Zone Air Heat Balance Outdoor Air Transfer
LHS	Hipercubo latino
Pa	Pressão atmosférica
PCA	Análise de componentes principais
Rabs	Radiação absorvida
RD	Radiação detalhada
RS	Radiação simplificada
RMSE	Raiz do erro quadrático médio
RSCP	Radiação simplificada em clima padrão
RSCM	Radiação simplificada em clima modificado
RDCP	Radiação detalhado em clima padrão
RDCM	Radiação detalhado em clima modificado
SRC	Coefficiente de regressão padronizado
SUP	Zone Air Heat Balance Surface Convection
Ta	Temperatura do ar
u	Velocidade do vento
ur	Umidade relativa
UWG	Urban Weather Generator
UCM	Modelo de dossel urbano
WRF	Weather Research and Forecast

SUMÁRIO

1	Introdução	17
1.1	Objetivos	19
1.1.1	Objetivo geral	19
1.1.2	Objetivos específicos	19
1.2	Estrutura do trabalho	19
2	Referencial teórico	21
2.1	Climatologia	21
2.1.1	Fenômenos	22
2.1.1.1	Balço energético	22
2.1.1.2	Escalas	24
2.1.2	Classificações	25
2.1.2.1	Globais	26
2.1.2.2	Locais	27
2.2	Escalas da modelagem numérica	27
2.2.1	Escala do edifício	28
2.2.2	Escala urbana	29
2.2.3	Escala integrada	30
2.3	Modelagens de edificações urbanas	31
2.4	Tratamentos estatísticos	33
2.5	Considerações finais	35
3	Metodologia	37
3.1	Fase de definição	38
3.1.1	Clima	38
3.1.2	Cidade	40
3.1.3	Edificação	41
3.2	Fase de simulação	43
3.2.1	Modelagem energética do edifício	43
3.2.1.1	Variáveis de saída	45
3.2.1.2	Modelagem da temperatura da vegetação	46
3.2.2	Modelagem do clima	46
3.2.3	Métodos de modelagem	47
3.3	Fase de análise	47
3.3.1	Análise exploratória	47
3.3.1.1	Erros de performance	48
3.3.1.2	Balço térmico do ar	49
3.3.1.3	Clima urbano	49
3.3.1.4	Temperatura superficial	50

3.3.2	Análise de sensibilidade	50
4	Resultados e Discussões	53
4.1	Análise exploratória	53
4.1.1	Carga térmica	54
4.1.1.1	Erro de performance energética . . .	56
4.1.1.2	Balço térmico do ar	58
4.1.1.3	Comportamento da amostra	60
4.1.2	Clima urbano	61
4.1.2.1	Comportamento térmico	61
4.1.2.2	Erro de performance térmica	62
4.1.3	Temperatura superficial	63
4.1.3.1	Entorno	63
4.1.3.2	Escritório	64
4.2	Análise de sensibilidade	65
4.2.1	Carga térmica de resfriamento	66
4.2.2	Variação percentual	67
5	Conclusões	71
5.1	Limitações e justificativas	73
5.2	Sugestões para trabalhos futuros	74
A	Classificação climática de Köppen-Geiger	77
B	Zonas climáticas locais de Stewart & Oke	79
C	Comparação de programas de simulação	81
D	Cálculo da temperatura da vegetação em Python	83
E	Arquivo de entrada do UWG	85
F	Complementações da análise exploratória	87
G	Complementações da análise de sensibilidade	91
	Referências	93

1 INTRODUÇÃO

O aquecimento global tem reunido cientistas de diferentes áreas em prol do objetivo de diminuir o impacto dos agentes que catalisam o aquecimento do sistema climático. Assim, justificados pela necessidade de estabelecer formas de mitigar o impacto sobre o meio ambiente, as edificações ganharam notoriedade frente à problemática [1, 2].

Indiretamente os edifícios em funcionamento promovem uma intensificação do aquecimento global, visto que a energia consumida para o condicionamento artificial, especialmente quando oriunda de combustíveis fósseis, promove a emissão de agentes que promovem o aquecimento do sistema climático, estabelecendo um acréscimo na necessidade de condicionamento artificial.

Essa assertiva é endossada pela sensível correspondência da temperatura do ar perante o consumo de energia elétrica, fato que tem sido amplamente estudado de modo que conclui-se que essa referida correlação deve-se especialmente aos setores residenciais e comerciais [3, 4].

É admissível considerar que existem componentes dentro dos padrões de uso dos setores residenciais e comerciais que são impactados fortemente pelas condições climáticas. Fato que é confirmado especialmente quando observa-se, por exemplo, que grande parcela da eletricidade europeia é direcionada à climatização de espaços internos [4, 5]. Tal cenário, além de indicar um potencial responsável pelo aumento da demanda, também justifica a importância de estudos relacionados à eficiência energética como forma de atenuar o consumo energético global.

A idealização de um mundo com perfil de consumo mais sustentável justifica códigos com forte apelo ambiental, contudo grande parte dos regulamentos direcionados à eficiência energética de edificações, ainda apresentam caráter voluntário [1, 2].

Transcender o aspecto da não obrigatoriedade é essencial para que os regulamentos apresentem de fato um grande impacto frente ao meio ambiente. Um caminho para isso pode ser o estabelecimento de metodologias bem fundamentadas, de modo que as investigações se tornem mais detalhadas e confiáveis.

Quanto ao comportamento energético do setor residencial e comercial, geralmente, os estudos são realizados mediante ferramentas de modelagem que levam em conta vários parâmetros que impactam a resposta da edificação frente ao clima. Infelizmente não há uma ferramenta que seja capaz de simular a edificação precisa e detalhadamente, considerando todos os aspectos internos e ex-

ternos. Assim, os modeladores comumente consideram a edificação desprovida de um contexto adjacente, de maneira que a precisão do resultado obtido na modelagem é incerta, visto que o contexto urbano tem impacto significativo sobre o consumo energético [5, 6].

Há um direcionamento das problematizações para questões que outrora eram passíveis de simplificações, dentre as quais o detalhamento do entorno emerge com grande significância [7], visto que fenômenos como a ilha de calor e frescor urbana sintetizam mudanças significativas nas condições climáticas locais [8]. Além disso, as obstruções externas exercem implicações sobre as condições de contorno, especialmente no que se refere às questões radiativas e convectivas [5, 9].

Investigações que abordam análises de incertezas evidenciam que pequenas imprecisões nos parâmetros a serem introduzidos podem promover modelagens com respostas distintas, dependendo da sensibilidade das variáveis [10]. Isso indica que o nível de detalhamento é deveras importante à modelagem precisa da edificação, principalmente em face da impossibilidade de calibrar o modelo.

Em particular, o detalhamento microclimático, como procedimento preliminar à modelagem energética de edificações, é algo essencial sobretudo pela sensibilidade das variáveis climáticas frente à resposta da edificação. Todavia, atualmente não há uma solução que seja capaz de reproduzir todos esses fenômenos de forma unificada, incluindo processos em escalas reduzidas, como o metabolismo humano, e interações de forças atmosféricas, as quais ocorrem numa mesoescala [11].

A modelagem energética comumente é realizada considerando os recursos existentes no programa computacional utilizado, assim partindo da premissa que não existe uma ferramenta que unifique todos os processos, a modelagem torna-se efetivamente incerta. Entretanto, o uso de diferentes ferramentas, com o objetivo de representar os diversos fenômenos físicos, pode fornecer um melhor detalhamento para a modelagem, de modo que essa abordagem tem sido amplamente utilizada pelos pesquisadores [6].

O cenário construído pela comunidade científica permite considerar que o impacto de abordagens mais detalhadas pode ser extremamente significativo ou desprezível [12, 13]. Porém, não há estudo que avalie o efeito da ilha de calor mediante método de análise de sensibilidade global que coloque num mesmo plano variáveis que caracterizam a edificação e o entorno.

O panorama exposto permite supor a possibilidade de determinada variável do contexto urbano ser mais sensível ao desem-

penho energético da edificação, que uma variável que caracteriza sua envoltória, por exemplo. Conhecer a ordem de importância das variáveis pode fornecer aos modeladores e projetistas um senso de quais parâmetros não podem apresentar alto grau de incerteza, potencialmente produzindo resultados distintos do comportamento real obtido em auditoria.

O direcionamento da pesquisa para edifício de escritório parte da premissa que esse setor possui uma considerável demanda energética direcionada à climatização de ambientes [14]. Assim, conhecer o comportamento da simulação energética de escritórios com métodos de modelagem mais detalhados, ganha uma relevância adicional.

1.1 OBJETIVOS

1.1.1 Objetivo geral

O objetivo desse trabalho é avaliar o impacto da ilha de calor sobre a modelagem energética de escritórios condicionados artificialmente considerando o detalhamento higrotérmico do clima urbano e da radiação de onda longa.

1.1.2 Objetivos específicos

Dentre os objetivos específicos deste trabalho estão:

- Quantificar o impacto da modelagem higrotérmica do clima urbano e/ou da radiação de onda longa sobre a carga térmica;
- Comparar as cargas térmicas simuladas considerando diferentes níveis de detalhamento da modelagem do entorno;
- Determinar o índice de sensibilidade de cada variável que compõe a amostra com relação à carga térmica e variação percentual entre os níveis de modelagem;

1.2 ESTRUTURA DO TRABALHO

O capítulo 1 contextualiza o tema de forma sistemática, justificando os objetivos que delimitam essa pesquisa. Além disso, as potencialidades e limitações do panorama atual são apresentadas visando identificar a pertinência da temática proposta.

O capítulo 2 contém a revisão de literatura, que foi elaborada com a intenção de revisar os conceitos que explicam o comportamento climático urbano, bem como as formas de modelar o contexto urbano e a edificação. Ademais, apresenta-se alguns artigos que compõem a representação do estado da arte, reforçando a legitimidade não somente dos métodos, mas também da pesquisa.

O capítulo 3 dispõe dos procedimentos metodológicos que foram divididos em três fases principais. Na primeira fase ocorrem as caracterizações dos climas, contextos urbanos e edificações, parametrizando a amostragem. A segunda fase apresenta a modelagem do clima urbano pelo Urban Weather Generator e a modelagem térmica da edificação pelo EnergyPlus. Na terceira fase são apresentados os procedimentos responsáveis pelo tratamento e análise dos dados, viabilizando o estabelecimento de respostas para os questionamentos que objetivam essa pesquisa.

O capítulo 4 apresenta os resultados das análises exploratórias dos dados e sensibilidade das variáveis que compõem a amostra. Na análise exploratória os resultados de carga térmica, temperatura do ar externo e superficial do entorno, são avaliadas mediante histogramas, gráficos de dispersão e caixa, permitindo a visualização do comportamento do fenômeno. Na análise de sensibilidade as importâncias, ou seja, os índices de sensibilidades das variáveis da amostra são apresentados, possibilitando o estabelecimento de padrões que indicam configurações em que a carga térmica, ou mesmo a diferença entre o método detalhado e simplificado, pode ser alta ou baixa.

O capítulo 5 apresenta as conclusões baseadas nos resultados do capítulo 4, contextualizando com as limitações do estudo. Além do mais, são apresentadas as problemáticas que possuem potencial de pesquisa e não foram abordadas nesse estudo.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

A estrutura apresentada nessa seção parte do agrupamento de assuntos que são relevantes para o desenvolvimento de modelagens microclimáticas urbanas e térmica de edificações. Inicialmente é apresentada uma breve introdução das questões climatológicas permitindo observar como as características geométricas e físicas do contexto urbano podem promover modificações nas variáveis climáticas locais. Além disso, o agrupamento permite notar as distintas classificações climáticas em termos globais e locais. Em seguida são apresentadas algumas formas de modelagem numérica que servem de método em assuntos correlatos aos que norteiam essa investigação, revisando também os principais artigos relacionados.

2.1 CLIMATOLOGIA

A climatologia é definida como sendo o estudo do comportamento atmosférico de uma determinada área, cujo conjunto de dados refere-se à um determinado intervalo temporal. Geralmente ocupa uma posição central e importante no amplo campo da ciência ambiental, dado que as condições climáticas são influenciadas pelos vários componentes do meio ambiente [15, 16].

Compreender o comportamento do clima é essencial para a concepção de projetos com diretrizes bioclimáticas. Todavia, o arquivo climático utilizado na simulação computacional estabelece que o edifício está submetido às mesmas características atmosféricas da estação meteorológica. Assim, esse aspecto define que os fatores geomorfológicos e espaciais (fatores climáticos) que impactam as condições climáticas são idênticos em ambos os casos [5, 17], quando na realidade apresentam características distintas.

Os fatores climáticos que compõem o ambiente urbano condicionam a formação de fenômenos que podem inviabilizar determinadas estratégias bioclimáticas, fundamentando a importância de reconhecer o comportamento dos elementos climáticos sobretudo para fornecer condições de contorno realistas às modelagens.

Os estudos climáticos geralmente abordam aspectos responsáveis por condicionar as características climáticas e atributos físicos que definem as propriedades atmosféricas. A caracterização do clima geralmente é dada pelos elementos climáticos que são definidos por propriedades atmosféricas mensuráveis, e.g., temperatura do ar, umidade do ar, movimentos das massas de ar, precipitações

e nebulosidades. Já os fatores geomorfológicos e espaciais que impactam as condições climáticas de determinado local, se dividem em fatores climáticos globais, e.g., radiação solar, latitude, altitude, circulação atmosférica e massas de água e terra; e fatores climáticos locais, e.g., topografia, vegetação, atividades humanas e superfície do solo natural ou construído [17].

2.1.1 Fenômenos

O efeito do contexto urbano sobre os elementos climáticos é amplamente documentado, de maneira que dois principais fenômenos são observados: ilha de calor urbana e ilha de frescor urbana [8]. A ilha de calor urbana é desenvolvida principalmente em cidades com balanço térmico positivo, podendo causar sério impacto sobre o consumo energético das edificações [4]. Já a ilha de frescor representa áreas urbanas cuja temperatura do ar é menor que nas regiões rurais perimetrais [18].

A ilha de calor é formada durante o dia através da radiação de onda curta (solar) e durante a noite salientada pela radiação de onda longa (superfície terrestre). No período diurno, os raios solares incidem sobre os materiais que compõem a superfície urbana, aquecendo-os, e durante a noite a dificuldade em perder calor contribui para que o clima local apresente maior temperatura [19].

A ilha de frescor representa áreas urbanas que em certas condições meteorológicas apresentam ar menos aquecido que nas zonas rurais adjacentes. Sua maior intensidade é principalmente observada durante o período diurno, porém há estudos que mostram que no inverno a ilha de frescor pode apresentar maior intensidade durante a noite. Além disso, geralmente a ilha de frescor está associada à espaços urbanos vegetados, porém também pode ocorrer em centros urbanos adensados [18, 20].

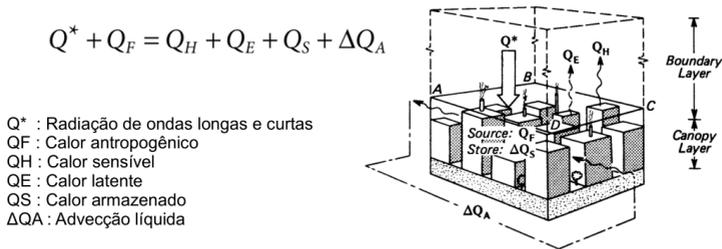
Durante um período de 24 horas, a ilha de calor e a ilha de frescor podem ocorrer num mesmo local. Porém, isso depende de fatores como o índice de cobertura vegetal, características térmicas da malha urbana e calor antropogênico liberado nas ruas, os quais estão relacionados com o processo e o nível de urbanização [20].

2.1.1.1 Balanço energético

A complexidade das interações térmicas que ocorrem na estrutura urbana pode ser satisfatoriamente representada mediante redes de fluxo que equacionam o balanço energético da superfi-

cie (Figura 2.1) em um dado volume de controle. Além disso, essa abordagem permite relacionar simultaneamente o impacto do calor (sensível, latente, armazenado e antropogênico), da radiação (ondas longas e curtas) e da rede de advecção; no fluxo de energia resultante [11, 7, 8].

Figura 2.1: Balanço energético de superfície aplicado ao volume de controle da camada do dossel urbano (urban canopy layer)



Fonte: Adaptado de Oke [21]

O fluxo de calor sensível é decorrente da modificação da temperatura de um determinado corpo que é submetido a uma adição ou subtração de energia [21], sendo um elemento bastante influente no balanço energético do meio urbano e um dos principais responsáveis pelo desenvolvimento das ilhas de calor [22].

O calor latente é denotado quando uma substância muda de estado numa determinada temperatura, afetando o balanço energético do sistema [21]. Assim o calor latente tende a aliviar a temperatura urbana, por meio de regiões produtoras de umidade [23]. Em síntese, “a vegetação e os corpos hídricos exercem grande relevância no balanço de energia em áreas urbanas, proporcionando transporte contínuo de umidade para atmosfera oriunda da evapotranspiração e evaporação, ocasionado pelo fluxo de calor latente” [22, p. 36].

Geralmente o aquecimento urbano é um fenômeno resultante do calor antropogênico, calor armazenado e irradiado pela complexa e densa estrutura urbana; além de estar relacionado com questões pontuais como a velocidade do ar, nebulosidade, cobertura vegetal, padrões construtivos, radiação solar, fluxo de veículos e uso de condicionadores de ar [8].

A rede de advecção é predominantemente afetada pelo vento que, em meio urbano, apresenta significativa diminuição na sua

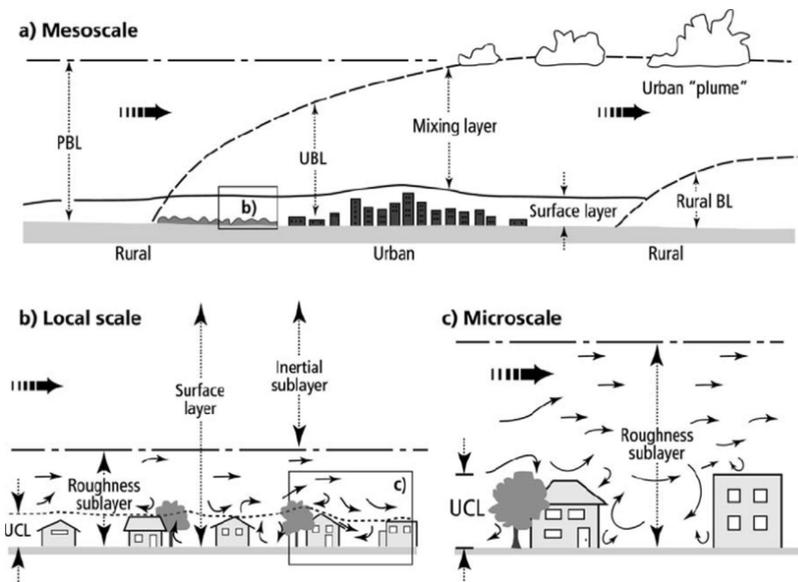
velocidade. Esse fato promove um aumento na temperatura do ar, principalmente em áreas urbanas densamente construídas [24].

O regime dos ventos é fortemente impactado em áreas urbanas devido à presença de obstáculos que alteram suas direções e módulos. Essas modificações, por sua vez, têm impacto direto sobre o padrão de infiltração admitido pelas edificações, podendo influenciar significativamente seus padrões de consumo energético [25].

2.1.1.2 Escalas

O clima urbano geralmente é investigado através de escalas verticais e horizontais (Figura 2.2), onde diferentes fatores climáticos condicionam o comportamento atmosférico, sendo identificadas conforme sua ordem de grandeza espacial [24]. Mesmo que existam distintos fenômenos atmosféricos representados em cada uma das classes, dada a ordem de grandeza e os fatores climáticos que representam cada cenário, a difusão de calor na atmosfera define uma inerente interdependência entre as escalas [24, 26].

Figura 2.2: Escala climática urbana



Fonte: Oke et al. [27]

A escala horizontal divide-se em microescala, escala local e mesoescala. A *microescala* corresponde à influência de prédios, árvores, estradas, ruas, jardins, pátios; estendendo-se de um até centenas de metros. A *escala local* inclui as características da paisagem como topografia, excluindo os efeitos da microescala; representam, em áreas urbanas, os climas dos arredores com características similares de desenvolvimento urbano, variando de um a vários quilômetros. A *mesoescala* é a escala da cidade como um todo, e normalmente tem extensão de dezenas de quilômetros [27].

Como o comportamento atmosférico é diferente em cada escala horizontal, especialmente devido aos aspectos urbanísticos que representam os fatores climáticos, também há uma direta relação entre a escala vertical e a escala horizontal. Na *mesoescala* existe a camada limite urbana, a camada limite planetária, camada de mistura e camada limite rural; na *escala local* existe a camada de superfície e subcamada de inércia; e na *microescala* existe a camada urbana ao nível da cobertura e subcamada de rugosidade.

