

UNIVERSIDADE FEDERAL DO ESPÍRITO SANTO
CENTRO DE ARTES
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ARQUITETURA E URBANISMO (PPGAU)

LAYRA RAMOS LUGÃO

O CLIMA E SUAS ESPECIFICIDADES: A INFLUÊNCIA
NO CONSUMO ENERGÉTICO DE EDIFÍCIOS URBANOS
RESIDENCIAIS

VITÓRIA

2021

LAYRA RAMOS LUGÃO

O CLIMA E SUAS ESPECIFICIDADES: A INFLUÊNCIA
NO CONSUMO ENERGÉTICO DE EDIFÍCIOS URBANOS
RESIDENCIAIS

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Arquitetura e Urbanismo do Centro de Artes da Universidade Federal do Espírito Santo, como requisito para obtenção do título de Mestre em Arquitetura e Urbanismo, na área de concentração Cidade e Impactos no Território.

Orientadora: Prof.^a Dr.^a. Cristina Engel de Alvarez

VITÓRIA

2021

Ficha catalográfica disponibilizada pelo Sistema Integrado de Bibliotecas - SIBI/UFES e elaborada pelo autor

L951c Lugão, Layra Ramos, 1994-
O clima e suas especificidades: a influência no consumo energético de edifícios urbanos residenciais / Layra Ramos
Lugão. - 2021.
187 f. : il.

Orientadora: Cristina Engel de Alvarez.
Dissertação (Mestrado em Arquitetura e Urbanismo) -
Universidade Federal do Espírito Santo, Centro de Artes.

1. Energia elétrica - Consumo. 2. Ilha de calor urbana. 3. Mudanças climáticas. 4. Edifícios de apartamentos. I. Alvarez, Cristina Engel de. II. Universidade Federal do Espírito Santo. Centro de Artes. III. Título.

CDU: 72

LAYRA RAMOS LUGÃO

“O CLIMA E SUAS ESPECIFICIDADES: A INFLUÊNCIA NO CONSUMO
ENERGÉTICO DE EDIFÍCIOS URBANOS RESIDENCIAIS”

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em
Arquitetura e Urbanismo da Universidade Federal do Espírito
Santo, como requisito final para a obtenção do grau de Mestre em
Arquitetura e Urbanismo.

Aprovada em 30 de agosto de 2021.

Comissão Examinadora

Profa. Dra. Cristina Engel de Alvarez
(orientadora – PPGAU/UFES)

Profa. Dra. Edna Aparecida Nico Rodrigues
(membro interno – PPGAU/UFES)

Profa. Dra. Luciana Aparecida Netto de Jesus
(membro externo – UFES)

ASSINATURA

Documento original assinado eletronicamente, conforme MP 2200-2/2001, art. 10, § 2º, por:

CRISTINA ENGEL DE ALVAREZ

CIDADÃO

assinado em 30/08/2021 18:19:01 -03:00



INFORMAÇÕES DO DOCUMENTO

Documento capturado em 30/08/2021 18:19:01 (HORÁRIO DE BRASÍLIA - UTC-3)
por CRISTINA ENGEL DE ALVAREZ (CIDADÃO)
Valor Legal: ORIGINAL | Natureza: DOCUMENTO NATO-DIGITAL

A disponibilidade do documento pode ser conferida pelo link: <https://e-docs.es.gov.br/d/2021-0XJD0Z>



UNIVERSIDADE FEDERAL DO ESPÍRITO SANTO

PROTOCOLO DE ASSINATURA



O documento acima foi assinado digitalmente com senha eletrônica através do Protocolo Web, conforme Portaria UFES nº 1.269 de 30/08/2018, por
LUCIANA APARECIDA NETTO DE JESUS - SIAPE 1043094
Departamento de Engenharia Civil - DEC/CT
Em 31/08/2021 às 20:39

Para verificar as assinaturas e visualizar o documento original acesse o link:
<https://api.lepisma.ufes.br/arquivos-assinados/259862?tipoArquivo=O>



UNIVERSIDADE FEDERAL DO ESPÍRITO SANTO

PROTOCOLO DE ASSINATURA



O documento acima foi assinado digitalmente com senha eletrônica através do Protocolo Web, conforme Portaria UFES nº 1.269 de 30/08/2018, por
EDNA APARECIDA NICO RODRIGUES - SIAPE 1173369
Departamento de Arquitetura e Urbanismo - DAU/CAR
Em 01/09/2021 às 11:55

Para verificar as assinaturas e visualizar o documento original acesse o link:
<https://api.lepisma.ufes.br/arquivos-assinados/260254?tipoArquivo=O>

À minha família e ao meu tio Genaro
Lugão (*in memoriam*)

AGRADECIMENTOS

À Deus, por tudo e todos.

À Prof^a Dr^a Cristina Engel de Alvarez, por ser uma orientadora compreensiva e incentivadora. Por todas as conversas em direção à calma na trajetória e clareza no desenvolvimento da pesquisa.

Às professoras Edna Aparecida Nico Rodrigues e Luciana Aparecida de Jesus, por terem aceitado participar da banca de defesa, assim como pelas contribuições desde a qualificação.

Aos meus pais, José Pedro e Lenilza, pelo apoio incondicional e por me inspirarem na determinação. À minha irmã, Lahys, pela parceria de sempre, compartilhando os afazeres e as alegrias.

À minha avó, pelo grande afeto e orações direcionadas a mim. Ao meu tio Genaro (*in memoriam*), por ter sido presente e um dos meus maiores incentivadores ao estudo. Aos parentes e conhecidos que torcem pela minha caminhada pessoal e profissional.

Aos meus amigos, por estarem ao meu lado mesmo com a distância e pelas palavras de força. Incluo meu namorado, por reavivar as minhas motivações, e ao grupo do círculo bíblico, por renovar a minha esperança a cada semana.

Aos colegas do Laboratório de Planejamentos e Projetos (LPP-UFES), pelo compartilhamento de ideias. Em especial, à Juliana Santos, pela amizade e ensinamentos nesses anos de pesquisa; ao Anderson Fraga, pelas aventuras em novos aprendizados e momentos de apoio; e, ao Victor Bussolotti pela introdução ao *Grasshopper*.

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), pelo apoio financeiro para a realização da pesquisa.

RESUMO

O acelerado processo de urbanização configurou o atual panorama das cidades, que as tornaram vulneráveis aos fenômenos climáticos. A ilha de calor urbana indica temperaturas elevadas nessas regiões, podendo se agravar perante às projeções de mudanças climáticas globais. Estando as edificações situadas predominantemente no meio urbano, há um conjunto de efeitos climáticos locais interagindo sobre as suas condições energéticas. Neste sentido, estudos recentes apontam a ascensão da demanda de energia para o resfriamento, especialmente em ambientes residenciais. Esse consumo gera a liberação de calor nas cidades, confirmando a inter-relação entre parâmetros edifícios e urbanos. A tendência de análises integradas tem incentivado a abordagem da escala urbana, como a modelagem energética de edifícios urbanos. Diante do exposto, o objetivo principal da pesquisa foi analisar a influência do contexto urbano no consumo energético por resfriamento de edificações residenciais face aos fenômenos de ilha de calor e mudanças climáticas, visando o estabelecimento de proposições voltadas para a eficiência energética do ambiente construído. A metodologia adotada foi fundamentada em simulações de modelos genéricos urbanos, configurados para diferentes combinações de índices urbanísticos condizentes com as formas intraurbanas da cidade de Vitória (ES). A fim de otimizar o processo de simulação computacional, a principal ferramenta utilizada foi o *Grasshopper*, no qual os cenários urbanos foram parametrizados com base em índices urbanísticos, que determinaram, também, a edificação principal analisada. Após a configuração geral, o arquivo climático foi projetado para os anos 2050 e 2080 com a ferramenta *Climate Change World Weather File Generator* e, posteriormente, modificado para a consideração da ilha de calor urbana por meio do componente *Urban Weather Generator*. A análise dos resultados demonstrou a variação de influência de elementos do contexto urbano no desempenho da edificação residencial, com destaque para o incremento de até 23,40% no consumo energético de resfriamento por área condicionada ocasionado pelos fenômenos climáticos. Ademais, observou-se a significativa redução proporcionada pelo sombreamento do entorno e a importância da envoltória eficiente e da associação entre parâmetros externos adequados para amenização dos efeitos adversos na edificação. Assim sendo, a incorporação do contexto urbano com as mudanças no clima nas simulações de desempenho energético pode proporcionar dados mais precisos para a elaboração de estratégias coerentes à escala local.

Palavras-chave: Consumo energético. Ilha de calor urbana. Mudanças climáticas. Modelagem energética. Edifícios urbanos residenciais.

ABSTRACT

The quicken urbanization process set up the current panorama of cities, making them vulnerable to climatic particularities. The urban heat island indicates high temperatures in these regions, which could worsen due to global climate change projections. Buildings are located predominantly in urban areas and a set of local climatic effects are interacting under their energy conditions. In this regard, recent studies point to the increase in energy demand for cooling, especially in residential ambience. This consumption generates heat release in cities, confirming the interrelationship between building and urban parameters. The trend towards integrated analysis has encouraged the urban scale approach, such as the energy modelling of urban buildings. Thus, the main goal of this thesis was to analyse the influence of the urban context on energy consumption of residential buildings' cooling systems compare to the heat island phenomena and climate change, aiming to establish propositions tuned to energy efficiency of a built environment. The adopted methodology was based on simulations of generic urban models, composed by different urban indexes combinations, consistent with the intraurban forms of the city of Vitória (ES). In order to optimize the simulation process, the main tool applied was Grasshopper, in which urban scenarios were assembled based on urban indexes, which also were assigned for the main building analysed. After the broad configuration accomplished, the weather file was designed for the 2050s and 2080s using Climate Change World Weather File Generator tool and modified later as the urban heat island effect was taken through the Urban Weather Generator component. The results demonstrated variation in the influence of the urban context elements on the residential building performance, highlighting up to 23.40% increase in the energy consumption of cooling per conditioned area caused by weather event. Furthermore, it was observed the significant reduction provided by surroundings' shading, the importance of efficient envelope and the association between adequate external parameters to ease downside effects on the building. Therefore, the urban context embodiment with climate changes in the energy performance simulations can provide more accurate data for the elaboration of coherent strategies at the local scale.