Geralmente, o vento regional é bem definido e a **camada limite urbana** apresenta formato de pluma, contudo na sua ausência a camada limite urbana possui formato de domo. Em ambos os casos a camada limite urbana atinge a camada limite planetária, a partir da qual não existe influência da superfície terrestre sobre a atmosfera. Durante o período diurno essa altura é de 1000 a 1500 metros e durante a noite entre 50 e 80 metros [18, 24].

A **subcamada de rugosidade** compreende a região entre a superfície até 1,5 ou 3 vezes a altura das árvores e edificações. O fluxo nessa camada de ar é tridimensional e diretamente condicionado pelos parâmetros geométricos urbanos. Já a **subcamada de inércia** fica sobre a subcamada de rugosidade, apresentando propriedades térmicas uniformes no plano horizontal e um fluxo turbulento no perfil vertical com variação inferior à 5% [24].

A **subcamada de inércia** estende-se até a altitude onde as propriedades atmosféricas permanecem uniformemente misturadas pela turbulência térmica, onde começa a **camada de mistura**, que é coberta pela faixa onde ocorre a inversão térmica. Essa faixa delimita a altitude superior da **camada limite planetária**, acima da qual está a atmosfera livre [27, 24].

2.1.2 Classificações

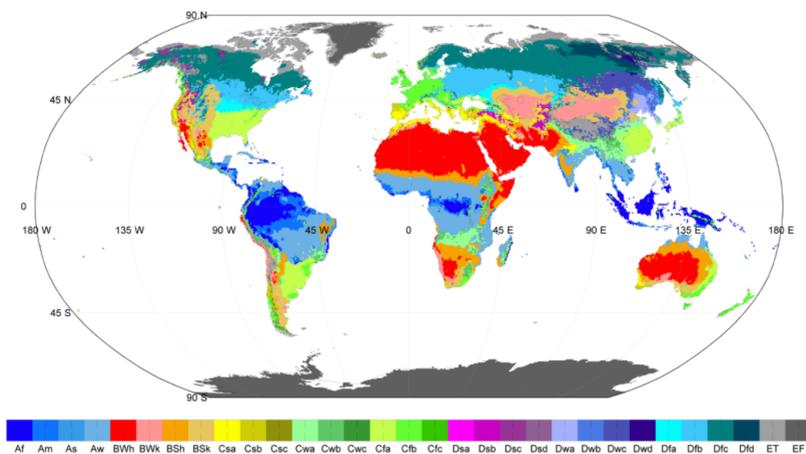
Os elementos climáticos apresentam uma gama significativa de padrões que agrupam-se em distintas classificações, facilitando

o desenvolvimento de investigações que direcionam seus procedimentos metodológicos para diferentes contextos climáticos, assim obtendo relevância frente aos questionamentos que objetivam essa pesquisa. Nessa seção são apresentadas as classificações globais, que referem-se ao agrupamento dos elementos climáticos em abordagem global, e locais, que referem-se ao agrupamento dos fatores climáticos em abordagem local.

2.1.2.1 Globais

O sistema de classificação mais abrangente aceito atualmente é o proposto por Köppen e posteriormente adaptado por Geiger (Figura 2.3), o qual além de supor que a vegetação é a melhor forma de agrupar o clima regional, também considera o efeito da precipitação efetiva durante a estação quente e fria [28].

Figura 2.3: Mapa da classificação climática de Köppen-Geiger



Fonte: Adaptado de Chen e Chen [29]

O método representa a gama de condições climáticas mundiais agrupando os climas em seis grandes categorias que são subdivididas em quente/frio e seco/úmido, conforme os critérios do Anexo A [30]. Independentemente da simplicidade desse sistema de classificação há semelhanças com agrupamento mais criteriosos para a determinação dos grupos climáticos [31].

2.1.2.2 Locais

Descrever as características que definem a malha urbana é algo deveras complicado num panorama onde parâmetros faltantes são recorrentes. Assim o estabelecimento de um método de classificação que permita um agrupamento climático local através de um conjunto de metadados, é algo muito positivo em estudos que consideram configurações urbanas representativas.

Stewart e Oke [32] desenvolveram um método de classificação que parte dessas diretrizes de maneira que seja versátil para representar as mais diversas configurações urbanas e rurais e mesmo assim possa fornecer um conjunto de metadados consistente com os padrões observados em tais ambientes.

O sistema de classificação definido por zonas climáticas locais foi estruturado de modo a auxiliar os pesquisadores a identificar parâmetros construtivos que, ao serem contextualizados com o método proposto, promovem uma padronização prévia do comportamento climático do ambiente em questão, facilitando assim os estudos acerca das ilhas de calor [32].

O sistema promove uma excelente descrição da configuração das superfícies urbanas e rurais, facilitando o processo de classificação e de atribuição dos metadados de maneira que possa melhorar a consistência e precisão dos relatórios de caracterização do clima local, resultando em 17 categorias que ao serem combinadas fornecem subclasses que apresentam características derivadas do conjunto padrão (ANEXO B).

2.2 ESCALAS DA MODELAGEM NUMÉRICA

No processo de modelagem numérica o estabelecimento da escala de modelagem adequada é um procedimento que deve ocorrer ainda na fase inicial da investigação, contudo o método adequado depende muito dos objetivos do estudo. Os modelos caracterizam-se especialmente pela sua abrangência; no caso dos modelos de edificações, existe um enfoque no desempenho térmico. Por outro lado, modelos de microescala e mesoescala são considerados em investigações relacionadas ao clima urbano; porém o primeiro apresenta um nível de detalhamento maior para uma área menos abrangente que o segundo.

2.2.1 Escala do edifício

A modelagem na escala do edifício limita-se em determinar a performance energética das edificações considerando dados de entrada como ganhos internos, propriedades térmicas e ópticas dos materiais, além de assumir simplificações para o entorno da edificação. Assim, a integração com modelos de escalas mais abrangentes é essencial quando os efeitos do clima urbano sobre o desempenho energético de edificações estão sendo investigados [6].

Østergård et al. [33] realizaram uma revisão das principais ferramentas computacionais que podem ser utilizadas na modelagem energética de edificações. Os programas elencados (Anexo C) não apresentam a capacidade de realizar análises de incertezas e sensibilidades globais e holísticas que variem simultaneamente geometria, zoneamento, materiais e sistemas; enfatizando que os parâmetros geométricos devem variar juntamente às outras entradas, caso contrário os resultados das simulações só serão válidos em torno do padrão de referência.

O TRNSYS é amplamente utilizado pela comunidade científica para modelar e simular o comportamento de sistemas transientes, como sistemas solares, elétricos, HVAC e na análise energética de edificações, permitindo que o usuário incorpore modelos matemáticos personalizados mediante seu sistema modular [34, 35].

O CitySim é outro mecanismo computacional que tem sido utilizado pelos cientistas, especialmente por permitir a modelagens simultânea de milhares de edificações e ser capaz de captar as complexas interações radiativas [36], porém os recursos que caracterizam a edificação ainda não possuem o nível de detalhamento observado em ferramentas mais consolidadas.

A complexidade do mecanismo computacional (algoritmo) é essencial quando o detalhamento está no escopo da modelagem, sobretudo para reproduzir os fenômenos de forma efetiva. Nesse contexto, programas de código aberto que apresentam essa capacidade como EnergyPlus e ESP-r, ganham relevância em estudos do comportamento térmico de edificações.

O EnergyPlus é uma ferramenta que permite a simulação de sistemas de climatização, radiantes, fotovoltaicos, solares, integrando-os com a performance energética da edificação. O programa faz uso de arquivos climáticos que definem as condições atmosféricas, de iluminação, radiação, nebulosidade e precipitação em termos anuais para uma dada localidade [37].

2.2.2 Escala urbana

A modelagem em escala urbana permite a consideração de várias interações complexas que impactam o comportamento climático do ambiente adjacente à edificação. As principais ferramentas relativas a essa escala de abordagem resumem-se em fluidodinâmica computacional e modelo de camada do dossel urbano.

A fluidodinâmica computacional (CFD) diferentemente dos modelos de balanço energético, permite a simulação simultânea dos campos de velocidade e temperatura. Sua aplicação permite obter informações mais precisas sobre a distribuição da ilha de calor urbana do que seria obtido através do modelo de dossel urbano (UCM), porém sua grande limitação é referente ao restrito tamanho de domínio frente à capacidade de processamento e armazenamento computacional [6, 7, 11].

Extrapolar o CFD para uma mesoescala aumentará consideravelmente o número de células, podendo inviabilizar a modelagem. Em vista disso, há uma eminente necessidade em intensificar as simplificações geométricas para que essa abordagem seja factível, o que por sua vez promove a descaracterização dos elementos que compõem a microescala, impossibilitando qualquer análise microclimática anual mediante uma abordagem em mesoescala.

ENVI-met [38] e SOLENE-microclimat [39] são algumas ferramentas que implementam fluidodinâmica computacional e apresentam boa aceitação entre a comunidade acadêmica, especialmente a primeira. Tipicamente o ENVI-met divide o domínio da modelagem num número discreto de pontos que formam uma malha de células hexahedral, calculando para cada célula parâmetros como a velocidade do vento, direção do vento, temperatura, umidade relativa, radiação e concentração de poluentes [40, 41].

O modelo de dossel urbano (UCM) é derivado da equação de balanço energético da superfície aplicado em volume de controle que contém duas edificações adjacentes, cujo fluxo de ar é tratado de forma desacoplada do campo de temperatura [6, 11]. Embora seja notável a alta resolução do modelo numa microescala, extrapolá-lo para uma mesoescala elevaria exponencialmente o número de incertezas relativas aos parâmetros de entrada, aumentando eventuais imprecisões relativas à modelagem. Todavia, esse método de modelagem é deveras apropriado para investigações paramétricas em microescala, e seu uso acoplado à modelagem termoenergética de edificações é algo a ser considerado.

Urban Weather Generator (UWG) [42] e Weather Research

and Forecast with Urban Canopy Model (WRF-UCM) [45] são algumas ferramentas que apresentam a capacidade de implementar um modelo de dossel urbano (UCM) numa estrutura relativamente amigável, sendo utilizados em estudos relacionados ao clima urbano.

O algoritmo implementado no UWG executa quatro modelos (estação rural, difusão vertical, camada limite urbana e camada de dossel urbano) que retornam valores horários de temperatura, umidade do ar e velocidade do vento do ambiente urbano com base em dados meteorológicos rurais, considerando a radiação, precipitação, velocidade do ar e umidade medida na estação meteorológica, bem como fluxos de calor oriundos de edificações, estradas e outras fontes antrópicas presentes no contexto urbano [42].

2.2.3 Escala integrada

A singularidade climática urbana é consequência de diversos fenômenos, incluindo processos de escalas reduzidas, como o metabolismo humano, e interações de forças atmosféricas que ocorrem numa mesoescala. Isso evidencia que uma escala integrada não é factível devido à complexidade dos dados requeridos para uma cidade, bem como à fragilidade das teorias responsáveis por descrever o correspondente fenômeno em cada escala [11].

A criação de uma escala de abordagem integrada seria o cenário ideal para pesquisadores da área de eficiência energética; entretanto a exequibilidade dessas generalizações ainda está longe de ser efetivada, visto as limitações de processamento e armazenamento computacional [7]. Em vista disso, a fim de contornar essas restrições, o desenvolvimento de redes neurais, a computação em nuvem ou cluster, seriam opções viáveis.

Melhorar as técnicas no quesito precisão, seria proporcional à intensificação dos cálculos, o que fortaleceria o problema da restrição computacional. Por outro lado, simplificar para aliviar a carga de processamento necessária para a aplicação do modelo, poderia aumentar sua imprecisão. Assim, talvez o ponto que viabilize a melhoria do modelo esteja relacionado com o estabelecimento de novos parâmetros que possam substituir um determinado conjunto de entradas sem que isso venha em prejuízo do detalhamento do objeto modelado, como tem ocorrido com o UCM [7, 42].

2.3 MODELAGENS DE EDIFICAÇÕES URBANAS

Essa seção apresenta estudos que relacionam o clima urbano e o desempenho energético de edificações, direcionando o foco para seus objetivos, métodos e resultados. Além do mais, é possível observar como os pesquisadores têm contornado as limitações que impedem a implementação de uma escala integrada.

Allegrini et al. [43] desenvolveram um estudo em Basel (Suíça) visando quantificar a influência do microclima urbano sobre a demanda energética usando uma abordagem que inclui múltiplas reflexões da energia radiante, redução das perdas de calor convectivo e a ilha de calor urbana. O cânion urbano foi modelado pelo TRNSYS mediante um átrio contendo a edificação. A ilha de calor urbana foi considerada mediante a aproximação de sua intensidade com base em medições. Os resultados mostraram um aumento de $13,6 \text{ MJ/m}^2/\text{ano}$ (800%) na demanda de resfriamento anual e uma diminuição de $9,76 \text{ MJ/m}^2/\text{ano}$ (17%) na demanda de aquecimento anual.

Nikkho et al. [25] propuseram uma metodologia responsável por modelar os efeitos dos obstáculos locais sobre o vento incidente à edificação, estabelecendo multiplicadores de velocidade para oito direções principais com base em CFD. Os multiplicadores foram responsáveis pelo ajuste do arquivo climático que foi utilizado na modelagem energética realizada pelo EnergyPlus, ajustando também os coeficientes da classe *ZoneInfiltration:DesignFlowRate*. Apesar do estudo de caso aplicado numa edificação da University of Maryland mostrar somente 5% de mudança quanto ao uso de energia por metro quadrado, os padrões de consumo confirmaram uma significativa mudança nas demandas de aquecimento e resfriamento.

Samuelson et al. [44] com o objetivo de avaliar o impacto do sombreamento proveniente do contexto urbano sobre o consumo energético em climas frios e quentes, realizaram uma modelagem paramétrica mediante Grasshopper e EnergyPlus. Os resultados mostraram que a consideração do sombreamento promove um aumento no consumo energético em regiões de clima frio e uma diminuição em climas quentes, sendo notável o aumento da demanda de aquecimento e a diminuição no resfriamento.

Wang et al. [45] investigaram o potencial de atenuação do consumo energético de edificações localizadas em Phoenix (EUA) mediante a introdução de gramados e árvores na área contexto. A modelagem do clima urbano foi desenvolvida baseada em métodos implementados no WRF-UCM que calculam os fatores de forma e as

redes de radiação. Os resultados indicam que o efeito do gramado na economia energética é dado de forma indireta, através do resfriamento resultante da evapotranspiração e mediante a radiação térmica refletida do solo para as paredes. Já as árvores agem de forma direta, através do sombreamento que reduz diretamente a temperatura superficial dos elementos construtivos, assim seu impacto sobre a demanda de resfriamento acaba sendo mais significativo.

Evins et al. [46] implementam melhorias no EnergyPlus com relação à radiação de onda longa entre superfícies externas, visto que a temperatura dos elementos de sombreamento são consideradas como tendo a mesma temperatura do solo. A nova abordagem é comparada com a implementação existente no EnergyPlus, considerando o clima de Genebra (Suíça). Os resultados mostraram um aumento na temperatura superficial em até 6°C, com variação média de 2°C, causando um aumento na carga anual de resfriamento de 4,3 kWh/m²/ano (18,8%) e uma diminuição na carga de aquecimento de 1,4 kWh/m²/ano (18,1%).

Allegrini et al. [47] comentam que um dos fenômenos mais influentes no contexto urbano são as trocas radiantes, sendo essencial considerar o detalhamento do entorno para simular a demanda de energia do edifício de forma mais precisa. Neste estudo, para o clima de Zürich (Suíça) a demanda de resfriamento de edifícios isolados é comparada com edifícios modelados em cânions urbanos, utilizando os modelos de radiação implementados no CitySim. Os resultados mostraram uma forte influência do entorno sobre a demanda energética da edificação, especialmente no que tange às superfícies da área contexto com baixa refletância e alta absorvância, possuindo alta temperatura superficial.

Vallati et al. [48] estudaram os efeitos das trocas radiativas entre edificações sobre os fluxos de calor na superfície externa da parede em Roma (Itália) através do TRNSYS, caracterizando seu comportamento em diferentes orientações e geometrias. Os resultados mostraram que as trocas radiativas modificam o microclima local assim influenciando a demanda anual de resfriamento com um acréscimo de até 16,3 kWh/m² (167%) e um decréscimo de 30,1 kWh/m² (38%) na demanda de aquecimento. Isso se deve às múltiplas reflexões que promovem o aprisionamento da radiação de maneira que mais radiação é absorvida pela fachada.

Palme et al. [13] comentam que a simulação do desempenho do edifício não incluem adequadamente o efeito da ilha de calor urbana, o que pode implicar num grande impacto no consumo energético computado, assim é proposta uma metodologia para incor-

porar tal efeito na modelagem. Os procedimentos metodológicos de forma resumida utilizam UWG para a modelagem climática e TRNSYS para a modelagem do edifício, sendo aplicado em Guayaquil (Equador), Lima (Peru), Antofagasta e Valparaíso (Chile). Os resultados indicam que quando o efeito da ilha de calor é incorporado, um aumento na demanda de energia entre 17% (13 kWh/m²) e 200% (1,9 kWh/m²) pode ser esperado.

Street [49] estudou o efeito da modificação da temperatura e umidade relativa em Cambridge (EUA) através do UWG e Crawley Model, simulando o uso energético para o aquecimento e resfriamento de edificação unifamiliar e escritório. A aplicação do UWG reduz o erro na simulação energética um edifício urbano unifamiliar com um arquivo climático rural de 21% (19,53 kWh/m²) para 13% (12,09 kWh/m²). Com o algoritmo de Crawley o erro é reduzido para -8% (8 kWh/m²) ou +11% (10 kWh/m²), dependendo da intensidade da ilha de calor urbana considerada.

Miller et al. [50] acoplaram CitySim e EnergyPlus implementando um melhor detalhamento para a radiação de onda longa, visto que o CitySim apresenta capacidades mais avançadas para trocas radiativas e o EnergyPlus é mais avançado para a simulação da demanda energética da edificação. Os dados de radiação obtidos no CitySim são utilizados para sobrepor as simplificações assumidas no EnergyPlus, que praticamente negligencia as superfícies adjacentes. Os resultados mostraram que o acoplamento promoveu diferenças de até 6,6% (2240 kWh) na demanda de resfriamento e 27,47% (1457 kWh) na demanda de aquecimento em Zürich (Suíça).

2.4 TRATAMENTOS ESTATÍSTICOS

Em estudos paramétricos o grande volume de dados pode dificultar o estabelecimento de conclusões pontuais, de maneira que definir as ferramentas estatísticas usadas em artigos relacionados à temática dissertada, ganha grande importância nesse estudo.

Caso o modelo possua alto grau de incerteza nos valores a serem considerados nas variáveis de entrada, seja por impossibilidade de determinar um valor exato ou variabilidade temporal desconhecida, a análise de sensibilidade ganha relevância para tornar a resposta do modelo mais confiável [51].

A análise de sensibilidade permite entender quais variáveis de entrada mais impactam a resposta do modelo a partir de uma dada incerteza em sua atribuição [52]. Essa é uma ferramenta vali-

osa em análises energéticas de edificações [53], já que explicita os parâmetros que, ao serem mal detalhados, podem promover inconsistências no resultado obtido na simulação do edifício.

A análise de sensibilidade pode ser realizada por métodos locais ou globais, contudo dentro dessas categorias existem métodos que podem apresentar instabilidades quando submetidos a modelos complexos, não monotônicos e não lineares [54, 53]. Objetivando avaliar quatro métodos de análise de sensibilidade aplicados em funções matemáticas e modelos energéticos de edificações, um estudo foi desenvolvido de maneira que os resultados mais consistentes foram demonstrados pelo FAST e Sobol [54].

FAST e Sobol decompõem a variância da resposta do modelo para cada entrada. Apesar de serem métodos de abordagem livre, capazes de definir medidas quantitativas para o grau de significância das variáveis, a principal desvantagem está relacionada com o alto custo de processamento computacional [53].

Zhang et al. [55] comentam que o tamanho adequado para a amostra do Método de Sobol depende do número de parâmetros e da complexidade do modelo. Em modelos complexos com grande número de parâmetros pelo menos 100 mil cenários devem ser amostrados e para modelos menos complexos uma amostra menor pode ser suficiente, por exemplo, 1000 casos.

O Coeficiente de Regressão Padronizado (SRC) permite a determinação de índices de sensibilidade estáveis com custo de processamento computacional moderado. Além do mais, esse método de análise possui sinergia com o ambiente construído, sendo adequado na determinação de índices de sensibilidade frente ao comportamento energético de edificações [51].