Keywords: Energy consumption. Urban heat island. Climate change. Energy modelling. Residential urban buildings.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Camadas da atmosfera acima da cidade durante o dia (a) e à noite (b) ..	27
Figura 2 – Esquema de balanço energético para um volume rural (a) e urbano (b) .	29
Figura 3 – Programas para o desenvolvimento do processo de simulação	61
Figura 4 – Cidade de Vitória no Espírito Santo, Brasil	62
Figura 5 – Frequência de velocidades por direção no período diurno (esquerda) e noturno (direita) em Vitória	65
Figura 6 – Imagens aéreas dos recortes territoriais em Vitória	67
Figura 7 – Configuração volumétrica dos cenários	69
Figura 8 – Fluxograma do controle de acionamento do sistema de ventilação híbrida	79
Figura 9 – Processo de simulação dos cenários	82
Figura 10 – Interface do <i>CCWorldWeatherGen</i>	86
Figura 11 – Representação dos modelos.....	89
Figura 12 – Esquema representativo do sistema do UWG	91
Figura 13 – Procedimento de simulação do modelo integrado	93
Figura 14 – Parametrização construtiva para a forma urbana A	94
Figura 15 – Cenários A2T6, B2T6 e C2T6 com edificação principal demarcada	115
Figura 16 – Cenários A1T6, B1T6 e C1T6 com edificação principal demarcada	116
Figura 17 – Cenários A1T6, B1T6 e C1T6 com vegetação	119

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 – Normais climatológicas de precipitação e temperatura no período de 1981-2010 em Vitória	63
Gráfico 2 – Umidade absoluta e relativa no período de 1981-2010 em Vitória	64
Gráfico 3 – Padrão de ocupação em dias de semana e final de semana	78
Gráfico 4 – Intensidade de ICU mensal por cenário (°C)	100
Gráfico 5 – Intensidade de UCI nos meses de março (linha contínua) e junho (linha pontilhada) por cenário.....	101
Gráfico 6 – Fração de cobertura do céu em 2018, 2050 e 2080.	102
Gráfico 7 – Temperatura média horária em março no cenário B2T6 em 2018, 2050 e 2080	104
Gráfico 8 – Temperatura média horária em junho no cenário B2T6 em 2018, 2050 e 2080	105
Gráfico 9 – Intensidade nos meses de março (linha contínua) e junho (linha pontilhada) por cenário T4 e T6	106
Gráfico 10 – Variação da intensidade de ICU com parâmetros de pavimentação e vegetação.....	107
Gráfico 11 – Intensidade nos meses de março (linha contínua) e junho (linha pontilhada) por albedo.....	108
Gráfico 12 – Diferença de umidade durante o ano urbano.....	109
Gráfico 13 – Variação de umidade relativa nos meses de março (linha contínua) e junho (linha pontilhada) nos cenários.....	110
Gráfico 14 – Umidade relativa nos meses de março (linha contínua) e junho (linha pontilhada) por cenário T4 e T6	111
Gráfico 15 – Umidade relativa horária em março no cenário B2T6 em 2018, 2050 e 2080	112
Gráfico 16 – Umidade relativa horária em junho no cenário B2T6 em 2018, 2050 e 2080	112
Gráfico 17 – Consumo de resfriamento (kWh/m ² .ano) por orientação	116
Gráfico 18 – Consumo de resfriamento (kWh/m ² .ano) no cenário rural e urbano por pavimento.....	117
Gráfico 19 – Consumo em kWh/m ² .ano por combinação de pavimentação e vegetação.....	119
Gráfico 20 – Consumo por resfriamento (kWh/m ² .ano) no edifício sem e com veneziana.....	120
Gráfico 21 – Consumo por resfriamento com clima rural, clima urbano e entorno em cenário atual e futuro.....	121
Gráfico 22 – Variação no consumo por resfriamento pela vegetação e veneziana em 2018, 2050 e 2080	123
Gráfico 23 – Consumo por resfriamento (kWh/m ² .ano) em diferentes taxas de ocupação.....	126
Gráfico 24 – Consumo por resfriamento (kWh/m ² .ano) com diferentes valores de albedo	128
Gráfico 25 – Consumo por resfriamento (kWh/m ² .ano) com parâmetros alternativos	131

Gráfico 26 – Consumo por resfriamento em kWh/m ² .ano em cada zona térmica do cenário CA 1,2.....	133
Gráfico 27 – Consumo por resfriamento em kWh/m ² .ano em cada zona térmica do cenário CA 2,8.....	134
Gráfico 28 – Consumo por resfriamento mensal em A (kWh/m ² .ano)	136
Gráfico 29 – Consumo por resfriamento mensal em B (kWh/m ² .ano)	136
Gráfico 30 – Consumo por resfriamento mensal em C (kWh/m ² .ano).....	136
Gráfico 31 – Variação, do rural para o urbano, de consumo (kWh/m ²) por mês em cada cenário com combinação de forma urbana (vertical) e coeficiente de aproveitamento (horizontal).....	138
Gráfico 32 – Consumo mensal (kWh/m ²) com variação de albedo	139
Gráfico 33 – Consumo por resfriamento (kWh/m ²) na média mensal de março a partir dos arquivos climáticos e parâmetros selecionados	141
Gráfico 34 – Variação de consumo em porcentagem dos parâmetros por combinação construtiva.....	145

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 – Relação de parâmetros para a formação da ilha de calor e seus efeitos no balanço de energia.....	32
Quadro 2 – Instrumentos municipais para problemáticas urbanas.....	42
Quadro 3 – Interações entre princípios de clima urbano e planejamento para cidades em climas quentes e úmidos.....	45
Quadro 4 – Zonas climáticas locais representativas dos cenários urbanos.....	71
Quadro 5 – Informes do relatório "Pesquisa de Posse e Hábitos"	75
Quadro 6 – Valores de desempenho térmico para paredes externas e coberturas ..	76
Quadro 7 – Características construtivas da edificação principal	77
Quadro 8 – Interações de parâmetros fixos e dinâmicos nos cenários.....	81
Quadro 9 – Conformação urbana com menor taxa de ocupação (T4)	125
Quadro 10 – Cenários-base em relação à forma urbana, taxa de ocupação e coeficiente de aproveitamento.....	142
Quadro 11 – Proposições à eficiência energética em áreas intraurbanas	146

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Índices Urbanísticos para a ZOC2, ZOC3 e ZOR1.....	66
Tabela 2 – Dados construtivos dos cenários.....	70
Tabela 3 – Dados dimensionais das zonas por cenário	74
Tabela 4 – Modelagem do sistema de condicionamento de ar	79
Tabela 5 – Dados dos parâmetros alternativos	83
Tabela 6 – Níveis de eficiência energética para a cidade de Vitória (ES)	98
Tabela 7 – Intensidade de ilha de calor nos diferentes cenários para o mês de março	103
Tabela 8 – Intensidade de ilha de calor nos diferentes cenários para o mês de junho	103
Tabela 9 – Classificação dos cenários por níveis de eficiência energética	146

LISTA DE ABREVIATURAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
AR	<i>Assessment Reports</i>
ASHRAE	<i>American Society of Heating Refrigerating and Air Conditioning Engineers</i>
CAPES	Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior
CB3E	Centro Brasileiro de Eficiência Energética em Edificações
COP	<i>Coefficient of Performance</i>
EPW	<i>EnergyPlus Weather file</i>
GCM	<i>General Circulation Models</i>
HadCM3	<i>Hadley Centre Coupled Model version 3</i>
ICU	Ilha de calor urbana
INMET	Instituto Nacional de Meteorologia
INMETRO	Instituto Nacional de Metrologia, Qualidade e Tecnologia
IPCC	<i>Intergovernmental Panel on Climate Change</i>
IPTU	Imposto sobre a Propriedade Predial e Territorial Urbana
LabEEE	Laboratório de Eficiência Energética em Edificações
MDR	Ministério do Desenvolvimento Regional
NBR	Norma Técnica Brasileira
PBMC	Painel Brasileiro de Mudanças Climáticas
PNMA	Política Nacional do Meio Ambiente
PNMC	Política Nacional sobre Mudança do Clima
PDU	Plano Diretor Urbano
PMV	Prefeitura Municipal de Vitória
RTQ-R	Regulamento Técnico de Qualidade do Nível de Eficiência Energética das Edificações Residenciais
PROCEL	Programa Nacional de Conservação de Energia Elétrica
SRES	<i>Special Report Emission Scenarios</i>
TEB	<i>Town Energy Budget</i>
UBEM	<i>Urban Building Energy Models</i>
UWG	<i>Urban Weather Generator</i>
ZB	Zona Bioclimática
ZOC	Zona de Ocupação Controlada
ZOR	Zona de Ocupação Restrita

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	19
1.1 OBJETIVOS	22
1.2 ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO	23
2. REFERENCIAL TEÓRICO	25
2.1 FENÔMENOS LOCAIS E MUDANÇAS NO CLIMA	25
2.2 EFICIÊNCIA NO AMBIENTE CONSTRUÍDO	37
2.3 MODELAGEM INTEGRADA DE EDIFÍCIOS URBANOS	47
3. PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS	59
3.1 DEFINIÇÃO DOS CENÁRIOS	59
3.1.1 Parametrização construtiva	60
3.1.2 Parâmetros de modelagem	62
3.1.2.1 Dados climáticos	62
3.1.2.2 Contextualização urbana	65
3.1.2.3 Caracterização do edifício principal	72
3.1.3 Configuração dos cenários urbanos	80
3.2 SIMULAÇÃO DE CONSUMO ENERGÉTICO	82
3.2.1 Processo de simulação	82
3.2.2 Modificação do arquivo climático	84
3.2.2.1 Projeções climáticas	84
3.2.2.2 Efeito de ilha de calor urbana	87
3.2.3 Modelagem e simulação do modelo integrado	92
3.3 ANÁLISE DE DADOS	97
4. RESULTADOS E DISCUSSÕES	98
4.1 EFEITO DE ILHA DE CALOR	99
4.1.1 Temperatura de bulbo seco	99
4.1.2 Umidade relativa do ar	109
4.2 CONSUMO ENERGÉTICO POR RESFRIAMENTO	113
4.2.1 Dados anuais	114
4.2.1.1 Parâmetros	114
4.2.1.2 Pavimentos	132
4.2.2 Dados mensais	135
4.3 PROPOSIÇÕES AO AMBIENTE CONSTRUÍDO	142
5. CONSIDERAÇÕES FINAIS	149
REFERÊNCIAS	153
APÊNDICES	171
ANEXOS	187

1. INTRODUÇÃO

O desenvolvimento das cidades é marcado pela expansão territorial desordenada, que agrava o desequilíbrio ecológico resultante do crescimento populacional e uso de recursos naturais. As atividades econômicas e sociais concentram-se cada vez mais nas áreas urbanas, conduzindo às transformações no território que as tornam vulneráveis aos impactos das mudanças climáticas ao mesmo tempo em que as definem como fundamentais para o enfrentamento dessas adversidades. Nos centros urbanos são consumidos cerca de 70% da energia mundial e, com as estimativas de a população urbana duplicar até 2050, a tendência é a expansão da infraestrutura urbana e, conseqüentemente, a elevação do consumo de energia elétrica (PAINEL BRASILEIRO DE MUDANÇAS CLIMÁTICAS, 2016; ONU-HABITAT, 2017).

Os desdobramentos do aumento da urbanização estão relacionados à modificação do espaço construído e natural. Para abrigar um adensamento populacional, as cidades passam, além do crescimento do perímetro urbano, por um processo de verticalização, uma configuração espacial que normalmente contribui para o aumento do efeito de ilha de calor urbana e, conseqüentemente, para a maior demanda por refrigeração dos ambientes (INTERNATIONAL ENERGY AGENCY, 2017; EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA, 2018a). Essa seqüência se dá pelo fato de o efeito de ilha de calor ser um dos responsáveis pelo agravamento do desconforto térmico nas cidades inseridas em zonas mais quentes e pelo aumento do gasto energético (STEWART; OKE, 2012).

Além da predominância de edificações, as cidades são caracterizadas por superfícies pavimentadas que, agravado pelo baixo índice de vegetação urbana, tendem a absorver mais calor e aumentar a temperatura média do ar. A composição de uma estrutura densamente construída caracteriza-se pelas dificuldades de alterações dos usos e a concentração de emissão de calor por equipamentos, agravada pela intensidade de carbono presente nos materiais, que influenciam mais na intensificação da temperatura local (PAINEL BRASILEIRO DE MUDANÇAS CLIMÁTICAS, 2016; EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA, 2018a).

Nessas regiões densamente construídas, se concentram também as principais atividades econômicas que atraem diversas pessoas em busca de melhorias nas condições de conforto e bem-estar. Relacionado ao desenvolvimento econômico do

país, ao passo que o nível de renda dos habitantes aumenta, são introduzidos novos padrões de consumo e comportamento dos usuários, que estimula um natural incremento do gasto energético, principalmente no setor residencial (INTERNATIONAL ENERGY AGENCY, 2021; EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA, 2018a). Este setor é responsável por 31,2% do consumo de eletricidade no país, justificando, portanto, o investimento e o incremento nos estudos visando a melhorias na eficiência energética e, também, a redução de emissões de gases (EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA, 2021).

Com o aumento da temperatura nas cidades, a qualidade de vida será impactada pela maior duração de períodos mais quentes nos dias e noites, tornando-se, assim, uma preocupação para o bem-estar ambiental e o conforto térmico. Principalmente em regiões equatorianas, com grandes aumentos diários de temperatura, tem-se buscado alternativas mais sustentáveis de soluções passivas, como a melhoria das edificações residenciais mediante o aproveitamento de ventilação natural e o emprego de materiais de baixa massa térmica (REN21, 2019; INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE, 2014). De outro lado, os altos índices de calor podem afetar a eficiência da produção de energia e, conseqüentemente, o suprimento da demanda por condicionamento artificial (INTERNATIONAL ENERGY AGENCY, 2021).

Para garantir o desempenho térmico e energético das edificações no Brasil, foram elaboradas normas técnicas com o objetivo de direcionar os projetos construtivos aos diferentes climas e materiais tradicionais (PAINEL BRASILEIRO DE MUDANÇAS CLIMÁTICAS, 2016). No entanto, diante de um cenário consolidado composto por edificações residenciais sem adaptação ao microclima desde a concepção projetual, os moradores, estimulados pelas mudanças no estilo de vida, buscam outras maneiras de alcançar o conforto, tendendo para os meios mecânicos e consumindo energia com os equipamentos condicionadores de ar (INTERNATIONAL ENERGY AGENCY, 2021; PAINEL BRASILEIRO DE MUDANÇAS CLIMÁTICAS 2016).

Reafirmando o incremento no uso de energia, diferentemente das classes – industrial, comercial, poder público, iluminação pública e consumo próprio – que tiveram o consumo reduzido devido ao cenário de pandemia, a eletricidade no âmbito residencial continuou crescendo em 3,8% no ano de 2020, juntamente com os setores rural e serviço público (EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA, 2021). Bezerra *et al.* (2021) reiteram que, diante das projeções de mudanças no clima, o uso de ar

condicionado pode aumentar em até 190% no pior cenário climático brasileiro, com destaque para a demanda por resfriamento em residências situadas nas regiões Sudeste e Sul.

As edificações inseridas no meio urbano, estão sujeitas a um conjunto de efeitos climáticos locais interagindo com ela e sob sua condição energética. O desempenho térmico e o consumo de energia no edifício são influenciados pelas trocas de calor e energia que ocorrem entre a envoltória da construção e seu entorno imediato. Essa integração, estudada por meio de modelagens energéticas de edifícios urbanos, é um meio de avaliar os fenômenos do clima – como o efeito de ilha de calor – no comportamento termoenergético da edificação, além da dinâmica do edifício individual (YANG *et al.*, 2012; HONG *et al.*, 2020).

Embora o conhecimento do impacto de fatores urbanos sobre a demanda de energia seja apresentado em diversos estudos, o tema não pode ser generalizado a qualquer contexto urbano e ainda é pouco expressivo para abordagens de caráter quantitativo para cada fator (MARTINS; FARAUT; ADOLPHE, 2019). É de grande importância a compreensão da conexão entre o planejamento urbano e a adaptação às mudanças nos climas local e global, visto que alterações em um deles podem alterar o percurso evolutivo do outro (INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE, 2014).

Até mesmo em relação à mitigação das emissões de gases, as medidas são mais eficientes quando destinadas à redução da intensidade no uso final da energia por meio de um consumo controlado (PAINEL BRASILEIRO DE MUDANÇAS CLIMÁTICAS, 2016). Neste sentido, e conforme já comentado anteriormente, observa-se que o resfriamento é um dos usos finais de energia que mais cresce, aumentando o interesse em tecnologias alternativas e políticas específicas de incentivo para a cidade (REN21, 2019).

Zhai e Helman (2019) afirmam que o impacto das mudanças climáticas na demanda energética está interligado ao local e tipo de construção. Diante da importância da energia elétrica na dinâmica da cidade e no planejamento adaptativo para uma demanda em ascensão, torna-se necessário desenvolver soluções para esses impactos e buscar a eficiência energética por meio da compreensão e quantificação do consumo de energia atual nas cidades e os efeitos das possíveis estratégias em cenários futuros (PASICHNYI; WALLIN; KORDAS, 2019).

A implementação de estratégias de mitigação do calor que considerem o contexto local e as mudanças climáticas, colabora para a redução de impactos negativos e a promoção de ambientes confortáveis e eficientes (KRAYENHOFF *et al.*, 2021). Além disso, a previsão das alterações no clima auxilia no entendimento dos seus efeitos e na preparação para as adversidades futuras, otimizando tempo e recursos (ZHAI; HELMAN, 2019).

Com a tendência de agravamento das modificações no clima e da exposição humana ao desconforto térmico e ampliação dos gastos energéticos, questiona-se qual o estágio atual das políticas públicas sobre a necessidade de adaptação às mudanças climáticas a curto e médio prazo, considerando a gravidade dos impactos na escala da cidade. Dessa maneira, este estudo justifica-se por analisar o desempenho do edifício em conjunto com o entorno urbano, tendo em vista as mudanças climáticas e as condições ambientais locais. A compreensão desses aspectos pode contribuir para o estabelecimento de estratégias mais eficientes, tanto para o planejamento de áreas urbanas em expansão quanto para análise do entorno de novas construções e intervenção em áreas públicas e privadas.

1.1 OBJETIVOS

O objetivo principal da pesquisa foi analisar a influência do contexto urbano no consumo energético por resfriamento de edificações residenciais em face do fenômeno ilha de calor e das mudanças climáticas, visando ao estabelecimento de proposições voltadas para a eficiência energética do ambiente construído. A fim de alcançar os resultados previstos, foram traçados os seguintes objetivos específicos:

- Definir parâmetros de construção e forma urbana representativos do estudo de caso na cidade de Vitória;
- Selecionar os instrumentos de modelagem dos cenários e dados climáticos para a realização das simulações;
- Identificar quantitativamente o impacto de elementos edifícios e urbanos no desempenho energético de ambientes internos residenciais;
- Elaborar proposições à ambiência urbana em conformidade com as especificidades locais e eficiência energética.

1.2 ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO

O trabalho discorre sobre aspectos relacionados à eficiência energética em edificações residenciais e sobre os fatores urbanos que podem influenciar no consumo de energia especificamente em relação à necessidade de adequação da temperatura do ambiente interior para o conforto dos moradores. Dessa forma, esta dissertação foi organizada em cinco capítulos, cujos conteúdos seguem sucintamente descritos.

Já apresentado, o primeiro capítulo introduziu o tema da pesquisa a partir da sua contextualização, mostrando a problemática e a justificativa em se abordar as necessidades atuais de economia de energia frente às mudanças climáticas e transformações no ambiente urbano. Junto às breves discussões de eficiência energética, sustentadas por dados oficiais e estudos recentes que a conectam ao cenário urbano, foram apresentados os objetivos – geral e específicos – e, nesse item, a estrutura deste trabalho.

O segundo capítulo apresenta, em três seções, o embasamento teórico dos principais temas pertinentes à pesquisa. A primeira seção descreve a conjuntura do fenômeno de ilha de calor e mudanças climáticas na ambiência urbana que afetam os níveis de conforto térmico e o consumo energético das edificações. Já a segunda seção apresenta as normativas que regem o desempenho termoenergético no ambiente construído e o planejamento urbano, demonstrando a evolução do tema nacionalmente. Em seguida, as medidas de mitigação das mudanças no clima e estratégias para um planejamento eficiente são abordadas com enfoque na forma urbana e balanço energético. Na última seção, é evidenciada a relação da construção com o contexto urbano, no qual são demonstrados estudos relacionados aos parâmetros da cidade que podem interferir no clima local e no comportamento térmico e energético da edificação.

No terceiro capítulo, é detalhado o procedimento metodológico utilizado para o desenvolvimento da pesquisa no intuito de alcançar os objetivos determinados. Inicialmente, são caracterizados todos os elementos da área intraurbana estudada, tanto da edificação como do contexto urbano, que dão origem aos cenários a serem simulados. Para o processo de simulação computacional, cada cenário é modelado

com suas especificações formais e propriedades térmicas e os dados são gerados para cálculo do conforto térmico e desempenho energético.