Xu et al. [56] desenvolveram uma metodologia sistemática que minimiza (algoritmo genético) a demanda de aquecimento e resfriamento através da determinação de parâmetros que promovam os menores resultados, previamente realizando análise de sensibilidade (ANOVA) para reduzir o número de entradas a serem ajustada no processo de otimização. Silva et al. [57] abordaram a construção de modelos para a tomada de decisão multicritério de forma semelhante, usando o Método dos Efeitos Elementares (Método de Morris), entretanto analisaram o consumo energético e graus-hora de desconforto com aquecimento e resfriamento numa edificação residencial unifamiliar.

Bre et al. [58] combinaram análise de sensibilidade (Método de Morris) e otimização (Algoritmo Genético) com o objetivo de minimizar a performance térmica e energética (EnergyPlus) de uma

edificação residencial na Argentina. O Método de Morris possibilitou o estabelecimento da ordem de significância das variáveis, explicitando quais variáveis seriam insignificantes no processo de otimização. Os resultados mostram que a metodologia proposta promoveu uma melhora do desempenho de 91% para graus-hora e 88% para consumo energético.

Corrado e Mechri [10] aplicaram análise de incerteza para verificar o impacto sobre a classificação do desempenho energético de um edifício de escritório, indicando a possibilidade da edificação classificar-se em distintos níveis de desempenho, conforme o regulamento energético italiano que leva em consideração o consumo.

Mao et al. [51] aplicaram uma análise de sensibilidade global baseada em regressão (SRC) para avaliar a significância de 30 variáveis que incluem fatores meteorológicos, características das edificações, do contexto urbano e da vegetação, sobre a temperatura do ar através do UWG. Os parâmetros mais sensíveis foram a altura de referência do modelo de difusão vertical, o coeficiente de troca do modelo de dossel urbano, a fração de calor liberado no cânion urbano e a altura da camada limite urbana noturna.

2.5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

A investigação do microclima urbano previamente à simulação energética da edificação é uma notável necessidade, visto que há parâmetros que podem impactar os elementos climáticos locais. O comportamento da edificação frente ao clima urbano não ocorre de forma unilateral, visto que as classificações globais e locais definem condicionantes que afetam a carga térmica admitida pela edificação. Assim, escolher a abordagem adequada é algo essencial para considerar a influência desses parâmetros sobre o consumo energético das edificações.

O avanço tecnológico e científico tem permitido que diferentes técnicas de suporte sejam aplicadas de maneira satisfatória, contudo sensoriamento e modelos físicos apresentam custos elevados e limitada abrangência. Logo, a modelagem numérica ganha relevância frente à problemática apresentada nesse estudo.

A modelagem numérica é agrupada em escalas com distintas metodologias, de maneira que uma modelagem integrada promoveria um maior realismo aos resultados, contudo essa alternativa é infactível. Para contornar essa limitação, os pesquisadores realizam modelagens em cada uma dessas categorias (escala do edifício e es-

cala urbana) para representar o efeito do contexto urbano sobre o comportamento térmico e energético de edificações.

Os métodos de modelagem simplificados podem não captar com precisão a resposta de determinado objeto de estudo; ao passo que metodologias muito elaboradas estão suscetíveis a uma série de incertezas que podem impactar a resposta obtida, especialmente quando essas variáveis incertas possuem alta sensibilidade.

É notável que existem diferentes procedimentos metodológicos possíveis para um dado objetivo. Além do mais, os assuntos abordados apresentam distintas temáticas, de maneira que o efeito combinado desses vários aspectos denota uma temática em potencial a ser trabalhada.

Avaliar o desempenho térmico de edificações por meio da análise de sensibilidade e incerteza, é algo que tem sido usado com o objetivo de compreender o comportamento global do modelo. Porém, aplicar essa metodologia em cenários mais abrangentes, ou seja, incluindo os parâmetros urbanísticos, é identificado como um assunto que apresenta lacunas.

Realizar análises de incertezas e sensibilidades globais que variem simultaneamente geometria, zoneamento, materiais e sistemas, é uma abordagem interessante visto que os programas computacionais utilizados na modelagem não automatizam tais tarefas, sendo necessário a programação de rotinas computacionais.

3 METODOLOGIA

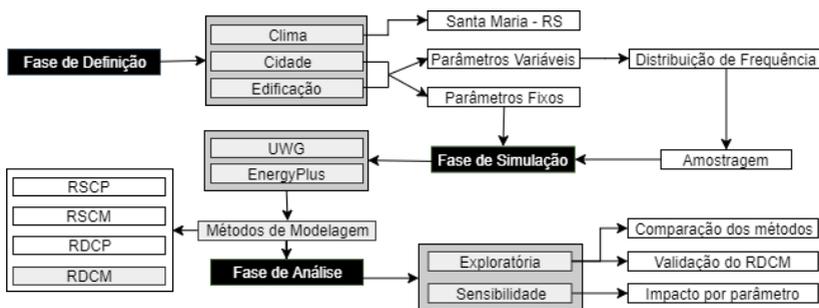
A metodologia foi estruturada (Figura 3.1) em três fases principais: fase de definição, simulação e análise. Assim, visando investigar o impacto da ilha de calor urbana na carga térmica de escritórios condicionados artificialmente, simulações paramétricas foram realizadas nos programas computacionais EnergyPlus [37] e UWG [59].

Na fase de definição ocorre a caracterização climática do local onde o experimento numérico foi aplicado, bem como a definição das distribuições de frequência que integram o estudo paramétrico. Uma subsequente amostragem é realizada conforme a taxa de ocupação, o número de andares, absorvância das paredes, o percentual de vidro na fachada, o fator solar do vidro, a cobertura vegetal, largura da fachada e a absorvância do pavimento.

Na fase de simulação, ocorre a apresentação do método de modelagem com radiação detalhada [radiação de onda longa] em clima padrão (RDCP), do método com radiação simplificada em clima modificado (RSCM), do método com radiação detalhada em clima modificado (RDCM) e do método com radiação simplificada em clima padrão (RSCP).

Na fase de análise, definem-se os métodos estatísticos utilizados na análise exploratória, a qual é realizada para efeito de comparação, quer seja entre métodos de modelagem ou entre os casos da amostra. Enfim, são apresentados os procedimentos utilizados para a análise de sensibilidade das variáveis que compõem a amostra frente à carga térmica e à variação percentual.

Figura 3.1: Fluxograma dos procedimentos metodológicos



A ilha de calor urbana geralmente é estudada por meio da temperatura superficial do entorno e/ou da temperatura do ar ex-

terno [60, 20], porém o EnergyPlus [37] desconsidera completamente o efeito da ilha de calor urbana sobre a modelagem (RSCP).

O método de modelagem padrão do programa considera a temperatura superficial do entorno igual à temperatura do solo, e ambas iguais à temperatura do ar, assim prejudicando análise das trocas de calor por radiação de onda longa [46]. Além do mais, o arquivo climático comumente utilizado nas simulações é relativo à estação meteorológica, cujas características climáticas são distintas das áreas urbanas, prejudicando a modelagem da convecção e infiltração do ar na zona térmica [13].

Essas limitações poderiam inviabilizar o desenvolvimento desse estudo, porém dada a robustez do EnergyPlus, a partir da versão 8.8 é possível realizar o detalhamento da radiação de onda longa. Todavia, para a sua realização é necessário explicitamente determinar os fatores de forma e as temperaturas superficiais do entorno. Já com relação ao clima urbano, é possível incluir o efeito da ilha de calor no arquivo climático através do programa UWG.

3.1 FASE DE DEFINIÇÃO

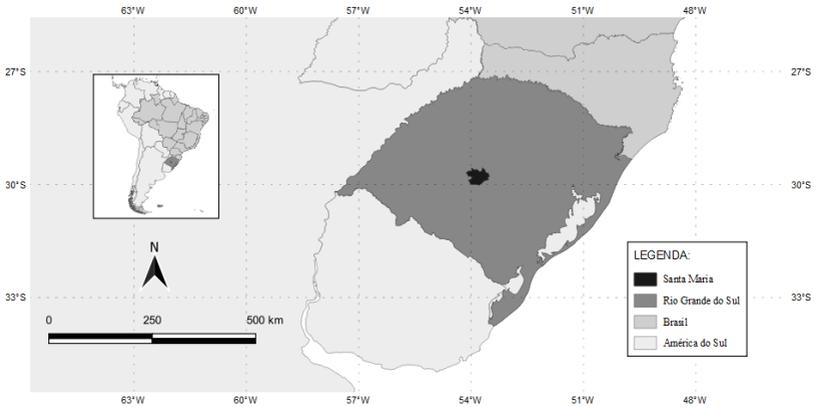
Na fase de definição, o clima é caracterizado especialmente quanto ao comportamento da temperatura de bulbo seco, umidade relativa, radiação solar, velocidade do vento, latitude, longitude e trajetória solar. Posteriormente, são definidas as distribuições de probabilidade para as entradas que caracterizam a edificação e o entorno, permitindo uma subseqüente amostragem.

3.1.1 Clima

O experimento numérico foi aplicado em clima com grande amplitude térmica ao longo ano, com o objetivo de observar o impacto do entorno sobre a carga térmica de aquecimento e resfriamento. Assim, por tal motivo o município de Santa Maria (Figura 3.2) foi definido como o clima de referência.

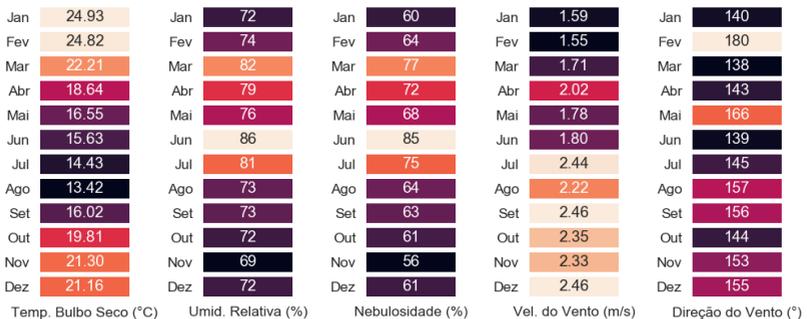
O clima do município é classificado como temperado úmido, com verão quente e elevada umidade relativa, conforme Köppen e Geiger [29]. Os elementos do arquivo climático do EnergyPlus (EPW) corroboram com tal classificação, visto que a média mensal da umidade relativa possui valor elevado ao longo do ano, variando entre 69% e 86%, e a média mensal da temperatura de bulbo seco (Figura 3.3) oscila entre 13°C e 25°C.

Figura 3.2: Localização geográfica da cidade de Santa Maria



Quanto ao conforto térmico, mediante o voto médio previsto [61] aplicado no EPW, observa-se que as condições de conforto são satisfeitas em 13% das horas anuais, sendo que há a necessidade de aquecimento em 54%, há a necessidade de resfriamento em 12% e há a necessidade de desumidificação em 21%.

Figura 3.3: Valores médio mensais das variáveis que compõem o arquivo climático de Santa Maria/RS

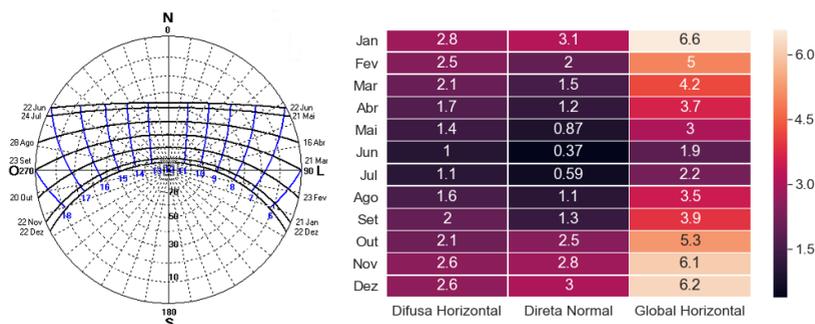


Fonte: Adaptado do arquivo climático EPW [62]

Dada a localização geográfica do município, a trajetória so-

lar (Figura 3.4) faz com que a fachada norte esteja exposta à radiação solar direta em grande parte do ano. No verão, o tempo de exposição é menor, porém é válido salientar que nesse período a radiação global horizontal, direta normal e difusa horizontal, são mais intensas, compensando o menor tempo de exposição.

Figura 3.4: Carta solar (esquerda) e Radiação média diária mensal (direita) de Santa Maria (kWh/m²)



Fonte: Adaptado de programa Sol-Ar (esquerda) e do EPW (direita)

3.1.2 Cidade

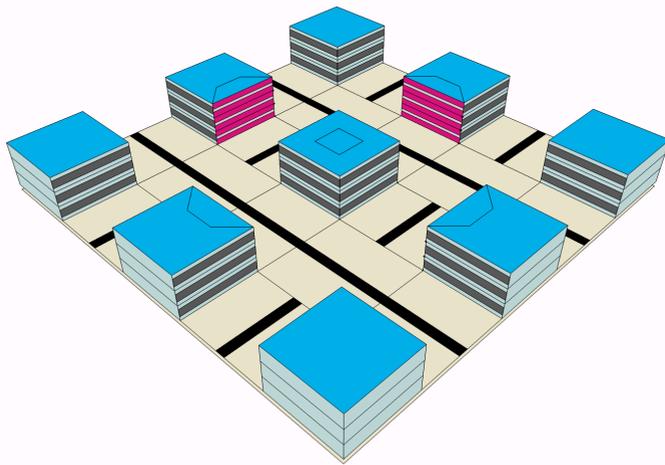
Os contextos urbanos são previamente definidos por distribuições discretas (Tabela 3.1) que definem parâmetros urbanos utilizados na criação de 1000 casos amostrados pelo hiper-cubo latino (LHS), possibilitando uma ampla análise da influência da ilha de calor sobre a carga térmica da edificação. Assim, é válido salientar que o caráter teórico desse estudo exclui a necessidade de tais contextos comporem a real malha urbana da cidade analisada.

Tabela 3.1: Distribuição de frequência das variáveis do contexto urbano utilizadas na amostragem realizada pelo LHS

Variável	Unidade	Distribuição	Valores discretos
Taxa de ocupação	-	uniforme	0,20; 0,36; 0,52; 0,70
Absortância do pavimento	-		0,4; 0,9
Cobertura vegetal da via pública	-		0,1; 0,35

Como forma de generalização, as ruas do entorno foram modeladas (Figura 3.5) considerando que no centro da via pública há vegetação rasteira, representando o canteiro central. Obviamente, a localização da vegetação num contexto urbano qualquer, ocorre de forma aleatória, de maneira que isso poderia não somente prejudicar a generalização do entorno, mas também a comparação entre os resultados, por isso a variação e localização da cobertura vegetal é limitada.

Figura 3.5: Representação gráfica do contexto urbano



Objetivando a obtenção de uma amostra que melhor represente o universo de possibilidades, optou-se por variar somente os parâmetros que alteram diretamente as características superficiais do entorno, os quais interferem diretamente na forma como a edificação troca calor por radiação com o contexto urbano.

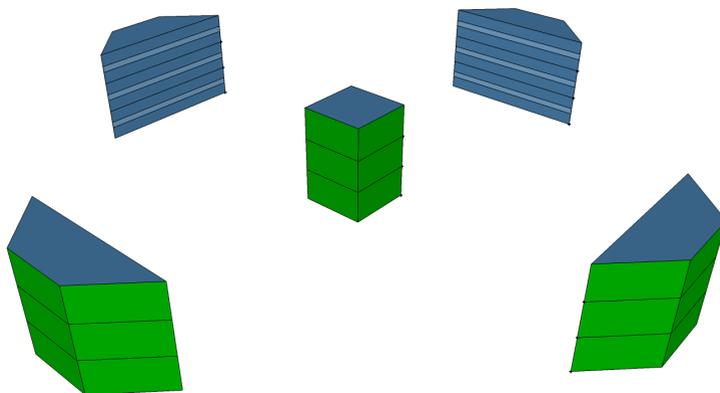
As edificações são distribuídas espacialmente no contexto urbano de maneira que a taxa de ocupação e o índice de aproveitamento sejam iguais para todas. Esse padrão urbanístico dificilmente será observado na realidade, contudo ele está presente em estudos teóricos que abordam tipologias urbanas genéricas, sendo uma opção viável para a generalização dos modelos de entorno.

3.1.3 Edificação

O estudo foi realizado em modelo com arquitetura inspirada nas recomendações da ASHRAE 90.1 [63], conforme Figura 3.6. O

modelo possui cinco zonas por andar, sendo quatro perimetrais e uma central. Sua escolha foi justificada pela versatilidade em representar os ambientes em diferentes orientações, numa mesma simulação.

Figura 3.6: Representação gráfica do edifício de escritórios



As zonas perimetrais do modelo foram transladadas no sentido oposto à sua orientação primária, sendo alocadas nos edifícios que compõem o entorno, contudo sua zona central continua no lugar de origem. Esse procedimento foi realizado para aumentar o fator de forma dos elementos externos da edificação com os elementos urbanos adjacentes, sem que haja a necessidade de um entorno mais abrangente. Isso possibilitou representar uma malha urbana de 5 por 5 em uma malha 3 por 3, diminuindo o custo de processamento computacional sem que isso viesse em detrimento do detalhamento da contexto urbano.

Quanto à edificação na amostragem mencionada no item anterior, também optou-se por incluir somente os parâmetros (Tabela 3.2) que interferem diretamente nas características superficiais dos elementos que compõem a configuração urbana modelada.

Para que os edifícios possuam a mesma taxa de ocupação e índice de aproveitamento, em cada caso simulado é definido apenas um número de andares e uma largura de fachada. Contudo,

Tabela 3.2: Distribuição de frequência das variáveis da edificação utilizadas na amostragem realizada pelo LHS

Variável	Unidade	Distribuição	Valores discretos
Número de andares	-	uniforme	3; 9
Largura da fachada	m		15; 30; 45
Absortância da parede	-		0,2; 0,8
Fator solar do vidro	-		0,38; 0,87
Porcentagem de área envidraçada	-		0,2; 0,5; 0,8

a absortância da parede, fator solar do vidro e porcentagem de área envidraçada do edifício analisado, podem apresentar valores diferentes do entorno. Os demais parâmetros que caracterizam as edificações permanecem constante ao longo do estudo (Tabela 3.3).

3.2 FASE DE SIMULAÇÃO

Na fase de simulação são apresentados os procedimentos necessários para a modelagem energética da edificação, do clima urbano e da temperatura da vegetação. Além do mais, os diferentes métodos de modelagem abordados nesse estudo são descritos conforme os aspectos que são levados em consideração em sua modelagem.

3.2.1 Modelagem energética do edifício

A modelagem energética da edificação foi realizada através do programa computacional EnergyPlus; contudo existem deficiências na caracterização do entorno, especialmente em razão do programa assumir que o elemento de sombreamento possui sua temperatura superficial igual à temperatura do ar.

Essa simplificação assumida para o elemento de sombreamento modifica os fluxos energéticos mediante a radiação de onda longa; assim sobrepor essa característica é imprescindível para que a modelagem apresente resultados consistentes. Existem recursos implementados no EnergyPlus que permitem modelar a radiação de onda longa. Trata-se da classe *SurfaceProperty:SurroundingSurface* onde a temperatura superficial e o fator de forma são incorporados na modelagem, e da classe *SurfaceProperty:LocalEnvironment* onde essas condições de contorno são atribuídas à uma superfície de classe *Surface:Detailed*.