O capítulo seguinte contém os resultados obtidos com as simulações computacionais de cada cenário, possibilitando identificar, por meio do comparativo de gráficos e tabelas, os avanços e regressos de desempenho com a alteração de cada parâmetro urbano até a identificação do cenário mais eficiente. Com a avaliação dos resultados, é possível selecionar as proposições adequadas ao planejamento de recortes urbanos com características construtivas semelhantes.

No capítulo cinco, são abordadas as considerações finais sobre o estudo e seu desenvolvimento, sendo apontadas as restrições e sugestões para a continuidade da pesquisa. Por fim, na última parte da dissertação, estão listadas as referências bibliográficas, apêndices e anexos que serviram de base para elaboração da pesquisa.

2. REFERENCIAL TEÓRICO

A disposição dessa seção parte da compreensão de assuntos relevantes ao desenvolvimento da pesquisa, que servem de suporte à modelagem da edificação e clima urbano para análise termoenergética. O primeiro item introduz a formação e os efeitos das alterações no clima – ilha de calor e mudanças climáticas – no contexto urbano e as consequências para o consumo energético. No segundo, são explicitados os conceitos de conforto térmico e desempenho energético nas edificações, que são influenciadas pelas características formais e propriedades térmicas da envoltória. Em paralelo, é apresentada a correlação dos impactos ambientais e a legislação urbana em diferentes escalas, mostrando a importância de um planejamento urbano em conformidade com os preceitos climáticos locais. Por fim, no último item, a importância da análise sistemática do edifício e seu entorno imediato é apresentada mostrando, a partir de estudos anteriores e por meio de simulações, que a introdução de variáveis climáticas e de contexto urbano, pode alterar os resultados de desempenho termoenergético da edificação.

2.1 FENÔMENOS LOCAIS E MUDANÇAS NO CLIMA

As cidades são caracterizadas por modificações no ambiente natural com a finalidade de uso humano, dentre as quais as construções, formadas por materiais secos e impermeáveis, se sobrepõem à vegetação e ao solo natural. Paralelo ao crescimento populacional nos centros urbanos, a concentração de fluxos de pessoas e atividades contribuiu para as alterações nas trocas de energia, umidade e radiação entre a terra e a atmosfera (STEWART; OKE, 2012; JIA *et al.*, 2019). Ademais, as interferências urbanas, devido ao processo desordenado de ocupação, aumentam o estoque de energia térmica e diminuem a dissipação de calor, acarretando em impactos locais e alterações no balanço de energia (GOMES; LAMBERTS, 2009; TORRES *et al.*, 2013).

Diante deste cenário, as modificações no clima urbano podem ser correlacionadas às paisagens urbanas, uma vez que estas interagem com a atmosfera em diferentes escalas (OKE *et al.*, 2017). Para a compreensão do clima de qualquer local, faz-se necessário, primeiramente, compreender essa interação a partir das características da superfície urbana. Os arranjos das superfícies determinam unidades urbanas com

características em comum, nas quais as propriedades inerentes aos elementos – térmica, radiativa, umidade, aerodinâmica e configuração espacial – definem a troca de energia e massa com a camada atmosférica das cidades.

Oke *et al.* (2017) propõem uma classificação das unidades urbanas. Partindo da superfície, pode-se criar um elemento urbano, que, a depender da combinação, caracterizam um cânion ou blocos urbanos. A ordenação de diferentes elementos produz a paisagem urbana de forma heterogênea na microescala, tendendo às disposições repetidas que levam à homogeneidade em escalas maiores. Para uma unidade urbana ser considerada homogênea, normalmente as características comuns devem ser encontradas desde um quarteirão à, no máximo, escala de vizinhança, sendo estas replicadas na mesoescala, ou seja, dentro da cidade ou região urbana.

Um dos pontos críticos em análises de áreas urbanas é a definição de superfície, que devido à diversidade de composições, torna-se difícil de atribuir um dado para estudos meteorológicos. A complexidade das cidades é pautada na heterogeneidade de forma e função; a primeira referindo-se à geometria, tecido e cobertura de superfície; e a segunda, às emissões de calor, vapor d'água e materiais (MILLS, 2014). Em vista disso, além do comparativo rural e urbano, as diferenças intraurbanas podem potencializar a variabilidade térmica do clima local (ROMERO *et al.*, 2019), como por exemplo, a diferença máxima de 5,3°C encontrada por Toparlar *et al.* (2018) ao comparar a temperatura do ar em dois locais com distâncias desiguais do parque urbano.

Com a finalidade de viabilizar estudos das variáveis climáticas no meio urbano, Stewart e Oke (2012) criaram as *Local Climate Zones* (ZCL) a partir da classificação de um conjunto de aspectos naturais e construídos, como o tecido, a cobertura do solo, estrutura e metabolismo. No total são 17 zonas de caráter genérico, que não refletem particularidades da paisagem com o objetivo de ser adaptável às diferentes localidades. Utilizando as zonas supracitadas para analisar a ilha de calor sob diversos parâmetros morfológicos e climáticos, Liu *et al.* (2020) constataram que a intensidade é maior na área urbana mais adensada e a mitigação do efeito pode ser mais eficiente ao reduzir a taxa de ocupação do que a altura das edificações.

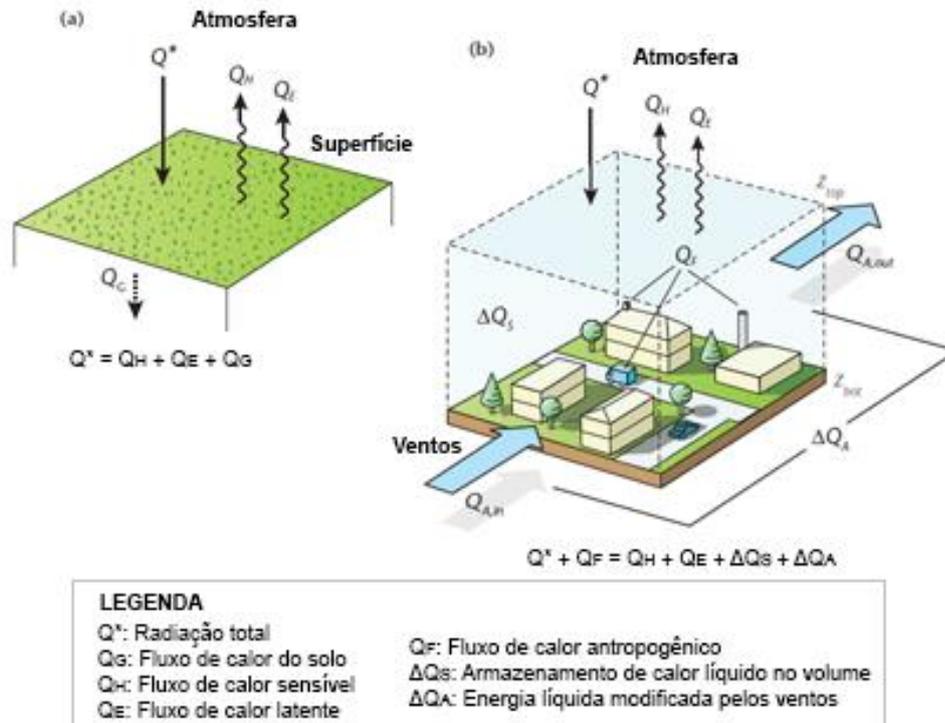
Tal como uma combinação específica de propriedades das superfícies tem sua influência reduzida ao aumentar o raio de abrangência, as propriedades atmosféricas

Gonçalves e Bode (2015), essas superfícies absorvem a radiação solar e a emitem por onda longa, em um processo de transferência de calor que influi no equilíbrio térmico da cidade.

A dinâmica dos fluxos de entrada e saída de energia determinam o balanço energético, que contribui na compreensão da climatologia de um sistema urbano, como o comportamento termodinâmico do ar e temperatura e umidade da superfície. Com a evolução da modelagem numérica, os estudos urbanos foram aprimorados na medida em que as escalas local e microescala foram acompanhadas por descrições mais detalhadas e, as escalas climáticas, representada da global à mesoescala (MILLS, 2014). Neste sentido, Masson (2000) desenvolveu o *Town Energy Budget* (TEB), um esquema físico que visa estipular a energia urbana a partir da estrutura de um cânion urbano – telhado, estrada e parede – para representações de modelo atmosférico na mesoescala. Compensado por cálculos físicos completos, a simplificação da geometria urbana no referido esquema incentivou os estudos em maiores escalas horizontais.

Para exemplificar o balanço energético, a Figura 2 apresenta os fluxos de energia tanto no volume rural como urbano. Sendo as setas indicativas da direção para qual o fluxo é positivo, observa-se, no primeiro, a preponderância vertical para o solo e atmosfera, enquanto no ambiente urbano pode ocorrer trocas com qualquer lado do volume. De modo geral, para o cálculo dos fluxos de energia em um sistema urbano, são analisados a radiação de onda curta recebida do sol; o armazenamento térmico; a liberação de ondas longas e infravermelho para a atmosfera; a transferência de calor latente; a convecção do calor sensível; e o calor antropogênico (U.S. ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY, 2008).

Figura 2 – Esquema de balanço energético para um volume rural (a) e urbano (b)



Fonte: adaptado de Oke *et al.* (2017)

A paisagem urbana é composta por diversos elementos naturais e construtivos, como árvores, água, pavimentação, edifícios, entre outros. A grande quantidade de pavimentação e a reduzida cobertura vegetal afetam no calor retido em função da menor troca térmica úmida (calor latente), reduzindo a umidade local pela perda de calor por evapotranspiração. Fundamental para o resfriamento no meio urbano e microclima agradável, o processo de evapotranspiração pela vegetação e suas formas variadas atuam na minimização da temperatura do solo e do ar, em função da absorção da radiação solar e visível, oferecendo sombreamento no espaço e resfriamento e umidificação do ar (ROMERO, 2013; NOGUCHI, 2016).

No sombreamento do solo e proteção contra a radiação solar direta, a vegetação – gramado e árvores de “copas permeáveis” – assegura a permeabilidade e umidade do solo. Ademais, as árvores e arbustos são importantes para o estabelecimento do fluxo de vento e sombreamento tanto na pavimentação quanto na construção. Essa vegetação pode estar concentrada ou distribuída pela cidade, tendo, em áreas adensadas, uma influência maior em pequenas distâncias e mais eficiência quando disposta harmoniosamente (GOMES; LAMBERTS, 2009).

Além do calor latente, a materialidade da estrutura urbana é caracterizada pelo maior grau de impermeabilização e capacidade térmica, que tende ao armazenamento do calor e trocas térmicas secas ou calor sensível (ASSIS, 2005). Essa modificação na superfície urbana, juntamente com a redução da vegetação, se apoia em um menor sombreamento e processo de evaporação da água, favorecendo no aumento de temperatura da superfície e do ar (U.S. ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY, 2008)

Ainda sobre as mudanças no uso do solo, a propriedade de reflexão da radiação solar dos materiais – conhecida como albedo – auxilia no incremento da temperatura de superfície e, em uma escala maior, pode alterar dados do clima global (JIA *et al.*, 2019). O asfalto e telhas de cor escura são materiais comumente utilizados no meio urbano e, devido a massa térmica, retém parte do calor durante o dia, aumentando a temperatura de superfície, e amplia a diferença térmica no período noturno, visto que dissipa lentamente o calor acumulado (ABOULNAGA; ELWAN; ELSHAROUNY, 2019).

Sob outra perspectiva, as atividades humanas são grandes influentes nas alterações do clima urbano. A liberação antrópica de calor está relacionada à um fluxo controlado pelos cidadãos, que apresenta uma relação indireta com os efeitos externos, como a demanda por aquecimento e resfriamento variar dependendo da influência solar e atmosférica (OKE, 1988). O calor antropogênico é medido, especialmente, por dados de perfis locais e temporais de tráfego e de consumo de energia baseado no uso do solo (SAILOR *et al.*, 2015).

Em virtude do excedente no balanço térmico, devido ao conjunto de interações entre a superfície urbana e as camadas da atmosfera – além do calor antropogênico –, o aumento da temperatura nas cidades fica ainda mais evidente ao compará-lo às regiões adjacentes na mesoescala (SALVATI *et al.*, 2019; SANTAMOURIS, 2020). Essa diferença de temperatura entre as áreas urbana e os arredores de características rurais demonstra como a morfologia urbana altera as condicionantes naturais do meio e, conseqüentemente, a qualidade urbana, tornando-se um aspecto relevante para o controle de fenômenos climáticos, como a ilha de calor (ASSIS *et al.*, 2007).

A ilha de calor urbana (ICU) é caracterizada pela temperatura elevada em ambientes adensados nas cidades e pode variar em intensidade de acordo com as

características meteorológicas, físicas, presença de vegetação e atividades humanas da área urbana (NAKATA-OSAKI; SOUZA; RODRIGUES, 2016; AMORIM, 2019). É um fenômeno decorrente da retenção de calor pelos materiais das superfícies urbanas, que alteram o equilíbrio da absorção, transmissão e reflexão da radiação e, de modo consequente, o aumento da irradiação de calor nessas áreas (BARANDIER; ALMEIDA; MORAES, 2013).

Resultante dessas diferentes proporções de resfriamento no dia entre meio rural e urbano, a ilha de calor difere na sua formação, podendo ser superficial, com mais intensidade durante o dia, ou atmosférico, de predominância noturna. Em contrapartida, Fialho, Fernandes e Correa (2019) afirmam a constatação da ICU também no período da tarde em países tropicais. Este efeito atmosférico pode ocorrer na camada de dossel urbano, na qual a temperatura de superfície contribui no aquecimento do ar e pode apresentar maior variabilidade por área; e na camada limite urbana, em que a ICU fica mais explícita após a dissipação de calor da infraestrutura urbana, com uma menor amplitude de intensidade térmica (U.S. ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY, 2008).

Dessa forma, os fenômenos climáticos estão interligados à complexidade de formas e texturas que compõem a cidade (MARTINS; FARAUT; ADOLPHE, 2019). Barandier, Almeida e Moraes (2013) explicam que a troca de radiação com a atmosfera é determinada pela proporção do cânion urbano e a sua obstrução superior limita a dispersão do calor armazenado, contribuindo para a consolidação da ilha de calor. O parâmetro “Fator de Visão do Céu” é utilizado para essa finalidade, verificando a abertura para o céu a partir da geometria do cânion, ou seja, pela altura das edificações (H) e o espaçamento entre eles (W).

Utilizando a relação H/W do cânion e o comprimento de rugosidade em duas cidades de São Paulo, Nakata-Osaki, Souza e Rodrigues (2016) desenvolveram uma ferramenta para simulação de ilha de calor associada à geometria urbana. Dentre os resultados, a forma urbana com melhor desempenho possui cânions urbanos com menor largura de via, edificações de variadas alturas, menor taxa de ocupação e maior coeficiente de aproveitamento, garantindo assim maior rugosidade e porosidade na área urbana.

As regiões com menor amplitude térmica diária, devido à nebulosidade que impede a saída da radiação de ondas longas para a atmosfera, têm a movimentação do ar como contribuinte nessa diminuição da temperatura em espaços urbanos (BARANDIER; ALMEIDA; MORAES, 2013). Objetivando o aproveitamento da ventilação, deve-se analisar os padrões dos fluxos de ar das cidades, que são intrinsecamente ligados à rugosidade e aos efeitos térmicos. Em dias claros e calmos, a ilha de calor é mais intensa, capaz de gerar movimentação do fluxo de calor no sentido horizontal, como das áreas rurais para as cidades. De outro lado, a convecção do calor – deslocamento vertical na atmosfera – promove a mistura do ar e aprisionamento de poluentes (OKE *et al*, 2017).

Conforme as interferências climáticas apresentadas, a ilha de calor é um fenômeno em diferentes escalas – horizontal e vertical –, na qual diversos parâmetros interagem entre si para o aumento da intensidade de calor e a procedência de efeitos refletidos no balanço de energia da área urbana. No Quadro 1 é apresentada uma síntese destes fatores, comumente encontrados nas cidades, e as respectivas consequências térmicas e energéticas.

Quadro 1 – Relação de parâmetros para a formação da ilha de calor e seus efeitos no balanço de energia

Parâmetros contribuintes na formação da ilha de calor	Efeitos no balanço de energia urbano
Áreas de múltiplas reflexões	Maior absorção da radiação solar
Geometria de superfícies verticais	Maior quantidade de irradiação
Fator de visão do céu restrito	Retenção de radiação de ondas longas e infravermelha
Obstáculos à velocidade do vento	Redução na quantidade de calor perdido por convecção
Materiais de maior absorvância térmica	Maior acúmulo de calor sensível
Materiais de maior emissividade térmica	Maior capacidade de armazenamento do calor
Materiais de baixa refletância solar	Maior quantidade de radiação líquida
Extensas superfícies pavimentadas	Maior absorção e lenta dissipação de calor
Substituição intensiva do solo por superfícies impermeáveis	Maior conversão de radiação solar absorvida em calor sensível
Redução da vegetação	Declínio no nível de evaporação
Fontes antropogênicas de calor	Maior liberação de calor sensível e latente
Poluição do ar	Maior absorção de calor e irradiação

Fonte: a autora, baseado em Oke (1982 apud STEWART; OKE, 2012), Romero *et al.* (2019) e Enteria, Santamouris e Eicker (2021).

Diferentemente dos aspectos positivos nos acréscimos de calor em cidades de clima frio, as ilhas de calor podem aumentar o desconforto em locais de clima quente, principalmente diante do cenário de expansão territorial e populacional (OKE; STEWART, 2012; INTERNATIONAL PANEL ON CLIMATE CHANGE, 2014). Isso

pode ser explicado pelo fato de a ICU estar associada, também, aos dados climatológicos locais, nos quais a intensidade de calor tende a agravar o aquecimento em algumas regiões de clima quente e úmido, principalmente na estação do verão (ENTERIA; SANTAMOURIS; EICKER, 2021).

No conceito geral, a mudança climática está relacionada às alterações consideráveis em dados climáticos. A variar pela escala, a mudança pode ser local, como a ilha de calor, e diminuir sua influência na medida em que se afasta dos centros urbanos; ou, em escala global, atingindo as regiões sem distinção específica (U.S. ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY, 2008). Quando se trata das mudanças climáticas globais, a variabilidade no estado do clima perdura por um período prolongado e afeta os sistemas naturais e construídos, sendo causada naturalmente por processos internos ou alterações da composição atmosférica devido às atividades humanas (INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE, 2014).

Para verificar essas alterações do sistema climático, projeções são realizadas por meio da associação entre modelos de circulação geral (*General Circulation Models – GCM*) e cenários futuros das emissões de gases de efeito estufa (GEE). Com sucessivos aprimoramentos nos cenários, as incertezas climáticas foram manuseadas com possíveis trajetórias evolutivas, baseadas nas condicionantes socioeconômicas e adoção de estratégias de mitigação ao longo do século XXI. Essas projeções são utilizadas nas simulações climáticas para estipular diferentes dados de energia, massa e momento para a dinâmica da terra, atmosfera e oceano (INTERNATIONAL PANEL ON CLIMATE CHANGE, 2014; OKE *et al*, 2017).

Neste sentido, os indicativos de modificação na composição atmosférica e aumento da temperatura pelo acúmulo de gases, dentre outros fatores, revelam, em paralelo, as respostas da terra, oceano e geleiras (WORLD METEOROLOGICAL ORGANIZATION, 2021). As consequências presenciadas pelas mudanças climáticas globais já vêm atingindo, diretamente ou indiretamente, muitas regiões e setores fundamentais para a humanidade, como impactos nos meios de subsistência e serviços ecossistêmicos (ABOULNAGA; ELWAN; ELSHAROUNY, 2019; WORLD METEOROLOGICAL ORGANIZATION, 2021;).

Considerando que mais da metade da população mundial concentra-se nos centros urbanos, estas regiões tendem a ser mais vulneráveis às mudanças climáticas,

especialmente para cidadãos que vivem em condições de precária infraestrutura (INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE, 2014). O Painel Brasileiro de Mudanças Climáticas (2016) aponta que os impactos diretos nas cidades são “o aumento de temperatura, aumento no nível do mar, ilhas de calor, inundações, escassez de água e alimentos, acidificação dos oceanos e eventos extremos”. Estes efeitos estão correlacionados, na medida em que um pode agravar o outro, ainda mais frente a intensidade e frequência esperada no decorrer dos anos.

As mudanças climáticas globais podem intensificar o efeito de ilha de calor, acentuando o aquecimento urbano e, conseqüentemente, potencializando eventos térmicos extremos, como as ondas de calor (SANTAMOURIS, 2020). As temperaturas elevadas acarretam, além do desconforto térmico, em problemas relacionados à saúde humana. Alvarez e Bragança (2018) explicitam as conseqüências decorrentes dos principais efeitos supracitados, como a proliferação de doenças e mortalidade por estresse térmico de pessoas mais vulneráveis, especialmente crianças e idosos.