Tabela 3.3: Parâmetros dos edifícios (em análise e entorno) que permanecem fixados ao longo das simulações

Tipologia	Elemento construtivo	Material	Rugosidade	Espessura (m)	Condutividade térmica (W/m.K)	Densidade de massa aparente (kg/m ³)	Calor específico (J/kg.K)	Emissividade	
Em análise	Parede	Revest. Externo	Rugoso	0.025	1.15	2000	1000	0.9	
		Tijolo	Rugoso	0.033	0.9	1103	920	0.9	
		Tijolo	Rugoso	0.033	0.9	1103	920	0.9	
		Revest. Interno	Rugoso	0.025	1.15	2000	1000	0.9	
		Telha	Rugoso	0.008	0.095	1900	840	0.9	
	Cobertura	Câmara de Ar			Resistência Térmica = 0.21 m ² .K/W				
		Laje Mista	Rugoso	0.095	1.05	1087	920	0.9	
		Laje Mista	Rugoso	0.095	1.05	1087	920	0.9	
	Piso	Argamassa		Rugoso	0.025	1.15	2000	1000	0.9
		Cerâmica		Suavidade Média	0.01	0.9	1600	920	0.9
		Elemento construtivo	Material	Espessura (m)	Condutividade térmica (W/m.K)	Transmitância luminosa	Emissividade	Refletância	
	Abertura	VidroSHGC87		0.006	0.9	0.85	0.84	0.071	
		VidroSHGC38				0.32		0.48	
	Padrão de uso				0h - 9h	9h-12h	12h-13h	13h-17h	17h-0h
	Segunda à Sexta				0	1	0.5	1	0
	Sábado							0	
	Domingo							0	
	Pessoas (pessoa/m²)		Iluminação (W/m²)		Equipamentos (W/m²)		Carga Térmica		
	0.1		14		10		Aquecimento	Resfriamento	
					4.5 m		18 °C	24 °C	
Profundidade do escritório									
Entorno	Parede	Concreto	Rugoso	0.2	1.75	2500	1000	0.9	
		Telha	Rugoso	0.008	0.095	1900	840	0.9	
	Cobertura	Câmara de Ar			Resistência Térmica = 0.21 m ² .K/W				
		Laje Mista	Rugoso	0.095	1.05	1087	920	0.9	
		Laje Mista	Rugoso	0.095	1.05	1087	920	0.9	
	Piso	Argamassa		Rugoso	0.025	1.15	2000	1000	0.9
		Cerâmica		Suavidade Média	0.01	0.9	1600	920	0.9
		Elemento construtivo	Material	Espessura (m)	Condutividade térmica (W/m.K)	Transmitância luminosa	Emissividade	Refletância	
	Abertura	VidroSHGC87		0.006	0.9	0.85	0.84	0.071	
		VidroSHGC38				0.32		0.48	
	Padrão de uso				0h - 9h	9h-12h	12h-13h	13h-17h	17h-0h
	Segunda à Sexta							1	
	Sábado								
	Domingo								
	Pessoas (pessoa/m²)		Iluminação (W/m²)		Equipamentos (W/m²)		Carga Térmica		
	0						Aquecimento	Resfriamento	
							21 °C	22 °C	

Há duas grandes dificuldades em realizar esse detalhamento, a primeira está relacionada ao conhecimento da temperatura superficial no intervalo de tempo em que os cálculos estão sendo efetuados, e a segunda está relacionada com o cálculo do fator de forma para as superfícies, especialmente com relação ao grande número de fatores de forma existentes em um contexto urbano complexo.

A primeira dificuldade é contornada através da simulação dos elementos externos definidos como zonas térmicas cuja resposta é conhecida em cada um dos intervalos de cálculo; assim as temperaturas superficiais são armazenadas em um arquivo de texto que é utilizado em uma nova simulação por meio da classe *Schedule:File*.

A segunda dificuldade é superada através do estabelecimento

de rotinas computacionais, as quais fazem a leitura das superfícies especificadas no arquivo que contém o modelo a ser simulado pelo EnergyPlus. Assim, gera-se automaticamente um arquivo de entrada familiar ao programa VIEW3D¹ que efetua o cálculo dos fatores de forma, posteriormente incorporando-os no arquivo de extensão IDF, que serve de interface para o EnergyPlus.

Além do mais, o contexto urbano modelado pelo EnergyPlus, apresenta uma completa distribuição da radiação solar tanto no interior quanto no exterior da edificação, de maneira que as reflexões entre superfícies são permitidas. Esse recurso permite observar o comportamento energético frente às modificações nas absortâncias das superfícies que compõem o entorno do edifício analisado.

Quanto ao contato com o solo, o ideal seria que fosse modelado através de diferenças finitas, porém como isso elevaria o tempo de simulação e os fluxos energéticos passíveis de maiores alterações são de carácter superficial, foi estabelecido que o contato com o solo seguirá a abordagem mais simplificada, ou seja, *Site:GroundTemperature:BuildingSurface*, onde o custo de processamento computacional é menor.

3.2.1.1 Variáveis de saída

Carga térmica O desempenho térmico é avaliado segundo a carga térmica de resfriamento, que é representada pela variável *Zone Ideal Loads Supply Air Total Cooling Energy (J)*, e a carga de aquecimento, que é representada pela variável *Zone Ideal Loads Supply Air Total Heating Energy (J)*, sendo convertidas para kWh/m² mediante a divisão da carga térmica pelo produto da multiplicação de 3600000 pela área da zona térmica em vista superior.

Balanco térmico no ar O balanço térmico no ar da zona térmica é investigado com o objetivo de definir quais são as maiores fontes de calor e quais fontes sofrem maior impacto. O calor proveniente da convecção com os elementos construtivos da zona é analisado pela variável *Zone Air Heat Balance Surface Convection Rate (W)* - **SUP**. O calor obtido por convecção com pessoas, equipamentos e sistemas de iluminação é avaliado pela variável *Zone Air Heat Balance Internal Convective Heat Gain Rate (W)* - **CIN**. O calor proveniente da infiltração é analisado pela variável *Zone Air Heat Balance Outdoor*

¹Pré-processador disponibilizado pelo EnergyPlus

Air Transfer Rate (W) - **INF**. O calor armazenado na zona é avaliado pela variável *Zone Air Heat Balance Air Energy Storage Rate (W)* - **CAR**. As variáveis são então convertidas para kW/m^2 , onde m^2 refere-se à área do escritório.

Temperatura superficial Sabendo que o ganho por radiação de onda curta permanece constante de método para método, e a radiação de onda longa varia de acordo com a temperatura superficial, optou-se por analisar diretamente a temperatura superficial, a qual é obtida pela variável *Surface Outside Face Temperature ($^{\circ}\text{C}$)*.

3.2.1.2 Modelagem da temperatura da vegetação

Método A modelagem da temperatura da vegetação foi realizada pelo balanço energético superficial deduzido por Campbell e Norman [64]. Os procedimentos necessários para esse cálculo foram desenvolvidos em Python, conforme Anexo A.

Entradas O EnergyPlus foi utilizado para determinar a temperatura do ar (T_a), a velocidade do vento (u), a umidade relativa (ur), a pressão atmosférica (P_a) e a radiação absorvida (R_{abs}), em cada hora do ano.

Parâmetros Em acordo com Campbell e Norman [64] a emissividade da planta (E_s), a dimensão característica da folha (D), e o calor específico do ar à pressão constante (C_p), permanecem constantes.

3.2.2 Modelagem do clima

Parâmetros variáveis O clima urbano foi modelado pelo UWG com base na amostra obtida pelas distribuições apresentadas nas Tabelas 3.1 e 3.2, objetivando a contextualização dos vários fatores que influenciam o balanço energético do meio urbano.

Parâmetros fixos As variáveis de entrada do UWG referentes à estação meteorológica, foram fixadas conforme os padrões especificados pela WMO [65], as outras entradas seguiram os valores sugeridos pela literatura [18], sendo apresentadas no Anexo E.

Procedimentos A simulação paramétrica ocorre através de rotinas desenvolvidas em Python, de maneira que os valores da amostra são colocados nos respectivos campos do arquivo de entrada que servem de interface para o UWG (Anexo E), posteriormente sendo executados no terminal do sistema operacional.

3.2.3 Métodos de modelagem

Níveis Os níveis de modelagem são divididos primeiramente em radiação simplificada (RS) e detalhada (RD), sendo que o método detalhado se difere do simplificado através da modelagem da radiação de onda longa. O segundo nível de modelagem é relativo ao clima, sendo dividido em clima padrão (CP) e clima modificado (CM), de maneira que o clima padrão realiza a simulação da amostra considerando apenas um arquivo climático, e o clima modificado considera um arquivo climático para cada caso, sendo modelado por meio do UWG.

Métodos Os métodos de modelagem (RSCP, RSCM, RDCP e RDCM) permitem analisar quais aspectos da modelagem possuem maior impacto frente à carga térmica, bem como em quais condições esse impacto é maior. Além disso, é válido ressaltar que o método que apresenta o maior nível de detalhamento da ilha de calor urbana é o RDCM, de forma que os demais são investigados como forma de verificar o erro de performance.

3.3 FASE DE ANÁLISE

Na fase de análise são apresentados os procedimentos utilizados para investigar os resultados mediante diferentes aspectos, obtendo-se respostas pontuais para os questionamentos que justificam a temática dissertada.

3.3.1 Análise exploratória

Na análise exploratória ocorre a investigação do comportamento da carga térmica dos métodos de modelagem, especialmente para a validação do RDCM, método que possui o maior nível de detalhamento, partindo de premissas conceituais.

Além do mais, são estabelecidas as métricas utilizadas na determinação do erro de performance entre os métodos de modelagem aplicados nesse estudo. As variáveis de saída que têm o erro

de performance investigado, são estabelecidas e apresentadas conforme as razões pelas quais são analisadas.

3.3.1.1 Erros de performance

Justificativa Partindo da premissa que o comportamento do resultado obtido em uma simulação está diretamente ligado à maneira como a modelagem foi realizada, utilizou-se métricas estatísticas para quantificar as diferenças entre os métodos de modelagem.

Erro local Para a carga térmica, em kWh/m², o erro local² é expresso pela variação percentual, conforme Equação 3.1, onde i representa os métodos RDCP, RDCM e RSCM, sendo aplicado por zona térmica. Para a temperatura do ar externo, em grau Celsius, o erro local é obtido através da subtração do CM pelo CP, sendo aplicado em cada intervalo de tempo do arquivo climático.

$$VariacaoPercentual_i = 100 \cdot \frac{MetodoModelagem_i}{RSCP} - 100 \quad (3.1)$$

Representação gráfica do erro local O comportamento do erro local é observado mediante gráfico de dispersão e histograma, evidenciando em quais cargas térmicas ocorrem as maiores variações. Além disso, é possível observar em que período o erro na temperatura do ar externo é mais significativa, diurno ou noturno.

Erro global O erro global³ é mensurado através da raiz do erro quadrático médio (RMSE), conforme Equação 3.2, onde P_i representa o valor observado em cada caso da amostra, especificamente em casos onde houve detalhamento da radiação e/ou clima (RDCM, RDCP e/ou RSCM), e O_i representa o valor observado em cada caso modelado sem qualquer detalhamento adicional (RSCP). As variáveis de saída utilizadas são: carga térmica total dos escritórios, temperatura do ar externo, temperatura superficial externa dos elementos do entorno e dos componentes construtivos do escritório. Para a carga térmica o i representa o valor anual por zona, e para as

²Erro por escritório ou por valor horário

³Erro em cada caso da amostra

temperaturas o i representa o valor horário, resultando num RMSE para cada caso da amostra.

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (P_i - O_i)^2} \quad (3.2)$$

Representação gráfica do erro global O comportamento do erro global é avaliado conforme histogramas que permitem observar a distribuição de frequência do erro. Os valores que apresentam erro global médio, mínimo e máximo, são identificados como forma de observar as variáveis que o caracterizam, possibilitando um validação teórica.

3.3.1.2 Balanço térmico do ar

Justificativa O comportamento térmico do escritório é resultante da carga interna, da temperatura das superfícies internas, da infiltração, do calor armazenado e do sistema de climatização. Assim, conhecer as principais fontes de ganhos e perdas térmicas compõem um aspecto importante quando o comportamento de uma zona térmica está sendo investigado.

Procedimentos Os 1000 casos são separados em três classes conforme a carga térmica de resfriamento obtida no RDCM. A primeira classe é composta por casos que possuem carga térmica inferior ao 50º percentil, a segunda classe possui carga do 50º ao 75º percentis, a terceira é composta cargas térmicas superiores ao 75º percentil. Essa mesma forma de divisão é aplicada para a variação percentual do RDCM em relação ao RSCP.

Representação gráfica Os componentes do balanço térmico do ar são apresentados em gráficos de caixa agrupados conforme as três classes aqui apresentadas (Item 4.1.1.2). Além disso, o histograma de cada variável da amostra em cada classe é definido para verificar se o comportamento de cada variável é monotônico e linear (Item 4.1.1.3).

3.3.1.3 Clima urbano

Justificativa Como o clima urbano possui comportamento dependente das características urbanas e as condições climáticas podem

promover mudanças significativas no comportamento energético do escritório, a análise do clima denota uma temática importante para o amplo conhecimento do efeito da ilha de calor sobre escritórios condicionados artificialmente.

Método: Comportamento térmico Cada arquivo climático é resumido pela percentagem de horas no ano que em houve potencialmente a necessidade de aquecimento ($<18^{\circ}\text{C}$), resfriamento ($>24^{\circ}\text{C}$) e porcentagem em conforto ($\geq 18^{\circ}\text{C}$ e $\leq 24^{\circ}\text{C}$). Assim, gráficos de caixa permitem observar o comportamento geral dos arquivos climáticos, possibilitando a comparação com o indicadores observados no EPW padrão.

Método: Erro de performance térmica A análise do erro de performance térmica apresenta os mesmos procedimentos necessários para o cálculo do erro global do item 3.3.1.1.

3.3.1.4 Temperatura superficial

Justificativa Quantificar a diferença entre a temperatura do ar e a temperatura da superfície do entorno é algo que permite observar se essa hipótese promove erros consideráveis em toda a amostra ou somente em alguns casos. Além do mais, outro aspecto interessante é quantificar o impacto de métodos de modelagem mais detalhados sobre a temperatura superficial externa do escritório.

Método Por meio do método de modelagem RDCM, após seguir os mesmos procedimentos apresentados no item 3.3.1.1, os casos com maior, média e menor diferença, são identificados e verificados conforme os padrões do item 4.1.1.3.

Representação gráfica Para visualizar o erro global na temperatura superficial, denotado pelo RMSE, os resultados são representados através de histogramas de frequências.

3.3.2 Análise de sensibilidade

Justificativa Determinar o impacto de cada parâmetro que compõe a amostra frente à carga térmica de resfriamento e à variação percentual, sendo aplicados em cada método de modelagem.

Transformação As variáveis de entrada que compõem a amostra foram escalonadas⁴ e centralizadas, sendo posteriormente aplicada a análise de componentes principais (PCA) com rotação *Varimax*, com o objetivo de melhorar seu comportamento linear. O PCA está disponível no pacote *psych* da linguagem de programação R.

Método Os índices de sensibilidade são obtidos pelo método do coeficiente de regressão padronizado (SRC), cujas variáveis de entrada são derivadas do PCA. O SRC está disponível no pacote *sensitivity* da linguagem de programação R.

Verificação Para que os resultados sejam confiáveis, o SRC é aplicado em variáveis de entrada escalonadas e centralizadas, cujo modelo deve apresentar considerável linearidade, ou seja, coeficiente de determinação superior à 0,7 [52]. Quando o comportamento é pouco linear, os índices de sensibilidade apresentam inconsistências, já que o modelo linear não descreve o fenômeno modelado.

Representação gráfica Os resultados são apresentados em gráficos de barras com o objetivo de verificar se determinada variável promove um aumento ou uma diminuição no parâmetro de saída analisado, também tornando possível a observação do grau de importância de cada parâmetro de entrada.

⁴Processo para colocar as variáveis em uma mesmo intervalo

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

A ilha de calor urbana é um fenômeno investigado através da temperatura do ar e/ou superficial da malha urbana. Considerar seu efeito sobre a simulação energética de edifícios não é algo trivial, dadas as limitações que existem nos programas de simulação.

O EnergyPlus, como programa de simulação energética, tem sido amplamente utilizado pelos profissionais da modelagem, os quais geralmente desconsideram a presença de elementos externos, o que interfere diretamente na carga térmica que é recebida pela edificação, por meio do sombreamento.

Quando há a inclusão desses elementos por parte do profissional, a temperatura superficial atribuída a eles é igual à do ar. De fato, no período noturno essa simplificação pode ser aceitável, porém durante o dia a temperatura superficial é normalmente superior à do ar, especialmente em elementos que apresentam balanço térmico superficial positivo.

O EnergyPlus desconsidera qualquer influência do entorno sobre a temperatura do ar externo, ocorrendo apenas a variação vertical conforme a altura da zona térmica. Assim, realizar a modelagem microclimática através do UWG [59] é algo essencial para definir condições climáticas condizentes ao entorno do escritório.

Para conhecer o efeito da ilha de calor urbana sobre a modelagem energética de edificações, a metodologia foi aplicada produzindo os resultados que são apresentados nesse capítulo. Os resultados foram seccionados em análise exploratória e análise de sensibilidade, as quais contêm o comportamento da carga térmica, da temperatura do ar externo e da temperatura da malha urbana.

4.1 ANÁLISE EXPLORATÓRIA

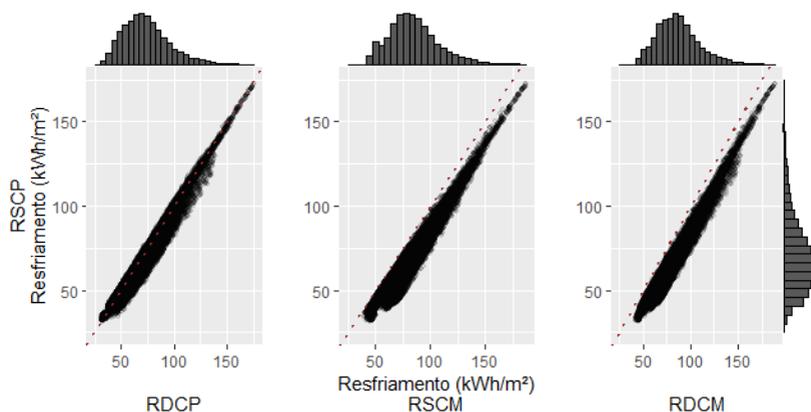
A análise exploratória é realizada com objetivo de observar o comportamento geral das variáveis de saída, assim como a tendência dos parâmetros que compõem a amostra. Essa abordagem de análise permite verificar se os resultados são consistentes e como está ocorrendo o comportamento da ilha de calor urbana frente à carga térmica dos escritórios. Além disso, é possível observar um comparativo entre as hipóteses estabelecidas pelo EnergyPlus para a temperatura do ar e temperatura superficial do entorno, e os valores provenientes de métodos de modelagem mais detalhados.

4.1.1 Carga térmica

Os 1000 casos amostrados por LHS foram modelados pelos métodos estabelecidos no Item 3.2.3, sendo representados em gráficos de dispersão segundo a carga térmica obtida para cada escritório. O eixo x representa a carga obtida por métodos onde houve algum nível de detalhamento. O eixo y representa a carga térmica da modelagem sem qualquer detalhamento adicional.

Os resultados para carga térmica de resfriamento (Figura 4.1) mostram que há uma maior frequência entre 50 e 100 kWh/m². Esses valores podem parecer baixos quando comparados aos casos simulados sem elemento de sombreamento, porém suas magnitudes são explicadas pela menor quantidade de radiação solar que é recebida pelo escritório.

Figura 4.1: Carga térmica de resfriamento do método RSCP em função dos métodos de modelagem RDCP, RSCM e RDCM



A ilha de calor urbana, quer seja pelo detalhamento climático e/ou da radiação de onda longa, promoveu variações de carga térmica predominantemente positivas, principalmente quando há modificação no arquivo climático (CM). Todavia, o método que detalhou somente a radiação de onda longa, RDCP, indica que certos escritórios apresentam carga térmica inferior ao RSCP.

Quanto ao aumento na carga térmica em função da modificação climática, há um indicativo de que o contexto urbano promoveu um aumento na temperatura do ar, interferindo direta-

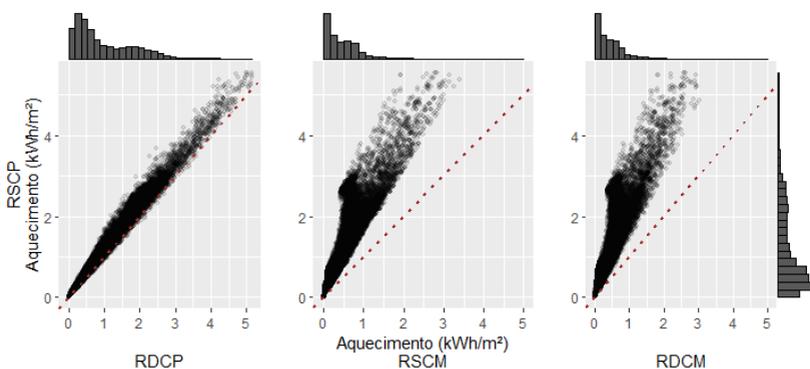
mente no ganho de calor por infiltração e indiretamente no ganho de calor por convecção através dos elementos construtivos.

Quanto ao decréscimo na carga térmica observado em alguns casos do RDCP, há um indicativo de que esses escritórios ganham uma quantidade calor menor para o entorno através de seus elementos construtivos. Tratam-se de casos onde o balanço térmico superficial é mais positivo que dos elementos do entorno. Isso faz com que sua temperatura superficial seja alta e, por consequência, o entorno, com menor temperatura superficial, promova seu resfriamento, diminuindo a quantidade de calor que é recebida.

Como a modelagem do clima urbano promove o aumento da temperatura do ar externo, e as superfícies do entorno possuem valores superiores aos do RSCP, o nível de detalhamento CM pode diminuir o erro associado ao nível RS. Todavia, ainda que essa hipótese seja plausível, tornar desnecessário o nível RD é algo infactível, já que os resultados foram totalmente descolados à direita, afastando-se da linha pontilhada que representa a reta de regressão cuja correlação seria ideal.

O nível RD, no geral, aumentou a carga de resfriamento, porém o acréscimo promovido pelo CM foi mais significativo. Isso indica que o ganho térmico por radiação de onda longa é inferior ao ganho por infiltração e convecção, resultante do nível CM.

Figura 4.2: Carga térmica de aquecimento do método RSCP em função dos métodos de modelagem RDCP, RSCM e RDCM



Os resultados para carga térmica de aquecimento (Figura 4.2) mostram maior frequência entre 0 e 2 kWh/m², com carga térmica máxima de 5,8 kWh/m². Esses valores podem parecer inconsisten-

tes já que a cidade de Santa Maria apresenta uma frequência considerável nas baixas temperaturas, porém sugerem que as fontes internas e a envoltória são suficientes para reduzir a demanda de aquecimento.

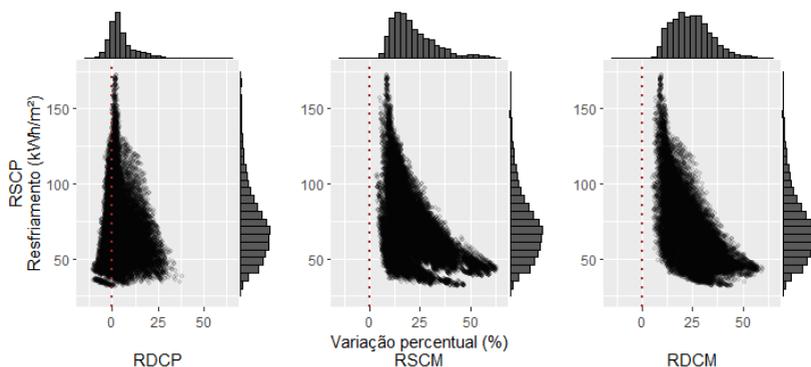
Os métodos de modelagem que realizam algum nível de detalhamento da ilha de calor urbana, promovem a diminuição da carga térmica de aquecimento, sendo maior nos métodos que realizam o detalhamento do clima urbano (CM). Todavia, em razão do aquecimento apresentar valores pouco significativos, ele será desconsiderado de qualquer análise adicional realizada nesse capítulo.

4.1.1.1 Erro de performance energética

Os métodos detalhados de fato alteram a carga térmica de resfriamento dos escritórios. Assim, para melhorar a visualização do erro associado à modelagem pelo método RSCP, as alterações são representadas pela variação percentual, conforme Item 3.3.1.1.

Os resultados mostram (Figura 4.3) que as maiores variações percentuais ocorrem nos casos com menor carga térmica de resfriamento, ao passo que variações percentuais menores são observadas em valores elevados de carga térmica.

Figura 4.3: Carga térmica de resfriamento do método RSCP em função da variação percentual dos métodos RDCP, RSCM e RDCM



Quando houve somente a modelagem da radiação de onda longa (RDCP), foi possível reproduzir o fenômeno do resfriamento radiativo na fachada do escritório de forma efetiva, promovendo a diminuição da carga de resfriamento em até 10,4%, fato ocor-

rido em 27,3% dos casos. Porém, majoritariamente os resultados estabeleceram um aumento na carga térmica de resfriamento em até 38,2%, com valor médio em 4,5%, chegando à diferença de 30 kWh/m².

Do ponto de vista energético, um acréscimo de 30 kWh/m² pode ser suficiente para interferir na classificação energética de um escritório num processo de etiquetagem, principalmente quando o caso de referência for mais suscetível à ilha de calor urbana do que seria na forma de modelagem padrão do EnergyPlus (RSCP).

O RDCP foi o método que apresentou menor desvio padrão, sugerindo que o erro é mais significativo em casos que apresentam um determinado padrão dentro da amostra, reforçando a importância da análise de sensibilidade apresentada nesse estudo (Item 4.2).

Quando houve somente a modelagem do arquivo climático, foi possível observar unicamente valores positivos para a variação percentual da carga térmica de resfriamento, com erro de performance de 3% à 63%, com valor médio em 21,6%. Além disso, foi constatado que somente a modelagem climática promoveu uma sutil diminuição do erro associado ao não detalhamento da radiação de onda longa na modelagem energética, visto a positiva intensidade da ilha de calor urbana.

O impacto da ilha de calor (método RDCM) sobre a carga térmica de resfriamento é definido como um aspecto que promove um acréscimo nesse indicador, inclusive nos casos com menor erro de performance associado. De modo geral, os resultados indicam que os escritórios apresentam variações percentuais da carga térmica de resfriamento de 5% à 59%, representada por uma função densidade probabilidade normal com 24,21% de média e 9,36% de desvio padrão.

Os métodos que detalham o nível de modelagem CM apresentam uma separação bem definida da linha pontilhada, expressando um aumento na carga térmica. Assim, como o RDCP apresentou valores negativos, o mais plausível é que o RDCM apresente valores ligeiramente inferiores ao RSCM.

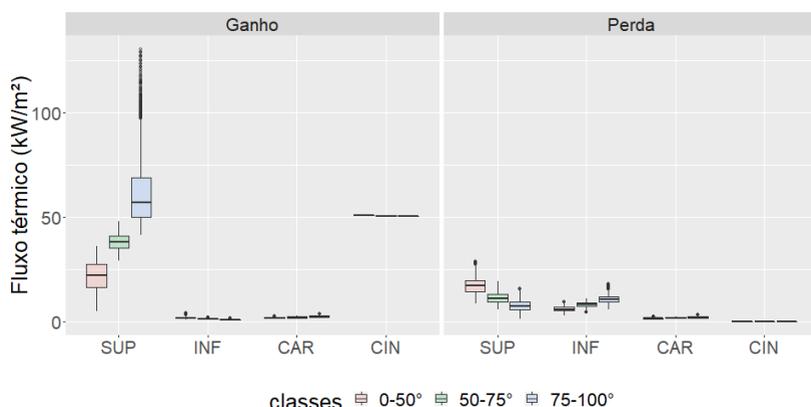
Num primeiro momento os resultados são contraintuitivos, visto que os histogramas evidenciam um aumento na variação percentual com RDCM, inclusive apresentando menor dispersão que o RSCM. Assim, os resultados indicam que o RSCM promove um aumento do ganho de calor. No entanto, a inserção da radiação de onda longa suscitou um menor ganho líquido de calor através dos elementos construtivos, no caso de variação percentual alta, e promoveu um maior ganho de calor através dos elementos, no caso de

variação percentual baixa.

4.1.1.2 Balanço térmico do ar

Os resultados do método de modelagem RDCM, por ter o maior grau de detalhamento, foi separado em três classes conforme os histogramas de frequência da carga térmica de resfriamento e da variação percentual (Figuras 4.1 e 4.3). Assim, foi possível representar o comportamento do balanço térmico do ar conforme há o aumento no resfriamento ou na variação percentual.

Figura 4.4: Balanço térmico do ar das classes determinadas segundo a carga térmica de resfriamento



Os resultados (Figura 4.4) mostram que com o aumento da carga térmica de resfriamento, os escritórios ganham mais calor através das superfícies (SUP), havendo uma diminuição na perda de calor através das superfícies e um aumento da perda de calor pela infiltração, visto que o ar interno atende a estar mais aquecido.

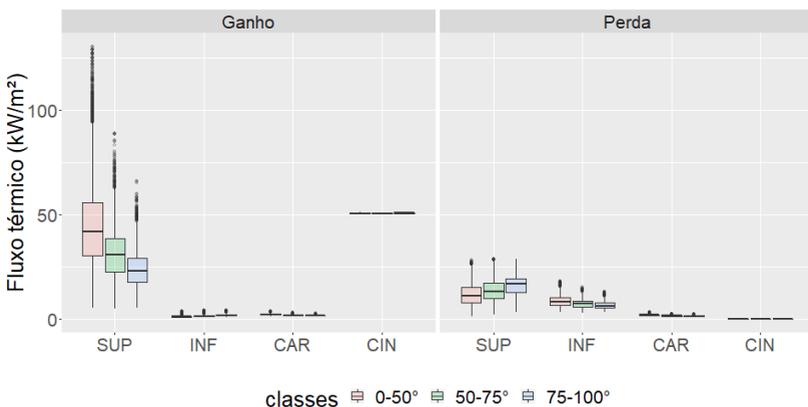
Quanto às janelas, parte da radiação solar é absorvida pelo vidro e transformada em fonte de calor para o escritório por meio da radiação de onda longa, parte é refletida para o entorno e a radiação solar restante é transferida para o interior do escritório. Assim, a radiação solar que ingressa no escritório por meio da janela, é transferida para o ar por meio da convecção com as superfícies internas que são aquecidas por essa fonte.

Na envoltória, a janela representa o elemento com maior fragilidade quanto ao comportamento energético. Essa assertiva é en-

dossada quando leva-se em consideração a transmitância térmica do vidro em comparação aos demais fechamentos. Assim, os resultados indicam a importância do uso de dispositivos de proteção solar, como persianas, venezianas e brises, sendo essa uma estratégia com potencial para melhorar o comportamento energético dos escritórios.

Com relação ao calor armazenado na zona (CAR), a carga interna de equipamentos, pessoas e iluminação (CIN), bem como o ganho de calor através da infiltração (INF), suas variações foram desprezíveis. Além do mais, os resultados explicitam que a CIN é o componentes com maior impacto frente ao comportamento térmico, seguido do ganho de calor por meio das superfícies (SUP).

Figura 4.5: Balanço térmico do ar das classes determinadas segundo a variação percentual na carga térmica de resfriamento



Quanto ao balanço térmico aplicado na classificação obtida pela variação percentual da carga de resfriamento (Figura 4.5), foi notável que as classes com maiores variações percentuais apresentam um menor ganho de calor pelas superfícies, um aumento das perdas de calor através das superfícies e uma diminuição na perda de calor por meio da infiltração, indicando que o ar no interior do escritório tende a estar menos aquecido.

Os resultados indicam que as maiores variações percentuais são relativas às menores cargas de resfriamento, estando em consonância com a Figura 4.3. Quanto ao calor armazenado na zona (CAR), a carga interna de equipamentos, pessoas e iluminação

(CIN), bem como o ganho de calor através da infiltração (INF), suas variações continuam desprezíveis.

4.1.1.3 Comportamento da amostra

As classes definidas no Item 4.1.1.2 são inspecionadas quanto às distribuições de frequência das variáveis que caracterizam a amostra, possibilitando verificar se o comportamento é monotônico e linear. Padrões são definidos para sugerir em quais configurações a carga térmica de resfriamento e variação percentual potencialmente apresentam valores elevados.

Para as classes definidas conforme a carga térmica de resfriamento, os resultados (Figura F.1) indicam que os escritórios com maior carga térmica possuem maior largura da fachada, maior porcentagem de vidro na fachada, maior fator solar, maior número de andares, menor taxa de ocupação e menor cobertura vegetal.

Quanto maior for a porcentagem de parede externa no escritório, maior será o ganho de calor. Edificações altas, pouco sombreadas e que estão contidas num entorno reflexivo, apresentam melhor desempenho quando o tamanho da janela é consideravelmente pequeno, com vidros de baixo fator solar, ao menos nas fachadas que possuem maior insolação. Uma alternativa é manter as janelas com grandes dimensões e adicionar dispositivos de proteção solar, potencialmente promovendo a ventilação e iluminação natural.

Para as classes definidas conforme a variação percentual da carga de resfriamento anual, os resultados (Figura F.2) indicam que os escritórios com maior variação percentual possuem maior largura da fachada, maior porcentagem de vidro na fachada, maior número de andares, menor fator solar, maior absorvância da parede do entorno, maior absorvância do pavimento, maior taxa de ocupação e menor cobertura vegetal.

É notável que o método RDCM se faz necessário principalmente em escritórios que possuam facilidade em trocar calor com o meio externo, estando contidos em áreas muito sombreadas e que apresentam altos índices de aproveitamento, características recorrentes nos centros urbanos. A variação percentual é maior quando o entorno é pouco reflexivo de maneira que a temperatura superficial, por ser mais elevada, promove o ganho de calor por radiação de onda longa e, indiretamente, promove o ganho por infiltração e convecção através do aumento da temperatura do ar.

As classes resultantes da carga de resfriamento e da variação percentual apresentam comportamento linear bem definido na mai-

oria das distribuições de frequência. Todavia, a pouca variabilidade das variáveis omitidas sugerem que as mesmas apresentam baixos índices de sensibilidade. Assim, os resultados indicam que a análise de sensibilidade deve apresentar resultados consistentes, principalmente em função da mesma utilizar modelos lineares.

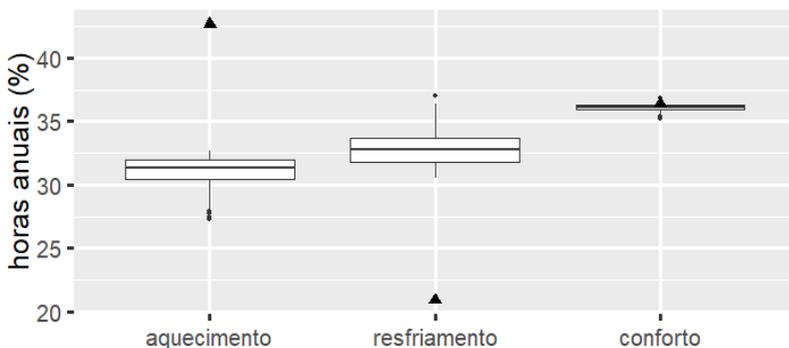
4.1.2 Clima urbano

Os 1000 casos amostrados tiveram seu clima modelado por meio do programa UWG, seguindo os procedimentos estabelecidos no (Item 3.1.1). Para um melhor entendimento das alterações que ocorreram nos arquivos climáticos dos casos amostrados, foram realizadas análises acerca do seu comportamento climático e erro de performance térmica, conforme o Item 3.3.1.3.

4.1.2.1 Comportamento térmico

Os arquivos climáticos foram agrupados conforme a porcentagem de horas no ano em que a temperatura de bulbo seco está abaixo de 18°C (aquecimento), acima de 24°C (resfriamento) e entre esses valores (conforto). Isso possibilitou realizar uma análise comparativa que quantifica as mudanças que ocorreram com a modelagem climática, conforme Figura 4.6.

Figura 4.6: Comportamento térmico dos arquivos climáticos



Os resultados indicam que a porcentagem de horas em conforto teve pouca variação entre os casos da amostra, com média de

36,1%. Já o arquivo climático padrão apresentou 36,4% das horas do ano em conforto, estando muito próximo da média dos casos.

O arquivo climático padrão, utilizado no nível de modelagem CP, superestima a porcentagem de horas no ano em que a temperatura do ar está abaixo de 18°C. Com a modelagem climática essa porcentagem foi de 42,7% para um valor médio de 31%, definindo ao escritório uma potencial menor necessidade de aquecimento.

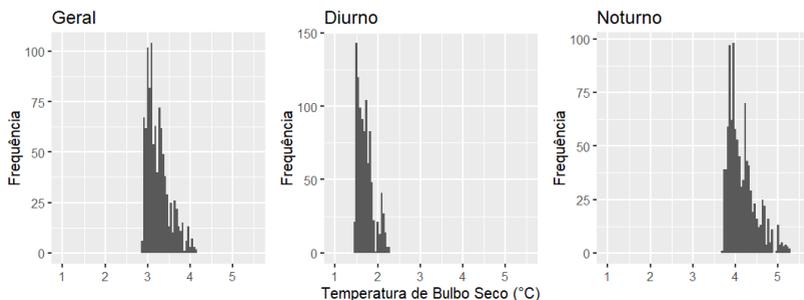
A modelagem do clima urbano também explicita que o arquivo climático padrão subestima a porcentagem de horas em que a temperatura do ar supera os 24°C. Com a modelagem climática a porcentagem foi de 20,9% para um valor médio de 32,85%, potencialmente definindo ao escritório uma maior carga de resfriamento.

O aspecto mais notório do comportamento térmico é a inversão que ocorre entre aquecimento e resfriamento. Ainda que exista uma variabilidade maior, os valores máximo e mínimos observados nos arquivos modelados se distanciaram significativamente do arquivo climático padrão que é representado pelo triângulo.

4.1.2.2 Erro de performance térmica

Para um melhor entendimento da intensidade da ilha de calor quanto à temperatura de bulbo seco, foi calculada a raiz do erro quadrático médio (RMSE) dos valores horários de cada arquivo climático modelado frente ao arquivo climático padrão. Esse indicador foi determinado para o período diurno, noturno e geral, que representa todos os valores horários ao longo do ano (Figura 4.7).

Figura 4.7: RMSE do arquivo climático modificado (CM) com relação ao arquivo climático padrão (CP)



Os resultados evidenciam que o aumento da temperatura de

bulbo seco em razão da modelagem do clima urbano é mais significativo durante à noite do que no período diurno. Além disso, os histogramas permitem observar que entre os casos também existem diferenças nas temperaturas modeladas, justificando a realização da modelagem climática em todos os casos da amostra.

O impacto do clima urbano sobre a carga térmica dos escritórios certamente seria mais perceptível caso o horário de funcionamento fosse exclusivamente noturno, quando a ilha de calor é mais acentuada. Mesmo com o horário de funcionamento diurno, a maior intensidade observada durante a noite poderia diminuir a efetividade do potencial de ventilação noturna, caso essa fosse uma estratégia de condicionamento passivo utilizado na edificação.

4.1.3 Temperatura superficial

O detalhamento da radiação de onda longa representada na análise exploratória da carga térmica pelo método de modelagem RDCM (Item 4.1.1), evidenciou que as temperaturas das superfícies do entorno de fato promovem alterações nas cargas térmicas de resfriamento dos escritórios.

Buscando compreender a intensidade do erro associado à temperatura superficial do entorno, foi realizada a análise apresentada no Item 4.1.3.1. E, para compreender o impacto da radiação de onda longa sobre a temperatura superficial dos elementos externos do escritório, foi realizada a análise apresentada no Item 4.1.3.2. O método de análise de ambos é apresentado no Item 3.3.1.4.

4.1.3.1 Entorno

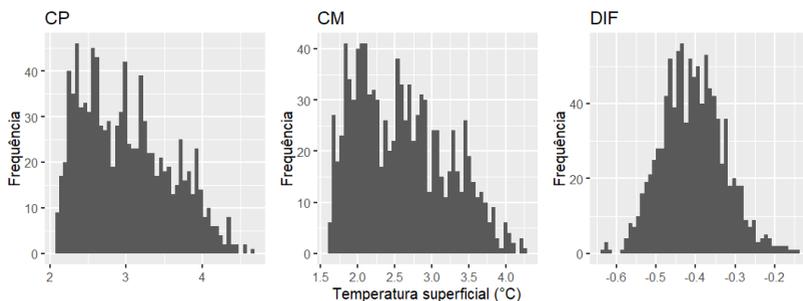
O erro associado à temperatura do entorno foi quantificado por meio do RMSE. Essa métrica foi aplicada na temperatura superficial do método de modelagem RDCP em relação à TBS¹ do arquivo climático padrão (CP). Além de ser aplicada na temperatura superficial do método de modelagem RDCM em relação à TBS do arquivo climático modificado (CM).

Além disso, buscando compreender a diferença entre o RMSE do CM e CP, foi representada a distribuição de frequência da subtração dos valores (DIF). Isso permitiu observar se a modelagem climática aproxima as temperaturas de bulbo seco das superficiais do entorno, ou mesmo se o erro associado é maior.

¹Temperatura de bulbo seco

Os resultados (Figura 4.8) indicam que com a modelagem climática, ao considerar a temperatura superficial do entorno igual a do ar, o erro é, em média, $0,40^{\circ}\text{C}$ menor. Isso demonstra que o clima urbano, por apresentar temperaturas mais elevadas, aproxima-se sutilmente do valor observado nas superfícies do entorno.

Figura 4.8: Temperatura do entorno



Quanto ao CP, o maior error foi de $4,64^{\circ}\text{C}$, com valor mínimo de $2,08^{\circ}\text{C}$ e erro médio de 3°C . Já com relação ao CM, o maior error foi de $4,27^{\circ}\text{C}$, com valor mínimo de $1,62^{\circ}\text{C}$ e médio de $2,6^{\circ}\text{C}$. Isso indica que a modelagem da radiação de onda longa é necessária inclusive nos casos onde o erro associado é menor, uma vez que o erro associado é ainda maior no período diurno (Figura F.3)

As características referentes aos casos máximos, mínimos e médios (Tabela F.1) do CM, sugerem que os maiores erros ocorrem em casos que apresentam baixa taxa de ocupação e índice de aproveitamento, com superfícies que apresentam alta absorvância solar.