Confirmando a tendência de aumento da temperatura, os últimos seis anos foram registrados como os mais quentes (WORLD METEOROLOGICAL ORGANIZATION, 2021). Tomando como base os dados climáticos de temperatura e precipitação no período de 1961 a 2013, Stensjö, Ferreira e Loura (2017) verificaram que a quantidade de graus-dia de aquecimento reduziu nas cidades brasileiras em detrimento ao aumento do resfriamento, sendo possível perceber demandas similares, que apresentam, no período estudado, a substituição da demanda de aquecimento alta pela demanda de resfriamento muito alta.

Observa-se ainda que, com o aumento da temperatura e redução da qualidade do ar no meio urbano, o potencial da ventilação natural, como estratégia de amenização do calor externo, é afetado e conduz à dependência do condicionamento artificial (ROMERO *et al*, 2019). Assim, os fenômenos climáticos contribuem para o aumento da demanda energética voltada, especialmente, ao resfriamento, que acarreta em picos de energia nas tardes de verão pelo uso concomitante nos âmbitos residenciais e serviços (U.S. ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY, 2008).

A emissão de gases ocasionada pelos sistemas urbanos, principalmente no setor de energia, afeta o sistema climático e, de modo recíproco, as mudanças climáticas podem interferir no processo de oferta, demanda e operações da energia urbana (MI

et al., 2019). As interrupções no sistema elétrico, ocasionados pela frequência de eventos extremos do clima, reduzem a eficiência e podem, até mesmo, danificar fisicamente as redes de distribuição (INTERNATIONAL ENERGY AGENCY, 2021). Embora o Brasil se destaque por sua matriz energética ser predominantemente de fontes renováveis (EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA, 2018b), essa interação evidencia a necessidade de adaptação da infraestrutura urbana às projeções climáticas, estando aliada à adoção de meios alternativos para a produção energética ao mesmo tempo em que promova a redução do consumo de energia.

Sob outra perspectiva, um dos gases ainda encontrado em equipamentos de ar-condicionado é o Hidrofluorcarboneto (HFC), um gás que, apesar de não danificar a camada de ozônio, contribui para o aumento da temperatura terrestre e está no cronograma de redução ou proibição do consumo (PROTOCOLO DE MONTREAL, 2017). Assim sendo, para reduzir o uso de energia dos edifícios e as emissões de gases de efeito estufa (GEE), é de grande importância entender não apenas o panorama atual do uso de energia na construção, mas, também, o uso histórico de energia e suas tendências futuras (LI *et al.*, 2017).

Ressalta-se que o planejamento energético deve ser estratégico ao cotidiano da população, de forma a otimizar o uso de recursos naturais, e o meio urbano pode ser um alicerce da eficiência energética, desde a configuração espacial da escala urbana às edificações (ALVAREZ; BRAGANÇA, 2016). Confirmando a importância da análise integrada, Toparlar *et al.* (2018) afirmam que, baseado em pesquisas científicas, aspectos em diferentes escalas podem interferir na demanda energética das construções, dentre eles, o microclima urbano, o envelope do edifício, as instalações prediais e o comportamento de seus ocupantes.

A estrutura urbana, em conformidade com os aspectos físicos e climáticos, direciona a ocupação do solo e preservação ambiental às particularidades locais, inclinando-se à eficiência e qualidade de vida (ALVAREZ; BRAGANÇA, 2016). Sendo determinada pela densidade populacional, a compacidade do meio urbano pode ser apresentada em diferentes geometrias urbanas, variando em espaços abertos, distribuições de usos e microclimas (TORRES, 2017). Essa morfologia urbana é considerada benéfica à população, uma vez que proporciona menores deslocamentos diários e redução do uso de combustíveis fósseis, porém, a desproporção dessa geometria pode acarretar em barreiras aos recursos naturais e, assim, propender ao maior

consumo de energia com luz elétrica e eletrodomésticos (BARANDIER; ALMEIDA; MORAES, 2013).

Tratando-se dos volumes individuais, a predominância de edifícios nos centros urbanos, o torna objeto fundamental para aplicação de alternativas eficientes que visem a minimização do consumo de energia. Essa eficiência energética parte do princípio que, nas mesmas condições ambientais, o edifício proporcione o conforto térmico, visual e acústico com baixo consumo energético (LAMBERTS; DUTRA; PEREIRA, 2014). Para isso, Aboulnaga, Elwan e Elsharouny (2019) relatam a importância do desempenho da envoltória do edifício no controle da temperatura interior, por meio da redução do ganho de calor e das cargas de resfriamento. Ademais, apesar do baixo impacto, os materiais da construção podem corroborar com a formação da ilha de calor urbana e o conforto térmico externo.

Desse modo, o planejamento local deve estar alinhado à atenuação do consumo de energia em edificações, na medida em que as interrelações entre forma, orientação adequada, iluminação natural e comportamento humano são regulados à nível de projeto ou incorporados posteriormente. Soma-se a isso o fato de que a implantação de volumetrias construtivas interfere no microclima local, podendo eventualmente canalizar o fluxo de vento e obstruir a radiação solar nos arredores. Quando o planejamento está alinhado aos requisitos climatológicos, incluindo as necessidades por estação do ano, a massa projetada pode vir a contribuir na obtenção de níveis térmicos e visuais que colaborem com o conforto natural dos usuários (NOGUCHI, 2016).

Diante do cenário de mudanças no clima, diversos estudos têm buscado quantificar os efeitos de fenômenos climáticos em áreas urbanas e agregar, além da mudança no solo, os parâmetros socioeconômicos (LITARDO *et al.*, 2020). A tendência de cidades mais propícias às consequências das transformações climáticas, juntamente à falta de investimentos nas residências, aumenta o nível de vulnerabilidade da população e, até mesmo, nos casos de mortalidade por extremo calor (SANTAMOURIS, 2020). Assim sendo, a perspectiva futura é de estudos cada vez mais integrados, nos quais, a partir da associação de diferentes parâmetros, devem ser estabelecidas metas e diretrizes voltadas tanto à edificação como à ambiência urbana para a promoção do bem-estar humano.

2.2 EFICIÊNCIA NO AMBIENTE CONSTRUÍDO

As cidades são estabelecidas intrinsecamente pela interação entre o meio urbano –, forma urbana, rede viária e construções – e o meio ambiente com seus aspectos termodinâmicos, explicitados no item anterior. No Brasil, a questão ambiental adentrou ao ramo de política por meio da Política Nacional do Meio Ambiente (PNMA) descrita sob a Lei 6938/1981. Consolidado em um capítulo específico na Constituição Federativa do Brasil de 1988, o direito ao meio ambiente – incluindo o espaço urbano, não sendo restrito à função ecológica – estabelece o uso comum de forma que proporcione a qualidade ambiental e de vida para a população (BRASIL, 1988).

A qualidade ambiental é uma das premissas da sustentabilidade urbana, que alicerçado às estratégias de planejamento urbano objetiva alinhar as necessidades humanas à capacidade territorial. Tendo significativa contribuição nessa estruturação, a bioclimatologia para arquitetura e áreas urbanas busca harmonizar a massa construída ao meio inserido a partir dos recursos climáticos (TORRES, 2017). Assim, a compreensão da relação entre variáveis do meio ambiente com o meio urbano permite a concepção do planejamento estratégico local, fundamentado na adequação dos espaços públicos e economia de energia.

O Observatório do Clima (2020) cita a coparticipação dos diferentes níveis de governo para o direcionamento efetivo de medidas de adaptação voltadas às mudanças no clima, desde projetos de desenvolvimento urbano à manutenção dos ecossistemas. Por via de regra, as decisões dos projetos urbanos são respaldadas por documentos e seus instrumentos, em sua maioria de nível federal com atribuições à nível municipal, que, normalmente, apresentam aspectos relacionados à preservação ambiental sem incidir sobre o uso eficiente dos recursos e medidas compensatórias sobre os impactos no meio urbano (TÃO; SILVA, 2016).

Em 2001, a política urbana também foi incorporada à Constituição pelo Estatuto da Cidade (Lei 10.257/2001), na qual regulamenta o desenvolvimento urbano em prol do bem-estar coletivo (BRASIL, 2001). Posteriormente, o Ministério das Cidades foi criado com a função de integrar as questões ambientais à gestão pública urbana por meio de diferentes secretarias e seus respectivos eixos temáticos. Entretanto, em 2019, foi criado o Ministério do Desenvolvimento Regional (MDR) a partir da fusão do Ministério das Cidades e Ministério de Integração Nacional (BRASIL, 2019).

Reunindo políticas públicas dos ministérios extintos, o MDR continua apoiando a implementação do Estatuto das Cidades, um incentivador à consideração dos aspectos qualitativos ambientais no ordenamento democrático territorial, em oposição à visão centralizada no mercado imobiliário e de modo a amenizar os efeitos do crescimento urbano descontrolado. Porém, ainda assim, a lei aborda as questões ambientais de forma superficial, estando relacionada ao meio urbano apenas como preservação ou intervenção em áreas naturais, e desconsidera a importância da morfologia urbana para o microclima e o diagnóstico do local para elaboração de recomendações de ocupação do território, o que distancia a cidade real do projeto urbano proposto (ASSIS *et al.*, 2007; GOMES; LAMBERTS, 2009).

Se tratando das mudanças no clima, a Política Nacional sobre Mudança do Clima (PNMC) foi criada sob a perspectiva de desenvolvimento urbano sustentável considerando os aspectos climáticos e a redução da emissão de gases de efeito estufa (BRASIL, 2009). Esses objetivos podem ser concretizados por programas internos de incentivo às metas específicas, ressaltando que a redução, mais do que direcionada, deve ser mensurada a fim de garantir o progresso. No entanto, Talanoa (2020) expõe a estrutura fragmentada do setor público, tendenciando no descumprimento aos termos da PNMC e à uma condição emergencial das circunstâncias climáticas. Além disso, para sustentar uma agenda estratégica a longo prazo, alguns grupos assumiram o protagonismo na pauta de mudanças climáticas, tais como a aliança “Governadores pelo Clima”, liderada pelo Centro Brasil no Clima (CENTRO BRASIL NO CLIMA, 2020).

Um dos desafios no almejo de cidades mais sustentáveis e resilientes é a modificação no padrão de consumo energético do espaço construído. O panorama energético brasileiro é marcado por busca de segurança estrutural, na qual a produção seja suficiente para atender a demanda em ascensão (OBSERVATÓRIO DO CLIMA, 2009). Após a crise de 2001, conhecido como “apagão” devido ao colapso no fornecimento de energia elétrica, o governo adotou a postura de estímulo à racionalização do uso de energia por meio da Política Nacional de Conservação e Uso Racional de Energia (Lei 10.295/2001). Dentre as alternativas de redução do consumo de energia estão a adoção de tecnologias e edificações ecoeficientes (PAINEL BRASILEIRO DE MUDANÇAS CLIMÁTICAS, 2016).