No método de modelagem RDCM, a diferença de temperatura entre a superfície e o ar pode chegar a 44°C para a temperatura observada na via pública² (Figura F.3). O erro é menor na parede e janela, porém continuam sendo positivos, com valores que chegam a 12°C no caso da parede e 5°C no caso da janela.

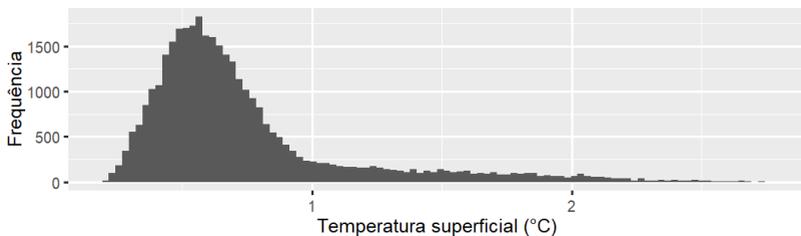
4.1.3.2 Escritório

O detalhamento da radiação de onda longa altera o balanço térmico superficial da parede e janela do escritório, alterando suas

²Pavimento e vegetação

temperaturas. Para conhecer a intensidade dessa alteração, a Figura 4.9 expressa o RMSE da temperatura superficial registrado no RDCM frente ao RSCM.

Figura 4.9: RMSE das temperaturas dos elementos externos do escritório do método RDCM para RSCM



O maior RMSE calculado expressa uma máxima de $2,75^{\circ}\text{C}$, com mínima de $0,2^{\circ}\text{C}$ e média de $0,74^{\circ}\text{C}$. Isso evidencia que a modelagem detalhada da radiação altera as temperaturas superficiais dos escritórios em todos os casos amostrados, porém acima de 1°C o erro é mais significativo e a frequência é menor, ocorrendo em 16% das superfícies.

As características referentes aos casos máximos, mínimos e médios (Tabela F.2) do RDCM com relação ao RSCM, indicam que a maior diferença ocorreu em baixa taxa de ocupação e índice de aproveitamento, com superfícies que apresentam alta absorvância solar. A Figura F.4 indica que o componente construtivo com maior RMSE apresenta uma máxima diferença na temperatura superficial externa do escritório (RDCM-RSCM) que pode chegar a $9,87^{\circ}\text{C}$, com mínima de $-0,82^{\circ}\text{C}$ e média de $3,12^{\circ}\text{C}$.

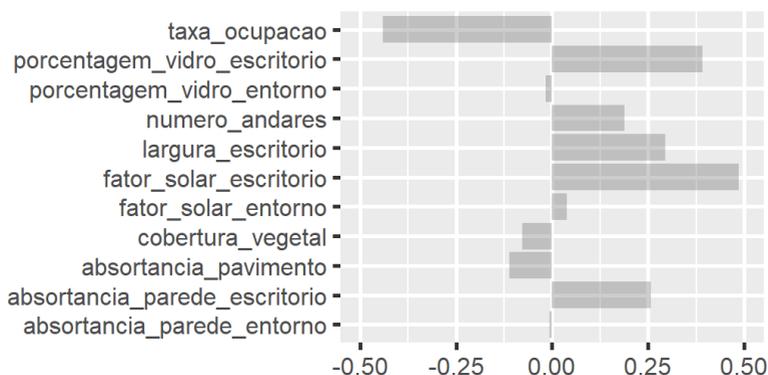
4.2 ANÁLISE DE SENSIBILIDADE

A análise de sensibilidade é realizada com objetivo de observar, por meio dos índices de sensibilidade, a importância das variáveis de entrada que compõem a amostra frente à carga térmica de resfriamento e variação percentual. Essa abordagem permite o estabelecimento de tendências que evidenciam o efeito da ilha de calor urbana sobre a carga térmica de escritórios.

4.2.1 Carga térmica de resfriamento

Os resultados mostram que os índices de sensibilidade obtidos pelo RDCM (Figura 4.10) apresentam a mesma tendência do RSCP (Figura G.1). A única diferença observada nos gráficos está relacionada com a magnitude do índice, indicando que a modelagem da ilha de calor urbana alterou apenas o nível de importância de cada variável de entrada da amostra. Assim, as considerações presentes nessa seção referem-se ao método RDCM, sendo o método de modelagem mais detalhado quando à ilha de calor urbana.

Figura 4.10: Índice de sensibilidade da amostra perante a carga de resfriamento pelo método RDCM



As janelas de fato promovem modificações significativas na carga térmica de resfriamento, visto que suas propriedades geométricas e ópticas apresentam altos índices de sensibilidade. Isso evidencia que altos valores de porcentagem vidro na fachada e fator solar do vidro promovem um significativo aumento na carga de resfriamento. Porém, esse alto grau de importância é observado apenas no escritório, sendo insignificante no entorno.

Um fato notável é a baixa sensibilidade de variáveis como: cobertura vegetal, absortância do pavimento, porcentagem de vidro da fachada do entorno, fator solar do vidro do entorno e absortância da parede externa do entorno. Isso não indica necessariamente que tais variáveis possuem baixo índice em todas as situações.

Variáveis como a cobertura vegetal e absortância do pavi-

mento são mais sensíveis em escritórios próximos ao solo, devido ao maior fator de forma com a via pública, ao passo que nos andares superiores suas sensibilidades decrescem.

Variáveis relativas às edificações do entorno, como a porcentagem de vidro na fachada, fator solar do vidro e absorvância da parede, apresentam valores mais elevados em escritórios localizados nos andares intermediários. Isso ocorre devido ao maior fator de forma com a tais elementos urbanos, ao passo que suas sensibilidades decrescem próximo da cobertura e do térreo.

Escritórios que apresentam maiores proporções entre a área de fachada e a área do piso demonstram valores mais elevados de carga de resfriamento que aqueles que apresentam menores proporções. Isso ocorre devido ao maior contato do volume de controle que representa a zona térmica, com o exterior da edificação, maximizando o ganho de calor.

A taxa de ocupação é o parâmetro geométrico urbano que apresenta maior índice de sensibilidade sobre a carga térmica de resfriamento, uma vez que ele possui a capacidade de controlar a quantidade de radiação que chega na malha urbana.

Os modelos lineares do RDCM e RSCP apresentam coeficiente de determinação de 0,792 e 0,786, respectivamente. Isso reforça o comportamento linear indicado em **Comportamento da Amostra** (Item 4.1.1.3), determinando que os índices de sensibilidade resultantes do método do coeficiente de regressão padronizado (SRC), são válidos como indicadores de sensibilidade.

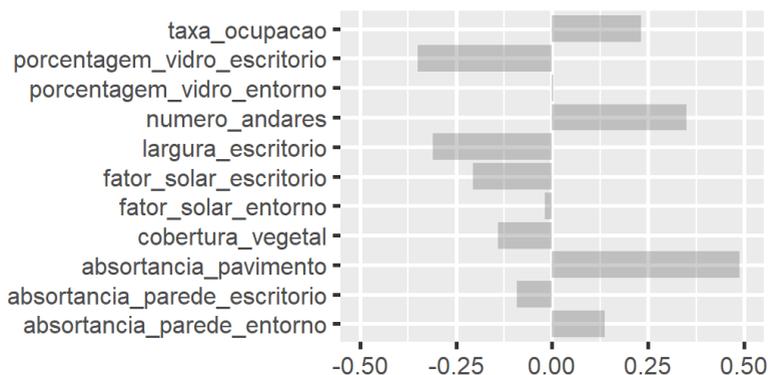
4.2.2 Variação percentual

Os resultados (Figura 4.11) mostram que as maiores variações percentuais são observadas em configurações urbanas mais adensadas, onde uma menor quantidade de radiação solar incide sobre as fachadas, possuindo uma menor quantidade de cobertura vegetal e pavimento com alta absorvância.

A radiação solar que entra no cânion urbano é refletida em menor quantidade, visto que o entorno apresenta baixa refletividade. Assim, a radiação de onda curta promove o aquecimento das superfícies, cujo calor é transferido para o ar, por convecção, e para o escritório, por radiação de onda longa.

Os escritórios com maiores variações percentuais apresentam menor proporção fachada/piso, menor porcentagem de vidro na fachada, menor fator solar do vidro e menor absorvância da parede, indicando que um padrão favorável à reflexão solar. Isso sugere que

Figura 4.11: Índice de sensibilidade da amostra perante a variação percentual da carga de resfriamento



os maiores erros de performance ocorrem em escritórios que apresentam menor carga térmica de resfriamento, corroborando com os resultados apresentados no Item 4.1.1.1.

As variáveis que caracterizam geometricamente a configuração urbana formam o grupo que apresentou índices de sensibilidade mais significativos. Porém, o maior índice foi obtido para a absortância do pavimento, visto que altas absortâncias favorecem o aumento da temperatura superficial, interferindo diretamente nos escritórios através da radiação por onda longa e indiretamente por meio do aquecimento do ar que define novas condições para a convecção e infiltração.

A absortância da parede do entorno possui baixo índice de sensibilidade, porém a porcentagem de vidro na fachada e o fator solar, apresentam índices insignificantes. Quanto ao escritório, essa relação é invertida, onde os índices de sensibilidade da janela são maiores do que aqueles observados na parede.

Isso indica que o ganho de calor por radiação de onda longa proveniente das janelas do entorno é pequeno quando comparado à parede. Quanto ao escritório, a janela define um cenário onde há menor incidência de radiação solar para dentro da zona térmica, maximizando o ganho por condução resultante das trocas térmicas por radiação de onda longa e convecção.

O modelo linear da variação percentual apresenta coeficiente

de determinação de 0,722. Isso indica um comportamento linear, validando os índices de sensibilidade do método do coeficiente de regressão padronizado.

5 CONCLUSÕES

O estudo aqui desenvolvido teve por objetivo analisar o impacto da ilha de calor urbana sobre o desempenho energético de escritórios condicionados artificialmente. Esse impacto foi quantificado por meio da simulação energética do edifício através dos programas EnergyPlus e UWG. Além do mais, a ilha de calor foi caracterizada pela temperatura superficial da malha urbana e pelo comportamento higrotérmico do clima urbano.

A hipótese considerada pelo EnergyPlus, de que as superfícies do entorno possuem a mesma temperatura do ar, pode ser aceitável na ausência de radiação solar. Durante o dia essa simplificação subestima significativamente a radiação de onda longa que é recebida pelo escritório, visto que a temperatura superficial do entorno é superior à do ar, especialmente em superfícies que possuem alta absorvância.

Quando houve somente a modelagem da radiação de onda longa foi possível reproduzir o fenômeno do resfriamento radiativo na fachada do escritório de forma efetiva, promovendo a diminuição da carga de resfriamento em até 10,4%, fato ocorrido em 27,3% dos casos. Porém, majoritariamente os resultados estabeleceram um aumento na carga térmica de resfriamento em até 38,2%, com valor médio em 4,5%.

O arquivo climático disponibilizado pelo órgão que desenvolve o programa EnergyPlus tem a função de representar o comportamento climático de uma estação meteorológica. Porém, os resultados desta pesquisa explicitam que o clima urbano apresenta comportamento distinto até mesmo entre os casos da amostra. Isso reforça a necessidade da modelagem climática como procedimento precedente à modelagem energética da edificação.

Quando houve somente a modelagem do arquivo climático, foi possível observar unicamente valores positivos para a variação percentual da carga térmica de resfriamento, com erro de performance de 3% a 63%, com valor médio em 21,6%. Além disso, constatado que somente a modelagem climática promoveu uma sutil diminuição do erro associado ao não detalhamento da radiação de onda longa na modelagem energética, visto a intensidade da ilha de calor urbana.

O arquivo climático padrão utilizado no nível de modelagem CP superestima a porcentagem de horas no ano em que a temperatura do ar está abaixo de 18°C. Com a modelagem climática, essa porcentagem foi de 42,7% para 31%, definindo ao escritório uma necessidade de aquecimento inferior.

A modelagem climática indicou que o arquivo climático padrão subestima a porcentagem de horas em que a temperatura do ar supera os 24°C, indo de 20,9% para 32,85%. Além disso, as porcentagens de horas em conforto dos arquivos climáticos permaneceram próximas a 36%, inclusive após a modelagem do clima urbano.

O impacto da ilha de calor sobre a carga térmica de resfriamento é definido como um aspecto que promove um acréscimo nesse indicador, inclusive nos casos com menor erro de performance associado. De modo geral, os resultados indicam que os escritórios apresentam variações percentuais da carga térmica de resfriamento de 5% à 59%, representada por uma função densidade probabilidade normal com 24,21% de média e 9,36% de desvio padrão.

O balanço térmico do ar explicitou que a carga interna denotada pela iluminação, ocupação e equipamentos, representa uma significativa fonte de calor para a zona. Isso explica a razão pela qual a carga térmica de aquecimento apresentou valores desprezíveis ao longo dos quatro métodos de modelagem analisados.

O fluxo térmico resultante da convecção com as superfícies representa a componente do balanço que possui maior potencial de otimização. É válido salientar que a significativa contribuição das superfícies é resultado do comportamento energético das janelas, indicando que o uso de dispositivo de proteção solar pode promover a melhora do comportamento energético da envoltória.

Quanto à perda por infiltração, foi observado que essa componente acompanha a tendência do fluxo térmico da superfície, porém com pouca variabilidade. Isso indica que o acréscimo no fluxo térmico da superfície promove o aumento da temperatura do ar interno, ressaltando a perda por infiltração. Além do mais, a diminuição do ganho pela superfície estabelece um decréscimo na temperatura do ar interno, minimizando a perda por infiltração.

O balanço térmico do ar aplicado à carga térmica de resfriamento permitiu observar que fluxos térmicos positivos promovem o aumento da carga de resfriamento, sendo um comportamento lógico e plausível. Todavia, essa assertiva reforçou a percepção de que as maiores variações percentuais são observadas em escritórios que apresentam menor valor de carga térmica.

Quanto à análise de sensibilidade, os índices indicam um alto grau de importância frente à carga de resfriamento e variação percentual para a taxa de ocupação e número de andares, especialmente por serem capazes de controlar a quantidade de radiação que entra no cânion urbano.

A largura e as propriedades geométricas e ópticas das janelas do escritório também apresentam alto grau de importância em relação à carga térmica e à variação percentual, especialmente devido ao maior contato entre o volume de controle que representa a zona térmica e o exterior da edificação, maximizando ou minimizando o ganho de calor. Porém, esse alto grau de importância é observado apenas no escritório, sendo insignificante no entorno.

A cobertura vegetal da via pública e a absorvância do pavimento apresentaram baixa sensibilidade quanto à carga de resfriamento. Porém, como a análise de sensibilidade foi realizada em todos escritórios de cada um dos 1000 casos amostrados, essas variáveis que seriam sensíveis no andar térreo, perdem sensibilidade nos andares superiores.

Na análise de sensibilidade aplicada à variação percentual, a cobertura vegetal continuou não apresentando valores muito significativos. Porém, a absorvância do pavimento apresentou o maior índice de sensibilidade observado, visto que altas absorvâncias favorecem o aumento da temperatura superficial, interferindo diretamente nos escritórios através da radiação por onda longa e indiretamente por meio do aquecimento do ar que define novas condições para a convecção.

O estudo evidenciou que a ilha de calor urbana promoveu um decréscimo da carga de aquecimento e um significativo acréscimo na carga térmica de resfriamento, observado em todos os casos da amostra. Além do mais, foi possível observar padrões em que a carga térmica de resfriamento é maior ou mesmo quando o erro de performance denotado pela variação percentual da carga térmica de resfriamento é significativo.

Por fim, é esperado que os desdobramentos desta pesquisa guiem os profissionais da modelagem para casos onde a desconsideração da ilha de calor promove significativo erro na carga térmica de escritórios condicionados artificialmente.

5.1 LIMITAÇÕES E JUSTIFICATIVAS

As limitações desse estudo são indicadas em conformidade com a ordem de execução das etapas de desenvolvimento:

- O número de variáveis consideradas na amostragem foi limitado em 11 parâmetros. Isso foi definido com o objetivo de estabelecer uma amostra pequena que apresentasse resultados consistentes. Além do mais, um aumento no número de va-

riáveis promoveria um significativo acréscimo no volume de dados a serem processados e armazenados pelo computador, inviabilizando o desenvolvimento desse estudo;

- Um melhor detalhamento da radiação atmosférica foi desconsiderado na modelagem energética. Isso foi definido por se tratar de um assunto complexo que requer conhecimento atmosférico avançado, exigindo um maior tempo para o seu desenvolvimento, bem como um direcionamento específico;
- As modificações nas velocidades do vento, conforme o adensamento urbano, foram desconsideradas em razão da versão utilizada do UWG/DragonFly não possuir tal recurso;
- As modificações nos padrões dos ventos foram desconsideradas por necessitar da modelagem dos escoamento por meio da fluidodinâmica computacional, para cada contexto urbano. Assim, o custo de processamento computacional seria imenso, inviabilizando o desenvolvimento do estudo;
- A introdução de árvores na modelagem foi desconsiderada com o objetivo de diminuir o número de fatores de forma calculados em cada caso da amostra. Além do mais, sem a inserção dessas árvores, os casos registraram até 100 mil fatores de forma, o que já foi significativo do ponto de vista do custo de processamento e armazenamento computacional;
- A ventilação noturna foi desconsiderada por não estar alinhada às premissas que delimitam esse estudo. Porém, os resultados indicam que o clima urbano é fortemente afetado durante a noite, por consequência, a estratégia de ventilação noturna também pode ser afetada significativamente.

5.2 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

As sugestões para trabalhos futuros são indicadas em conformidade com as potencialidades expressas nesse estudo, sendo:

- Desenvolvimento de um metamodelo para carga térmica e horas em conforto que caracterize o contexto urbano e o edifício;
- Verificação do impacto da ilha de calor urbana sobre edificações naturalmente ventiladas;

-
- Análise do padrão dos ventos ao redor do edifício por meio de medições e fluidodinâmica computacional;
 - Estudo do impacto da ilha de calor urbana sobre a temperatura interna na falta de fornecimento de energia elétrica;
 - Estudo do impacto da ilha de calor urbana na demanda energética em ano climático extremo;
 - Modelagem do impacto da ilha de calor sobre estratégias de condicionamento térmico passivo;
 - Estudo de técnicas de mitigação da ilha de calor urbana como estratégia para promover a habitabilidade urbana;
 - O impacto da poluição urbana sobre o fluxo radiante atmosférico percebido no contexto urbano.

A CLASSIFICAÇÃO CLIMÁTICA DE KÖPPEN-GEIGER

Table 1: Key to calculate the climate formula of Köppen and Geiger for the main climates and subsequent precipitation conditions, the first two letters of the classification. Note that for the polar climates (E) no precipitation differentiations are given, only temperature conditions are defined. This key implies that the polar climates (E) have to be determined first, followed by the arid climates (B) and subsequent differentiations into the equatorial climates (A) and the warm temperate and snow climates (C) and (D), respectively. The criteria are explained in the text.

Type	Description	Criterion
A	Equatorial climates	$T_{\min} \geq +18\text{ }^{\circ}\text{C}$
Af	Equatorial rainforest, fully humid	$P_{\min} \geq 60\text{ mm}$
Am	Equatorial monsoon	$P_{\text{ann}} \geq 25(100 - P_{\min})$
As	Equatorial savannah with dry summer	$P_{\min} < 60\text{ mm in summer}$
Aw	Equatorial savannah with dry winter	$P_{\min} < 60\text{ mm in winter}$
B	Arid climates	$P_{\text{ann}} < 10 P_{\text{th}}$
BS	Steppe climate	$P_{\text{ann}} > 5 P_{\text{th}}$
BW	Desert climate	$P_{\text{ann}} \leq 5 P_{\text{th}}$
C	Warm temperate climates	$-3\text{ }^{\circ}\text{C} < T_{\min} < +18\text{ }^{\circ}\text{C}$
Cs	Warm temperate climate with dry summer	$P_{\text{smin}} < P_{\text{wmin}}, P_{\text{wmax}} > 3 P_{\text{smin}}$ and $P_{\text{smin}} < 40\text{ mm}$
Cw	Warm temperate climate with dry winter	$P_{\text{wmin}} < P_{\text{smin}}$ and $P_{\text{smax}} > 10 P_{\text{wmin}}$
Cf	Warm temperate climate, fully humid	neither Cs nor Cw
D	Snow climates	$T_{\min} \leq -3\text{ }^{\circ}\text{C}$
Ds	Snow climate with dry summer	$P_{\text{smin}} < P_{\text{wmin}}, P_{\text{wmax}} > 3 P_{\text{smin}}$ and $P_{\text{smin}} < 40\text{ mm}$
Dw	Snow climate with dry winter	$P_{\text{wmin}} < P_{\text{smin}}$ and $P_{\text{smax}} > 10 P_{\text{wmin}}$
Df	Snow climate, fully humid	neither Ds nor Dw
E	Polar climates	$T_{\text{max}} < +10\text{ }^{\circ}\text{C}$
ET	Tundra climate	$0\text{ }^{\circ}\text{C} \leq T_{\text{max}} < +10\text{ }^{\circ}\text{C}$
EF	Frost climate	$T_{\text{max}} < 0\text{ }^{\circ}\text{C}$

Table 2: Key to calculate the third letter temperature classification (h) and (k) for the arid climates (B) and (a) to (d) for the warm temperate and snow climates (C) and (D). Note that for type (b), warm summer, a threshold temperature value of $+10\text{ }^{\circ}\text{C}$ has to occur for at least four months. The criteria are explained in the text.