Impulsionado pela “Lei de Eficiência Energética”, foi aprovado o Regulamento Técnico da Qualidade para o Nível de Eficiência Energética de Edificações Residenciais (RTQ-R), um documento de requisitos técnicos e métodos para “a etiquetagem do nível de eficiência energética de edificações residenciais unifamiliares e multifamiliares” (INSTITUTO NACIONAL DE METROLOGIA, QUALIDADE E TECNOLOGIA, 2012). Apesar de ser considerado um avanço para a eficiência energética das edificações, a análise da construção se dá de forma isolada sem a compreensão das inter-relações com o entorno imediato, que afetam o seu desempenho termoenergético.

Segundo a Associação Brasileira de Normas Técnicas (2013), o desempenho é o “comportamento em uso de um edifício e de seus sistemas”, normalmente estabelecido por um conjunto de requisitos qualitativos e especificações quantitativas, que visa o funcionamento efetivo do edifício e deve ser minimamente atendido. Dentre as exigências mínimas, está a indicação do desempenho térmico da edificação a partir da consideração das características bioclimáticas da área de implantação e do comportamento integrado das partes que o compõe, como piso, fachada e cobertura.

Neste sentido, as normas técnicas brasileiras (NBR) apontam diretrizes construtivas para garantir o conforto térmico e a eficiência energética em edificações. No ano de 2003, foi publicada a NBR 15.220 com o zoneamento bioclimático para estabelecer estratégias assertivas às habitações unifamiliares de interesse social, incluindo os materiais adequados a cada clima (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2003b). Já a NBR 15.575 visa a determinação de requisitos gerais e específicos sobre o desempenho de edificações habitacionais, sem a definição do sistema construtivo. Recentemente, em 2021, um projeto de emenda foi proposto para esta norma, atualizando a avaliação anual do edifício residencial e seus níveis de desempenho térmico (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2021a). Destaca-se que o método de simulação computacional da NBR 15.575 foi adotado na proposta de alteração da Instrução Normativa Inmetro para a Classificação de Eficiência Energética de Edificações Residenciais (INI-R), que substitui o RTQ-R (INSTITUTO NACIONAL DE METROLOGIA, QUALIDADE E TECNOLOGIA, 2021).

As zonas climáticas configuram diferentes intervalos de conforto térmico a serem alcançados e, para classificar o desempenho das edificações, são estabelecidos valores mínimos e máximos diários de temperatura dentro de ambientes de permanência prolongada. Esse intervalo é estimado para garantia do conforto ao

usuário, ou seja, uma “condição mental que expressa satisfação com o ambiente térmico”, que envolve fatores físicos e fisiológicos individuais e pode a temperatura do ar ser regulada com sistema de condicionamento artificial (AMERICAN SOCIETY OF HEATING REFRIGERATING AND AIR CONDITIONING ENGINEERS, 2017). Por conseguinte, outro aspecto a ser considerado para o desempenho da edificação é a adoção de soluções que minimizem o consumo de energia.

A economia de energia é considerada pelo *Intergovernmental Panel on Climate Change* (2014) como uma das estratégias para desacelerar as mudanças climáticas no mundo, sendo adotadas, principalmente, para a escala do edifício. Nesse sentido, observa-se que o nível da eficiência energética de edifícios residenciais pode ser medido na fase projetual, seja por meio do método prescrito ou pelo método de simulação. Este último método contribui na previsão dos fluxos dinâmicos de energia e consumo em toda a edificação durante um período de tempo (AMERICAN SOCIETY OF HEATING REFRIGERATING AND AIR CONDITIONING ENGINEERS, 2017). Além disso, em edificações de uso residencial, são analisadas a envoltória, o sistema de aquecimento de água e os sistemas encontrados em áreas comuns (PROGRAMA NACIONAL DE CONSERVAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA, 2019).

O desempenho de edificações multifamiliares encontra-se à mercê das projeções climáticas. Machado (2019a) avaliou quatro cidades brasileiras e constatou que o comprometimento futuro do desempenho, principalmente em estações mais quentes, se deve aos modelos construtivos atuais, caracterizados por envoltória de blocos cerâmicos sem condicionamento passivo. A adoção de medidas adaptativas contribuiu no conforto térmico dos ambientes, porém, com níveis diferentes em cada cidade. Enquanto a redução de graus-hora de desconforto térmico em Manaus foi de 25,59%, a cidade de Vitória apresentou 53,67% no período de 2080. Isso reafirma a necessidade de atualização das normas técnicas na medida em que as simulações se tornam mais precisas e corroborem para estratégias adequadas às diferentes regiões e cenários futuros.

Avaliando o desempenho de edificações por meio da preparação dos arquivos climáticos com eventos futuros para a cidade de Vitória, Casagrande e Alvarez (2013) verificaram o consumo total de energia de um edifício comercial em quatro períodos (1961-1990, 2011-2040, 2041-2070 e 2071-2100). O aumento do consumo é uma tendência em todos os cenários, observando, também, que essa projeção é

proporcional ao aumento da temperatura, principalmente nos meses de verão. Além disso, foi constatada a implantação como o índice mais relevante para o consumo energético, sendo a edificação com maior consumo modelada com as maiores fachadas direcionadas no sentido Leste-Oeste, com 90% de abertura sem proteção. Esse é um dos estudos que destacam a importância de se considerar cenários climáticos futuros em medidas de adaptação para projetos e políticas.

Observa-se que a maioria das políticas se concentram ainda na escala do edifício, em detrimento à assimilação do impacto da configuração geométrica urbana na demanda energética (ASSIS, 2005). Nas áreas tropicais, como a do presente estudo, as mudanças climáticas estão relacionadas à caracterização da área urbana e suas alterações no clima local:

[...] a mudança climática local está associada a efeitos de transformação de energia na área urbana em função de sua morfologia, das propriedades térmicas dos materiais das superfícies e da produção de calor antropogênico, provocando a redução das taxas de resfriamento evaporativo e convectivo, em função da impermeabilização do solo, da diminuição da superfície coberta por vegetação e da redução da velocidade dos ventos pelo aumento da rugosidade superficial” (ASSIS, 2005, p. 96).

A configuração urbana em desacordo com as particularidades locais afeta tanto a escala da cidade, contribuindo para mudanças no comportamento de variáveis climáticas, como a escala do edifício, padronizando construções isoladas do contexto (BARBIRATO; TORRES; SOUZA, 2011). Para a edificação de fato corresponder ao conforto térmico dos seus usuários, as complexas relações entre o clima local e suas interferências nos elementos construídos tornam-se fundamentais para guiar na construção de novas edificações – que também podem modificar o clima exterior – e promover a qualidade ambiental interna com a qualidade externa urbana (TORRES *et al.*, 2013). Assim, ao se deparar com um ambiente construído sem planejamento adequado, torna-se insustentável a busca por tecnologias de suprimento imediato do conforto, como a climatização artificial.

Uma das alternativas para diminuir a dependência de energia é o aproveitamento dos recursos climáticos por meio do ordenamento territorial e disposição de arranjos construtivos. Romero (2013) indica critérios climáticos a serem almejados na definição do desenho urbano em locais de clima quente e úmido, sendo eles: redução da temperatura pelos processos de evaporação e convecção; aumento do movimento do ar; diminuição da absorção da umidade e da radiação; proteção às chuvas nos

espaços públicos e escoamento da água. Ademais, a vegetação oferece sombreamento e a indução da ventilação ocorre pela orientação das vias e variabilidade de alturas das edificações (BARBIRATO; TORRES; SOUZA, 2011).

No entanto, o planejamento de áreas urbanas energeticamente eficientes, deve-se, além do fator ambiental, perpassar de forma abrangente pelos aspectos econômicos e sociais das cidades, visando identificar as potencialidades e fragilidades no processo de desenvolvimento da sustentabilidade a longo prazo. A articulação de políticas públicas urbanas influencia diretamente na diminuição dos impactos ambientais e na qualidade de vida das cidades, sucedendo a partir de instrumentos nacionais, regionais e estaduais. No âmbito municipal, destaca-se o Plano Diretor, a Lei de Parcelamento Uso e Ocupação do Solo, o Zoneamento Ambiental e o Código de Edificações (BRASIL, 2001).

De acordo com a Lei de Parcelamento do Solo, a prefeitura determina o projeto urbano em seus aspectos de desenho, estabelecendo diretrizes para a malha urbana e densidade construída articulada aos espaços livres. Para garantir a função social da propriedade urbana nessas diretrizes, o Plano Diretor é um instrumento básico criado pelo Estatuto da Cidade, que norteia a definição dessas diretrizes (TÃO; SILVA, 2016). Nesse sentido, a Quadro 2 relaciona os principais instrumentos urbanísticos para planejamento e controle urbano aos campos de atuação das ações municipais.

Quadro 2 – Instrumentos municipais para problemáticas urbanas

Temas/Problemáticas (campos de atuação)	Atividades e Instrumentos Municipais de Planejamento e Controle Urbano
Bases para a política urbana municipal	Plano Diretor
Ordenamento do território municipal	Macrozoneamento Perímetro urbano
Controle da expansão urbana	Regras para parcelamento do solo urbano Regras para revisão de perímetro urbano
Controle do uso e ocupação do solo	Zoneamento Urbano e Parâmetros Urbanísticos Zonas Especiais de Interesse Social e Ambiental Instrumentos previstos no Estatuto da Cidade
Controle das atividades de construção	Código de Obras e Edificações
Aplicação da norma e monitoramento	Licenciamento e Fiscalização Sistema de Informações

Fonte: adaptado de Barandier, Almeida e Moraes (2013).

No estudo sobre a relação da ocupação do solo com o comportamento térmico da cidade, Sampaio (2015) analisou, por meio de monitoramento de campo, as interferências urbanas orientadas pela Lei de Uso e Ocupação do Solo Cuiabá – MT sob as condições de conforto térmico urbano. O estudo constatou o adensamento

urbano e ausência de vegetação como potenciais transformadores do microclima, demonstrando a necessidade de controle do crescimento urbano e empreendimentos novos para minimizar impactos térmicos e ambientais.