Type	Description	Criterion
h	Hot steppe / desert	$T_{\text{ann}} \geq +18\text{ }^{\circ}\text{C}$
k	Cold steppe /desert	$T_{\text{ann}} < +18\text{ }^{\circ}\text{C}$
a	Hot summer	$T_{\text{max}} \geq +22\text{ }^{\circ}\text{C}$
b	Warm summer	not (a) and at least 4 $T_{\text{mon}} \geq +10\text{ }^{\circ}\text{C}$
c	Cool summer and cold winter	not (b) and $T_{\min} > -38\text{ }^{\circ}\text{C}$
d	extremely continental	like (c) but $T_{\min} \leq -38\text{ }^{\circ}\text{C}$

B ZONAS CLIMÁTICAS LOCAIS DE STEWART & OKE

TABLE 3. Values of geometric and surface cover properties for local climate zones. All properties are unitless except height of roughness elements (m).

Local climate zone (LCZ)	Sky view factor ^a	Aspect ratio ^b	Building surface fraction ^c	Impervious surface fraction ^d	Pervious surface fraction ^e	Height of roughness elements ^f	Terrain roughness class ^g
LCZ 1 <i>Compact high-rise</i>	0.2–0.4	> 2	40–60	40–60	< 10	> 25	8
LCZ 2 <i>Compact midrise</i>	0.3–0.6	0.75–2	40–70	30–50	< 20	10–25	6–7
LCZ 3 <i>Compact low-rise</i>	0.2–0.6	0.75–1.5	40–70	20–50	< 30	3–10	6
LCZ 4 <i>Open high-rise</i>	0.5–0.7	0.75–1.25	20–40	30–40	30–40	>25	7–8
LCZ 5 <i>Open midrise</i>	0.5–0.8	0.3–0.75	20–40	30–50	20–40	10–25	5–6
LCZ 6 <i>Open low-rise</i>	0.6–0.9	0.3–0.75	20–40	20–50	30–60	3–10	5–6
LCZ 7 <i>Lightweight low-rise</i>	0.2–0.5	1–2	60–90	< 20	<30	2–4	4–5
LCZ 8 <i>Large low-rise</i>	>0.7	0.1–0.3	30–50	40–50	<20	3–10	5
LCZ 9 <i>Sparsely built</i>	> 0.8	0.1–0.25	10–20	< 20	60–80	3–10	5–6
LCZ 10 <i>Heavy industry</i>	0.6–0.9	0.2–0.5	20–30	20–40	40–50	5–15	5–6
LCZ A <i>Dense trees</i>	<0.4	>1	<10	<10	>90	3–30	8
LCZ B <i>Scattered trees</i>	0.5–0.8	0.25–0.75	<10	<10	>90	3–15	5–6
LCZ C <i>Bush, scrub</i>	0.7–0.9	0.25–1.0	<10	<10	>90	<2	4–5
LCZ D <i>Low plants</i>	>0.9	<0.1	<10	<10	>90	<1	3–4
LCZ E <i>Bare rock or paved</i>	>0.9	<0.1	<10	>90	<10	<0.25	1–2
LCZ F <i>Bare soil or sand</i>	>0.9	<0.1	<10	<10	>90	< 0.25	1–2
LCZ G <i>Water</i>	>0.9	<0.1	<10	<10	>90	–	1

^a Ratio of the amount of sky hemisphere visible from ground level to that of an unobstructed hemisphere

^b Mean height-to-width ratio of street canyons (LCZs 1–7), building spacing (LCZs 8–10), and tree spacing (LCZs A–G)

^c Ratio of building plan area to total plan area (%)

^d Ratio of impervious plan area (paved, rock) to total plan area (%)

^e Ratio of pervious plan area (bare soil, vegetation, water) to total plan area (%)

^f Geometric average of building heights (LCZs 1–10) and tree/plant heights (LCZs A–F) (m)

^g Davenport et al.'s (2000) classification of effective terrain roughness (z_r) for city and country landscapes. See Table 5 for class descriptions

C COMPARAÇÃO DE PROGRAMAS DE SIMULAÇÃO

Table 2

Comparison of software in terms of fulfilling the requirements of the proposed software framework. Checkmarks indicate fulfillment of the requirement. Checkmarks in parenthesis indicate that software include the specific feature without satisfying the requirement. See explanations of headers A-F in the text [120-130,132-135].

Software	A. Users		B. Design stage				C. Interoperability	D. Core complexity	E. Objectives					F. Parametric sim.					Ref.	
	Architects	Engineers	Conceptual	Preliminary	Detailed	Management			Energy	Thermal	Daylight	Air Quality	LCA	LCC	Cloud	IO Configurable	UA	SA		OAT
Be10 (ISO 15790 monthly) ²	(A)	E		✓	✓		Standalone	Low	✓	(✓)										[120]
Bsim	E	E	✓	✓			Standalone	High	✓	✓	✓								(✓)	[121]
DOE2	E	E	✓	✓			Standalone	Medium	✓	✓	✓									[110]
EnergyPlus (E+)	E	E	✓	✓			Standalone	High	✓	✓	✓									[28]
EPC (ISO 15790 hourly)	(A)	E	✓	✓			Standalone	Medium	✓	✓	✓									[122]
ESP+	E	E	✓	✓			Standalone	High	✓	✓	✓									[123]
IDA-ICE	E	E	✓	✓			File exchange	High	✓	✓	✓									[124]
iDBuild	E	E	✓	✓			Standalone	Medium	✓	✓	✓									[125]
IESVE	(A)	E	✓	✓	✓		File exchange	High	✓	✓	✓	✓								[83]
Radiance	(A)	E	✓	✓	✓		File exchange	High	✓	✓	✓									[87]
VELUX Daylight Visualizer	A	E	✓	✓	✓		File exchange	High	✓	✓	✓									[126]
A+E3D	A		✓	✓			Integrated	Be10	✓	(✓)	(✓)									[127]
Daysim	(A)	E	✓	✓	✓		Run-time	Radiance	✓	✓	✓									[86]
DesignBuilder	(A)	E	✓	✓	✓		File exchange	E+, Radiance, JE+	✓	✓	✓	✓								[128]
eQuest	E		✓	✓			Standalone	DOE2	✓	✓	✓									[129]
N++	E		✓	✓	✓		Separated	E+, JE+, GenOpt	✓	✓	✓									[130]
OpenStudio	E		✓	✓	✓		File exchange	E+, Radiance	✓	✓	✓	✓								[84]
Riuska	E		✓	✓	✓		File exchange	DOE 2, own engine	✓	✓	✓	✓								[131]
Sefaira	A		✓	✓	✓		Run-time	E+, Radiance	✓	✓	✓	✓						(✓)	(✓)	[82]
DIVA for Rhino	A	(E)	✓	✓	✓		Run-time	Radiance	✓	✓	✓									[132]
Green Building Studio	A	(E)	✓	✓	✓		File exchange	DOE2	✓	✓	✓									[78]
Honeybee (GH)	A	E	✓	✓	✓		File exchange	OpenStudio, E+, Radiance	✓	✓	✓	✓								[100]
JEPlus (+ JESS)	E		✓	✓	✓		Run-time	E+, DesignBuilder, N++	✓	✓	✓	✓						(✓)	(✓)	[133]
Parametric Analysis Tool	E		✓	✓	✓		File exchange	OpenStudio	✓	✓	✓	✓								[134]
Solon	(A)	E	✓	✓	✓		File exchange	Green Building Studio	✓	✓	✓	✓						(✓)	(✓)	[135]
Dynamo	A	E	✓	✓	✓		-	-												[98]
Grasshopper (GH)	A	E	✓	✓	✓		-	-												[97]

¹ Glue refers to software that enables linking between BPS and geometrical modeling through graphical programming (also referred to as algorithmic modeling)

² Be10 is mandatory to use for code compliance in Denmark

D CÁLCULO DA TEMPERATURA DA VEGETAÇÃO EM PYTHON

```
# Translated to Python by Rayner Mauricio
# The original code is available in https://github.com/wenlinz2017/LeafTemp

import math
import pandas as pd
import numpy as np

class leaf_temperature(object):

    def __init__(self, d = 0.5, gamma = 6.66E-4, c_p = 29.3):

        self.d = d

        #thermodynamic psychrometer constant
        self.gamma = 6.66E-4

        # specific heat of air at constant pressure, J/mol/K
        self.c_p = 29.3

    # a function to estimate VPD unite: kpa source: Campbell & Norman Env. biophysics
    def vp(self, T):
        return 0.611*math.exp((17.502*T)/(T+240.97))

    # a function to estimate the slope of the saturation vapor pressure function
    def slope(self, x):
        return 17.502*240.47*self.vp(x)/(240.97+x)**2

    def solve(self, ta = 30, u = 1.5, ur = 0.8, pa = 101.3, r_ni = 300, g_vs = 0.2):

        self.ta = ta
        self.u = u
        self.ur = ur
        self.pa = pa
        self.r_ni = r_ni
        self.g_vs = g_vs

        # radiative conductance
        self.g_r = 7*10**-6*(self.ta+273.15)**2-0.0021*(self.ta+273.15)+0.2085

        # saturated vapor pressure
        self.e_s = self.vp(self.ta)

        # slope of vapor pressure function
        self.delta = self.slope(self.ta)

        # slope of saturation mole fraction function
        self.s = self.delta/self.pa
        self.D = self.e_s*(1-self.ur)

        # example 14.1 used g_Ha <- 1.4*0.135*sqrt(u/d)
        self.g_Ha = 1.4*0.135*(self.u/self.d)**0.5

        # example 14.1 used g_va <- 1.4*0.147*sqrt(u/d)
        self.g_va = 1.4*0.147*(self.u/self.d)**0.5
        self.g_Hr = self.g_Ha + self.g_r
        self.g_v = self.g_vs*self.g_va/(self.g_vs+self.g_va)
        self.gamma_star = self.gamma * self.g_Hr/self.g_v
        self.leaf_temperature = self.ta + self.gamma_star/(self.gamma_star+self.s) \
            (self.r_ni/(self.g_Hr*self.c_p)-self.D/self.pa/self.gamma_star)

vegetacao = leaf_temperature()
vegetacao.d = 0.5 # DOI: 10.1016/0002-1571(68)90021-6
vegetacao.solve(ta = 35, u = 2.5, ur = 0.8, pa = 101.3, r_ni = 700)
print(vegetacao.leaf_temperature)
```


E ARQUIVO DE ENTRADA DO UWG

Adapted for parameterization by Rayner Mauricio

```
#####  
# Sample UWGv4.2 simulation initialization parameters  
# Chris Mackey,2017  
#####
```

```
#####  
# REQUIRED PARAMETERS  
#####
```

```
# Urban characteristics  
bldHeight,@bldHeight,    ### numero_andares*3  
bldDensity,@bldDensity,  ### taxa_ocupacao  
verToHor,@verToHor,     ### (largura_escritorio*4*numero_andares*3)/taxa_ocupacao  
h_mix,1,  
charLength,1000,  
albRoad,@albRoad,       ### 1-absortancia_pavimento  
dRoad,0.5,  
kRoad,@kRoad,           ### abs04 = 1.75      or abs09 = 1.15  
cRoad,@cRoad,           ### abs04 = 2440*766.6  or abs09 = 2300*920  
sensAnth,20,
```

```
# Climate Zone (Eg. City)  Zone number  
# 1A(Miami)                1  
# 2A(Houston)              2  
# 2B(Phoenix)              3  
# 3A(Atlanta)              4  
# 3B-CA(Los Angeles)      5  
# 3B(Las Vegas)            6  
# 3C(San Francisco)       7  
# 4A(Baltimore)           8  
# 4B(Albuquerque)         9  
# 4C(Seattle)             10  
# 5A(Chicago)              11  
# 5B(Boulder)              12  
# 6A(Minneapolis)         13  
# 6B(Helena)               14  
# 7(Duluth)                15  
# 8(Fairbanks)            16
```

```
zone,2,                    ### Houston because it is Cfa like Santa Maria-RS
```

```
# Vegetation parameters  
vegCover,@vegCover,      ### cobertura_vegetal  
treeCoverage,0,  
vegStart,1,  
vegEnd,12,  
albVeg,0.25,  
rurVegCover,0.9,  
latGrss,0.4,  
latTree,0.6,
```

```
# Traffic schedule [1 to 24 hour],  
SchTraffic,  
.2,.2,.2,.2,.2,.4,.7,.9,.9,.6,.6,.6,.6,.6,.7,.8,.9,.9,.8,.8,.7,.3,.2,.2, # Weekday  
.2,.2,.2,.2,.2,.3,.5,.5,.5,.5,.5,.5,.5,.6,.7,.7,.7,.7,.5,.4,.3,.2,.2, # Saturday  
.2,.2,.2,.2,.2,.3,.4,.4,.4,.4,.4,.4,.4,.4,.4,.4,.4,.4,.4,.3,.3,.2,.2, # Sunday
```

```
# Fraction of building stock for each DOE Building type
```

```
bld,  
0,0,0, # FullServiceRestaurant  
0,0,0, # Hospital  
0,0,0, # LargeHotel  
0,@grande,0, # LargeOffice  
0,@medio,0, # MediumOffice  
0,0,0, # MidRiseApartment  
0,0,0, # OutPatient
```

```

0,0,0, # PrimarySchool
0,0,0, # QuickServiceRestaurant
0,0,0, # SecondarySchool
0,0,0, # SmallHotel
0,@pequeno,0, # SmallOffice
0,0,0, # Stand-aloneRetail
0,0,0, # StripMall
0,0,0, # SuperMarket
0,0,0, # Warehouse

# =====
# OPTIONAL URBAN PARAMETERS
# =====
albRoof,0.5,
vegRoof,0.25,
glzR,@glzR, ### porcentagem_vidro_entorno
SHGC,@SHGC, ### fator_solar_entorno
albWall,@albWall, ### 1-absortancia_parede_entorno

# =====
# OPTIONAL PARAMETERS FOR SIMULATION CONTROL,
# =====

# Simulation parameters,
Month,1, # starting month (1-12)
Day,1, # starting day (1-31)
nDay,365, # number of days to run simultion
dtSim,300, # simulation time step (s)
dtWeather,3600, # weather time step (s)

# HVAC system and internal loads
autosize,0, # autosize HVAC (1 for yes; 0 for no)
sensOcc,100, # Sensible heat per occupant (W)
LatFOcc,0.3, # Latent heat fraction from occupant (normally 0.3)
RadFOcc,0.2, # Radiant heat fraction from occupant (normally 0.2)
RadFEquip,0.5, # Radiant heat fraction from equipment (normally 0.5)
RadFLight,0.7, # Radiant heat fraction from light (normally 0.7)

#Urban climate parameters
h_ubl1,1000, # ubl height - day (m)
h_ubl2,80, # ubl height - night (m)
h_ref,150, # inversion height (m)
h_temp,2, # temperature height (m)
h_wind,10, # wind height (m)
c_circ,1.2, # circulation coefficient (default = 1.2 per Bruno (2012))
c_exch,1, # exchange coefficient (default = 1; ref Bruno (2014))
maxDay,150, # max day threshold (W/m^2)
maxNight,20, # max night threshold (W/m^2)
windMin,0.1, # min wind speed (m/s)
h_obs,0.1, # rural average obstacle height (m)

```

F COMPLEMENTAÇÕES DA ANÁLISE EXPLORATÓRIA

Figura F.1: Histograma do balanço térmico agrupado segundo a carga térmica de resfriamento

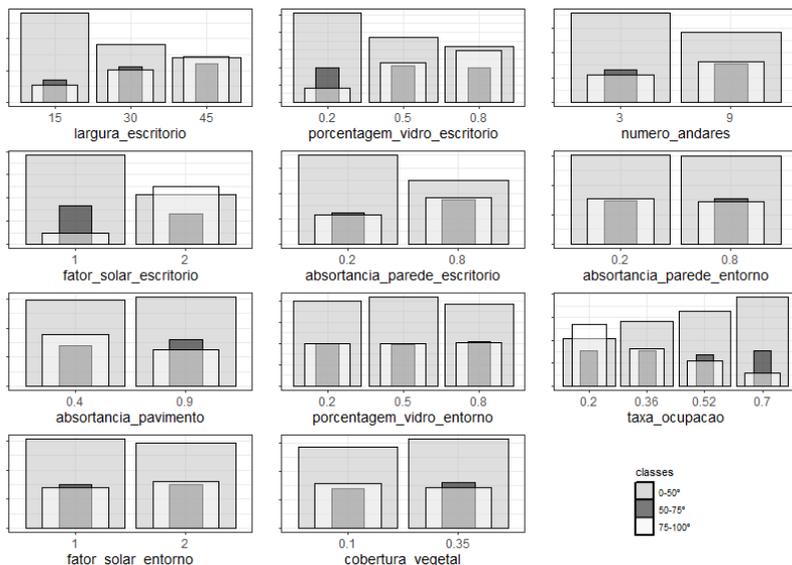


Tabela F.1: Parâmetros descritores do caso máximo, mínimo e médio do RMSE das superfícies do entorno (RDCM-RSCM)

Caso	min	med	max
Largura da edificação	15	30	45
Porcentagem de vidro na fachada do escritório	0.5	0.2	0.8
Número de andares	9	9	3
Fator solar do vidro do escritório	0.38	0.38	0.87
Absortância da parede do escritório	0.2	0.2	0.8
Absortância da parede do entorno	0.2	0.8	0.8
Absortância do pavimento	0.4	0.9	0.9
Porcentagem de vidro na fachada do entorno	0.5	0.2	0.2
Taxa de ocupação	0.52	0.36	0.2
Fator solar do vidro do entorno	0.38	0.87	0.38
Cobertura vegetal	0.35	0.35	0.1

Figura F.2: Histograma do balanço térmico agrupado segundo a variação percentual da carga térmica de resfriamento

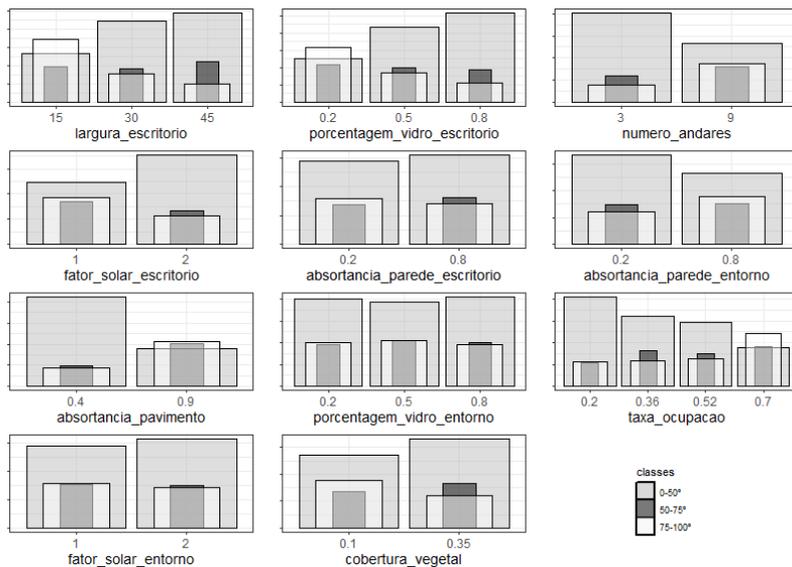


Tabela F.2: Parâmetros descritores do caso máximo, mínimo e médio do RMSE das superfícies do escritório (RDCM-RSCM)

Caso	min	med	max
Largura da edificação	15	45	45
Porcentagem de vidro na fachada do escritório	0.8	0.5	0.2
Número de andares	9	9	3
Fator solar do vidro do escritório	0.87	0.38	0.38
Absortância da parede do escritório	0.2	0.2	0.2
Absortância da parede do entorno	0.2	0.8	0.8
Absortância do pavimento	0.4	0.9	0.9
Porcentagem de vidro na fachada do entorno	0.8	0.2	0.8
Taxa de ocupação	0.36	0.36	0.2
Fator solar do vidro do entorno	0.87	0.87	0.87
Cobertura vegetal	0.35	0.35	0.1

Figura F.3: Diferença de temperatura do entorno durante o dia

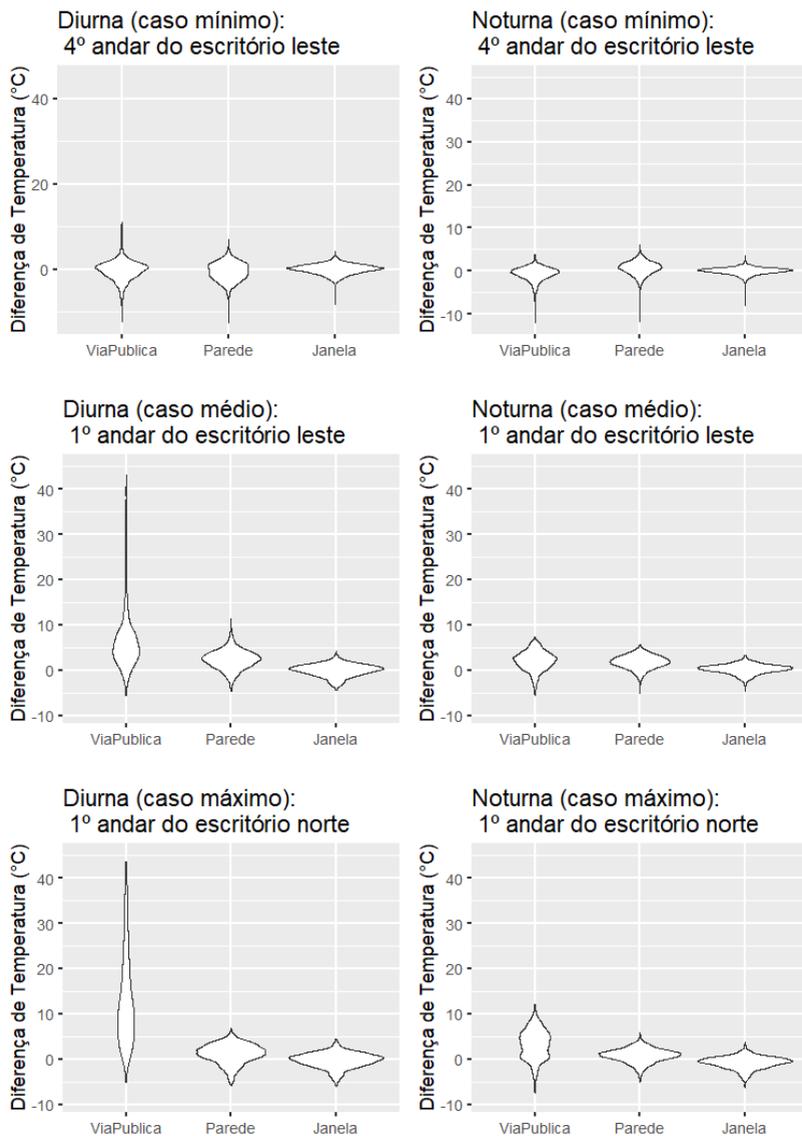
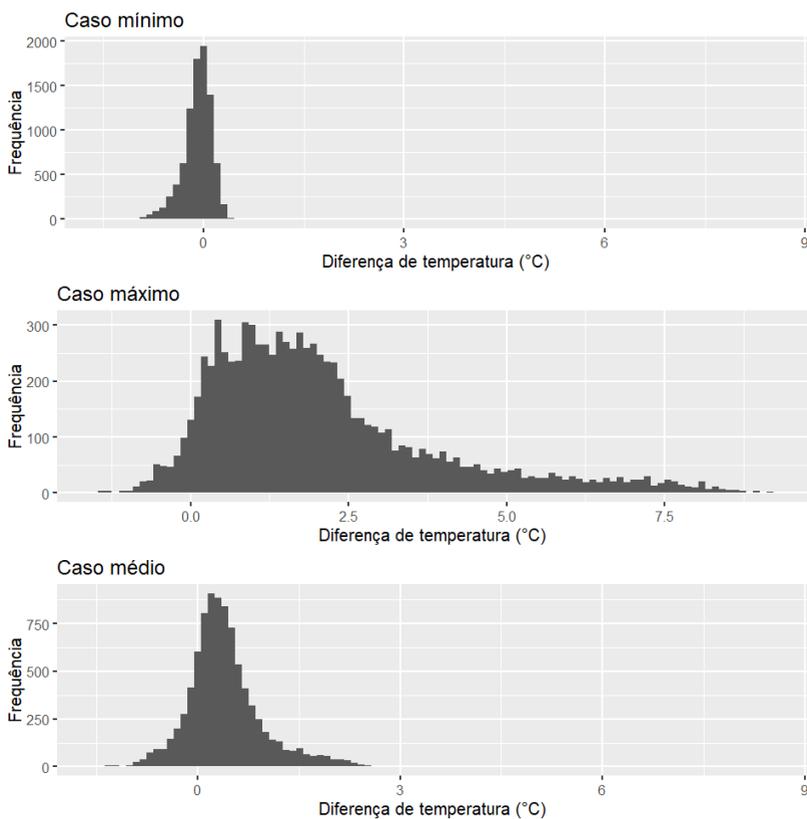
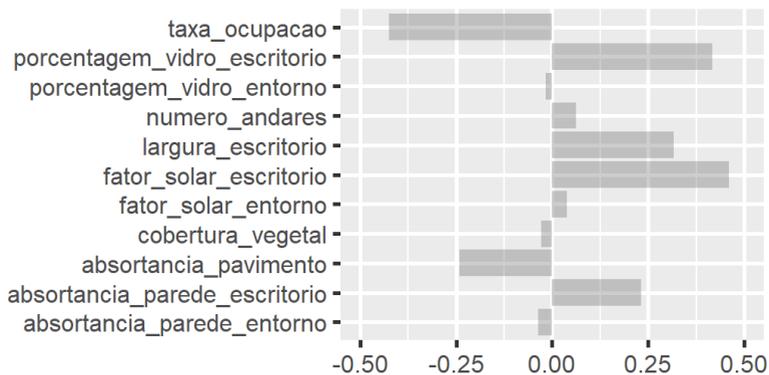


Figura F.4: Histogramas das diferenças entre as temperaturas superficiais externas do escritório do método RDCM e RSCM



G COMPLEMENTAÇÕES DA ANÁLISE DE SENSIBILIDADE

Figura G.1: Índice de sensibilidade amostra perante a carga de resfriamento pelo método RSCP



REFERÊNCIAS

- 1 CHANGE, I. P. on C. **Climate change 2014: Mitigation of climate change**. [S.l.]: Cambridge University Press, 2015. v. 3.
- 2 IEA. **Tracking Clean Energy Progress 2017**. [S.l.]: Paris: Organization for Economic Co-operation and Development (OECD), 2017.
- 3 PARDO, A.; MENEU, V.; VALOR, E. Temperature and seasonality influences on spanish electricity load. **Energy Economics**, Elsevier BV, v. 24, n. 1, p. 55–70, jan 2002. Disponível em: <[https://doi.org/10.1016/s0140-9883\(01\)00082-2](https://doi.org/10.1016/s0140-9883(01)00082-2)>.
- 4 SANTAMOURIS, M. et al. On the impact of urban heat island and global warming on the power demand and electricity consumption of buildings—a review. **Energy and Buildings**, Elsevier BV, v. 98, p. 119–124, jul 2015. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2014.09.052>>.
- 5 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**, Elsevier BV, v. 55, p. 823–832, dec 2012. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2012.10.013>>.
- 6 MIRZAEI, P. A. Recent challenges in modeling of urban heat island. **Sustainable Cities and Society**, Elsevier BV, v. 19, p. 200–206, dec 2015. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.scs.2015.04.001>>.
- 7 SREBRIC, J.; HEIDARINEJAD, M.; LIU, J. Building neighborhood emerging properties and their impacts on multi-scale modeling of building energy and airflows. **Building and Environment**, v. 91, p. 246 – 262, 2015. ISSN 0360-1323. Fifty Year Anniversary for Building and Environment. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0360132315000888>>.
- 8 RIZWAN, A. M.; DENNIS, L. Y.; LIU, C. A review on the generation, determination and mitigation of urban heat island. **Journal of Environmental Sciences**, Elsevier BV, v. 20, n. 1, p. 120–128, jan 2008. Disponível em: <[https://doi.org/10.1016/s1001-0742\(08\)60019-4](https://doi.org/10.1016/s1001-0742(08)60019-4)>.
- 9 REINHART, C. F.; DAVILA, C. C. Urban building energy modeling – a review of a nascent field. **Building and Environment**, Elsevier BV, v. 97, p. 196–202, feb 2016. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2015.12.001>>.

- 10 CORRADO, V.; MECHRI, H. E. Uncertainty and sensitivity analysis for building energy rating. **Journal of building physics**, Sage Publications Sage UK: London, England, v. 33, n. 2, p. 125–156, 2009.
- 11 MIRZAEI, P. A.; HAGHIGHAT, F. Approaches to study urban heat island – abilities and limitations. **Building and Environment**, Elsevier BV, v. 45, n. 10, p. 2192–2201, oct 2010. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2010.04.001>>.
- 12 CRAWLEY, D. B. Estimating the impacts of climate change and urbanization on building performance. **Journal of Building Performance Simulation**, Informa UK Limited, v. 1, n. 2, p. 91–115, jun 2008. Disponível em: <<https://doi.org/10.1080/19401490802182079>>.
- 13 PALME, M. et al. From urban climate to energy consumption. enhancing building performance simulation by including the urban heat island effect. **Energy and Buildings**, Elsevier BV, v. 145, p. 107–120, jun 2017. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2017.03.069>>.
- 14 J., V. et al. Model selection for continuous commissioning of HVAC-systems in office buildings: A review. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, Elsevier BV, v. 76, p. 673–686, sep 2017. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.01.119>>.
- 15 MENDONÇA, F.; DANNI-OLIVEIRA, I. M. **Climatologia: noções básicas e climas do Brasil**. [S.l.]: Oficina de textos, 2017.
- 16 AYOADE, J. O. **Introdução à climatologia para os trópicos**. [S.l.]: Difel, 1986.
- 17 ROMERO, M. A. B. **Princípios bioclimáticos para o desenho urbano**. [S.l.]: ProEditores Associados, 2001.
- 18 YANG, X. et al. The urban cool island phenomenon in a high-rise high-density city and its mechanisms. **International Journal of Climatology**, Wiley, v. 37, n. 2, p. 890–904, may 2016. Disponível em: <<https://doi.org/10.1002/joc.4747>>.
- 19 SOUZA, L. C. L. d. Relações entre ilhas de calor, geometria urbana e consumo de energia elétrica. **Fórum Patrimônio: Ambiente Construído e Patrimônio Sustentável**, v. 3, n. 2, 2010.

- 20 DUAN, S. et al. The impact of building operations on urban heat/cool islands under urban densification: A comparison between naturally-ventilated and air-conditioned buildings. **Applied Energy**, Elsevier BV, v. 235, p. 129–138, feb 2019. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2018.10.108>>.
- 21 OKE, T. R. **Boundary layer climates**. [S.l.]: Routledge, 2002.
- 22 MOREIRA, E. B. M. **Balço de energia e evapotranspiração na cidade do Recife-PE por sensoriamento remoto**. Tese (Doutorado) — Universidade Federal de Pernambuco, Recife, PE, 2014.
- 23 PEREZ, J.; SÁNCHEZ, M.; BARRADAS, V. L. Clima, urbanización y uso del suelo en ciudades tropicales de Mexico. **Red Nacional de Investigación Urbana, Puebla, México, Ciudades**, v. 51, 2001.
- 24 OKE, T. R. et al. **Urban climates**. [S.l.]: Cambridge University Press, 2017.
- 25 NIKKHO, S. K. et al. Quantifying the impact of urban wind sheltering on the building energy consumption. **Applied Thermal Engineering**, Elsevier BV, v. 116, p. 850–865, apr 2017. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2017.01.044>>.
- 26 ERELL, E.; PEARLMUTTER, D.; WILLIAMSON, T. **Urban microclimate: designing the spaces between buildings**. [S.l.]: Routledge, 2012.
- 27 OKE, T. R. et al. Initial guidance to obtain representative meteorological observations at urban sites. Citeseer, 2004.
- 28 JÚNIOR, A. de S. **Aplicação da classificação de Köppen para o zoneamento climático do Estado de Minas Gerais**. Dissertação (Mestrado) — Universidade Federal de Lavras, Lavras, MG, 2009.
- 29 CHEN, D.; CHEN, H. W. Using the köppen classification to quantify climate variation and change: An example for 1901–2010. **Environmental Development**, Elsevier BV, v. 6, p. 69–79, apr 2013. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.envdev.2013.03.007>>.
- 30 KOTTEK, M. et al. World map of the köppen-geiger climate classification updated. **Meteorologische Zeitschrift**, Schweizerbart, v. 15, n. 3, p. 259–263, jul 2006. Disponível em: <<https://doi.org/10.1127/0941-2948/2006/0130>>.

- 31 IV, B. D. B. C. **Building performance simulation: a tool for policymaking**. Tese (Doutorado) — University of Strathclyde, 2008.
- 32 STEWART, I. D.; OKE, T. R. Local climate zones for urban temperature studies. **Bulletin of the American Meteorological Society**, American Meteorological Society, v. 93, n. 12, p. 1879–1900, dec 2012. Disponível em: <<https://doi.org/10.1175/bams-d-11-00019.1>>.
- 33 ØSTERGÅRD, T.; JENSEN, R. L.; MAAGAARD, S. E. Building simulations supporting decision making in early design – a review. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, Elsevier BV, v. 61, p. 187–201, aug 2016. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.03.045>>.
- 34 SUDHAKAR, K. et al. Modelling of a solar desiccant cooling system using a TRNSYS-MATLAB co-simulator: A review. **Journal of Building Engineering**, Elsevier BV, v. 24, p. 100749, jul. 2019. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.job.2019.100749>>.
- 35 SHRIVASTAVA, R.; KUMAR, V.; UNTAWALE, S. Modeling and simulation of solar water heater: A TRNSYS perspective. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, Elsevier BV, v. 67, p. 126–143, jan. 2017. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.09.005>>.
- 36 MARTINS, T. D. **Condicionantes solares a oportunidades de desenho urbano: Otimização de tipo-morfologias urbanas em contexto de clima tropical**. Dissertação (Mestrado) — Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, RJ, 2014.
- 37 DOE. **EnergyPlus Development Repository: Version 8.9**. <<https://github.com/NREL/EnergyPlus>>, 2018.
- 38 MOONEN, P. et al. Urban physics: Effect of the micro-climate on comfort, health and energy demand. **Frontiers of Architectural Research**, Elsevier BV, v. 1, n. 3, p. 197–228, sep 2012. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.foar.2012.05.002>>.
- 39 AZAM, M.-H. et al. A pavement-watering thermal model for solene-microclimat: Development and evaluation. **Urban Climate**, v. 25, p. 22 – 36, 2018. ISSN 2212-0955. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2212095518301159>>.
- 40 BRUSE, M. Envi-met 3.0: updated model overview. **University of Bochum**. Retrieved from: www.envi-met.com, 2004.

- 41 VANKERKOM, J. et al. Vito extensions to the envi-met model. 2012.
- 42 BUENO, B.; NAKANO, A.; NORFORD, L. Urban weather generator: a method to predict neighborhood-specific urban temperatures for use in building energy simulations. In: **Proceedings of the Ninth International Conference on Urban Climate (ICUC9) jointly with 12 Symposium on the Urban Environment**. [S.l.: s.n.], 2015.
- 43 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, 2012. ISSN 0378-7788. Cool Roofs, Cool Pavements, Cool Cities, and Cool World. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0378778812005221>>.
- 44 SAMUELSON, H. et al. Parametric energy simulation in early design: High-rise residential buildings in urban contexts. **Building and Environment**, Elsevier BV, v. 101, p. 19–31, may 2016. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2016.02.018>>.
- 45 WANG, Z.-H. et al. Cooling and energy saving potentials of shade trees and urban lawns in a desert city. **Applied Energy**, v. 161, p. 437 – 444, 2016. ISSN 0306-2619. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S030626191501274X>>.
- 46 EVINS, R.; DORER, V.; CARMELIET, J. Simulating external longwave radiation exchange for buildings. **Energy and Buildings**, Elsevier BV, v. 75, p. 472–482, jun 2014. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2014.02.030>>.
- 47 ALLEGRINI, J.; DORER, V.; CARMELIET, J. Impact of radiation exchange between buildings in urban street canyons on space cooling demands of buildings. **Energy and Buildings**, v. 127, p. 1074 – 1084, 2016. ISSN 0378-7788. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0378778816305631>>.
- 48 VALLATI, A. et al. Effects of radiative exchange in an urban canyon on building surfaces' loads and temperatures. **Energy and Buildings**, v. 149, p. 260 – 271, 2017. ISSN 0378-7788. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0378778817311076>>.
- 49 STREET, M. A. **Comparison of simplified models of urban climate for improved prediction of building energy use in cities**. Tese (Doutorado) — Massachusetts Institute of Technology, 2013.

- 50 MILLER, C. et al. Long wave radiation exchange for urban scale modelling within a co-simulation environment. In: LESO-PB, EPFL. **Proceedings of International Conference CISBAT 2015 Future Buildings and Districts Sustainability from Nano to Urban Scale.** [S.l.], 2015. p. 871–876.
- 51 MAO, J. et al. Global sensitivity analysis of an urban microclimate system under uncertainty: Design and case study. **Building and Environment**, Elsevier BV, v. 124, p. 153–170, nov 2017. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2017.08.011>>.
- 52 SALTELLI, A. et al. **Sensitivity analysis in practice: a guide to assessing scientific models.** [S.l.]: John Wiley & Sons, 2004.
- 53 TIAN, W. A review of sensitivity analysis methods in building energy analysis. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, Elsevier BV, v. 20, p. 411–419, apr 2013. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.rser.2012.12.014>>.
- 54 NGUYEN, A.-T.; REITER, S. A performance comparison of sensitivity analysis methods for building energy models. In: SPRINGER. **Building Simulation.** [S.l.], 2015. v. 8, n. 6, p. 651–664.
- 55 ZHANG, X.-Y. et al. Sobol sensitivity analysis: A tool to guide the development and evaluation of systems pharmacology models. **CPT: Pharmacometrics & Systems Pharmacology**, Wiley, v. 4, n. 2, p. 69–79, feb 2015. Disponível em: <<https://doi.org/10.1002/psp4.6>>.
- 56 XU, J. et al. A systematic approach for energy efficient building design factors optimization. **Energy and Buildings**, Elsevier BV, v. 89, p. 87–96, feb 2015. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2014.12.022>>.
- 57 SILVA, A. S.; ALMEIDA, L. S. S.; GHISI, E. Decision-making process for improving thermal and energy performance of residential buildings: A case study of constructive systems in brazil. **Energy and Buildings**, Elsevier BV, v. 128, p. 270–286, sep 2016. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2016.06.084>>.
- 58 BRE, F. et al. Residential building design optimisation using sensitivity analysis and genetic algorithm. **Energy and Buildings**, v. 133, p. 853 – 866, 2016. ISSN 0378-7788. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0378778816312440>>.

- 59 LADYBUG, T. **Urban Weather Generator: Version 5.3.3**. <<https://github.com/ladybug-tools/uwg>>, 2018.
- 60 MATHEW, A.; KHANDELWAL, S.; KAUL, N. Analysis of diurnal surface temperature variations for the assessment of surface urban heat island effect over indian cities. **Energy and Buildings**, Elsevier BV, v. 159, p. 271–295, jan 2018. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2017.10.062>>.
- 61 STANDARD, A. Standard 55-2004. **Thermal environmental conditions for human occupancy**, p. 9–11, 2004.
- 62 CRAWLEY, D.; LAWRIE, L. **Repository of free climate data for building performance simulation**. 2019. Disponível em: <http://climate.onebuilding.org/WMO_Region_3_South_America/BRA_Brazil/RS_Rio_Grande_do_Sul/BRA_RS_Santa.Maria.839360_INMET.zip>.
- 63 ASHRAE, A. S. Standard 90.1-2004, energy standard for buildings except low rise residential buildings. **American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, Inc**, 2004.
- 64 CAMPBELL, G. S.; NORMAN, J. M. **An introduction to environmental biophysics**. [S.l.]: Springer Science & Business Media, 2012.
- 65 JARRAUD, M. Guide to meteorological instruments and methods of observation (wmo-no. 8). **World Meteorological Organisation: Geneva, Switzerland**, 2008.