Outro ponto relevante na temática de ocupação do solo diz respeito aos vazios urbanos. Visados como áreas de potenciais construções, ao ocupar esses espaços pode-se interferir na regulação de temperatura proporcionado por áreas verdes ou não impermeabilizadas, no aproveitamento do fluxo de ventos e no processo de expansão urbana (TORRES *et al.*, 2013).

Os Planos Diretores aplicados nas cidades apresentavam aspectos técnicos que tendiam à padronização da ocupação do solo em zonas. Diversos estudos apontavam a necessidade de reformulação desse instrumento com base na complexidade do crescimento e na questão ambiental que tangencia a ocupação urbana (GOMES; LAMBERTS, 2009). Principalmente em contextos de investimentos restritos ao meio urbano, o poder público é fundamental no controle da expansão urbana mediante as análises termodinâmicas (BARBIRATO; TORRES; SOUZA, 2011).

Em paralelo à um processo de verticalização, o adensamento urbano tem se apresentado como uma estratégia eficaz de sustentabilidade nas cidades. Contudo, a modificação construtiva em prol de moradias ao crescimento populacional pode induzir à impactos energéticos negativos, devendo ser planejado preliminarmente a um conjunto de estratégias passivas, dentre eles, o aproveitamento da ventilação natural ou brisa marítima (PALME; LOBATO; CARRASCO, 2016; SALVATI *et al.*, 2019). Gomes e Lamberts (2009) reiteram que as relações ocorridas nos cânions urbanos são diferentes ao longo do dia, visto que, em período diurno, o sombreamento provocado pelas projeções das edificações pode ocasionar a diminuição da quantidade de radiação direta no solo e da temperatura do ar próximo ao nível da rua, ou seja, alternando a demanda por resfriamento e aquecimento em determinadas situações climáticas, como por exemplo, na região Sul do Brasil. Contudo, tanto a análise da incidência solar como a do fluxo de ventos, são importantes premissas para a definição dos limites da verticalização e adensamento urbano.

Segundo Higuera (1998), as principais diretrizes de planejamento para cidade bioclimática permeada pelos princípios da sustentabilidade urbana são: considerar as particularidades dos sítios urbanos; promover o uso misto e diversidade de atividades

nos centros urbanos; projetar os espaços urbanos abertos como um sistema capaz de corrigir e moderar extremas condições ambientais adversas, além do uso social; manter a vegetação nativa de baixa manutenção nos espaços verdes; efetivar o planejamento por meio do estímulo da densidade construtiva de acordo com o estudo de impacto das variáveis ambientais; promover o aproveitamento dos recursos naturais; e incentivar projetos arquitetônicos com condicionamento passivo. Essas técnicas passivas podem contribuir na redução da demanda elétrica ao mesmo tempo em que ameniza a produção de gases contribuintes para as mudanças climáticas.

O Painel Brasileiro de Mudanças Climáticas (2016) apresenta algumas medidas de enfrentamento das mudanças climáticas globais que podem ser realizadas por meio da gestão urbana partindo de iniciativas básicas, como modificações nos regulamentos de uso do solo urbano para evitar possíveis riscos; alterações nos códigos de construção civil para adequação de projetos, que garantam o controle térmico da edificação e redução do consumo de energia; e a inserção de áreas verdes para amenizar a temperatura e o efeito de ilhas de calor. Assim sendo, para atenuação do desequilíbrio climático intraurbano, medidas ambientais devem ser direcionadas para enfrentamento do desconforto térmico e excesso de aridez. Cabe destacar que os programas associados à redução do consumo energético têm concentrado esforços na manutenção de arborização urbana e permeabilidade do solo, entre outros (BARANDIER; ALMEIDA; MORAES, 2013).

As superfícies permeáveis proporcionam resfriamento evaporativo e contribuem para a minimização da ilha de calor (PAINEL BRASILEIRO DE MUDANÇAS CLIMÁTICAS, 2016). A vegetação pode ser aplicada em diferentes estratégias, desde o edifício individual ao nível urbano. Gartland (2008) defende o paisagismo ao redor de edifícios para amenização do consumo de energia com condicionamento artificial, seguido da redução de emissões de CO₂. A implantação de árvores deve estar em conformidade às estações do ano e ao caminho solar para proporcionar sombreamento no verão, reduzir a interferência dos ventos no inverno e bloquear o sol em seu ângulo baixo. Outras formas de paisagismo são o uso de blocos permeáveis, cobertura verde e proteção solar ao equipamento de ar-condicionado.

Observa-se, assim, que a inserção ou modificação dos parâmetros urbanos estão relacionadas às características individuais de localização e classificação climática do contexto estudado. Tendo em consideração o clima quente e úmido, Romero (2013)

especifica princípios ambientais para o desenvolvimento dessas regiões. Quanto à forma urbana, propõe-se áreas abertas aos ventos – com lotes largos – e rodeadas por sombreamento à radiação direta e difusa, ocasionado, especialmente, pelo albedo das superfícies. Dessa forma, os materiais de baixo albedo contribuem para a estabilização da temperatura, caracterizada como elevada pelo próprio clima. Nas ruas e espaços públicos deve-se priorizar, além da ventilação, os elementos de sombreamento externo (entorno, vegetação e marquises). Já em relação à configuração dos espaços públicos, as grandes dimensões não são aconselhadas e essas áreas são utilizadas no controle do calor e umidade.

Perante os parâmetros direcionados aos climas quentes e úmidos, Barandier, Almeida e Moraes (2013) organizaram o Guia Técnico PROCEL EDIFICA, um documento com “instrumentos e recomendações para a prática do planejamento urbano local, indicando relações com as premissas do conforto ambiental e da conservação de energia na gestão das cidades”, a serem incluídos nos Planos Diretores. O Quadro 3 apresenta a proposição de diretrizes, associados às diferentes morfologias urbanas, formuladas para o microclima em áreas pouco adensadas, massas dispersas, ruas direcionadas e alinhamento irregular.

Quadro 3 – Interações entre princípios de clima urbano e planejamento para cidades em climas quentes e úmidos

Tecido urbano	Ordenamento territorial	Controle da expansão urbana	Controle do Uso e Ocupação do solo	Aplicação das Normas e Monitoramento
Disperso e aberto para ventilação	Perímetro urbano ampliado	Lotes mínimos grandes	Taxas de ocupação baixas	
Construções esparsas com vegetação urbana			Afastamentos frontal, lateral e fundos; taxa de permeabilidade e arborização nos lotes	
Ruas orientadas de forma a facilitar o sombreamento externo				Considerar a incidência solar nas diretrizes para novos parcelamentos
Alinhamento irregular			Afastamentos condicionado às diferentes ocupações de lote, com base no projeto	
Pouco adensada	Regras específicas	Lotes diferenciados por zonas	Lotes com testada mais larga	

Fonte: adaptado de Barandier, Almeida e Moraes (2013).

Outros instrumentos importantes da política urbana são o Estudo Prévio de Impacto Ambiental e de Vizinhança e Institutos Tributários e Jurídicos. O primeiro está relacionado ao impacto do empreendimento no meio ambiente e na qualidade de vida da população local; e o segundo, à regularização territorial e arrecadação de impostos (BRASIL, 2001). Visando incentivar melhorias na sustentabilidade das cidades, as medidas compensatórias – acompanhada de análises ambientais e orçamentárias – surgiram como forma de engajar a adoção de estratégias mais eficientes na relação entre edifício e meio urbano.

Os incentivos fiscais tornaram-se precursores da qualidade ambiental urbana e, como eminente exemplo, o poder público pode alterar os valores do Imposto sobre a Propriedade Predial e Territorial Urbana (IPTU) para a promoção de práticas voltadas aos princípios da sustentabilidade, conhecido como IPTU Verde. Sendo incorporado como lei municipal, Accioly *et al.* (2020) identificaram as diferentes aplicações do IPTU verde em cidades brasileiras, com destaque para o fomento ao uso racional dos recursos naturais – principalmente a água – e fontes alternativas para a geração de energia. No âmbito das soluções urbanas, o telhado verde se mostrou como o principal parâmetro de conforto à edificação (desde que de somente um pavimento) e mitigação do calor urbano.

A intervenção arquitetônica e urbanística, alinhada aos princípios de conforto térmico, é de grande importância para a mitigação de impactos advindos de fenômenos climáticos urbanos, como a ilha de calor em cânions. Esse tipo de estudo encontra-se mais avançado que os de adaptação e previsões futuras, o que limita na escolha das melhores soluções a serem adotadas, principalmente quando considera as mudanças em diferentes localidades (EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA, 2018b). Para a proposição de políticas públicas, as recomendações de caráter exploratório devem possuir uma afinidade maior com as pesquisas, permitindo, assim, que incorporem metodologias de análise dos impactos abrangendo a sua complexidade e incertezas, que acometem às decisões oficiais (EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA, 2018a).

Assis (2005) já afirmava no início deste século sobre a necessidade de métodos aplicáveis ao planejamento urbano mais precisos, baseados na integração de modelos descritivo e exploratório, como a análise dos contextos urbanos junto às modelagens e simulações com variações no clima. Isto é, os dados levantados por

pesquisas relacionadas ao clima urbano, quando utilizados para diagnóstico do local e definição do zoneamento territorial, são úteis na identificação das potencialidades e fraquezas da cidade quanto ao aproveitamento do microclima na garantia do conforto térmico (ASSIS *et al.*, 2007). Uma das maneiras de relacionar os índices urbanísticos aos dados climáticos é feito por meio da utilização de simulação de cenários urbanos que testem as possibilidades de arranjos construídos e proporções de áreas verdes (DUARTE, 2000 apud GOMES; LAMBERTS, 2009).

2.3 MODELAGEM INTEGRADA DE EDIFÍCIOS URBANOS

O planejamento urbano envolve a tomada de decisão tanto acerca dos aspectos físicos como socioeconômicos. Desse modo, busca-se modificações na infraestrutura urbana das cidades norteadas por medidas sustentáveis que, embasadas por constatações internacionais, devem ocorrer, inicialmente, no nível municipal (REINHART; DAVILA, 2016). Um processo coerente de planejamento local, associado ao desempenho energético, requer análises na fase preliminar com o apoio de ferramentas, aplicáveis em áreas urbanas, que fornecem resultados quantitativos e informativos para a formulação de políticas urbanas e de energia (HAO; HONG, 2021).

A pouca expressividade de estudos quantitativos com essa temática é uma limitação apontada por Martins, Bonhomme e Adolphe (2013), que reforçaram a necessidade de incremento nos conhecimentos relacionados ao impacto da conformação urbana no microclima urbano e, conseqüentemente, nas variações de demanda energética. Diante dos desafios da quantificação de influências externas, as técnicas de modelagem e simulação de edifícios situados no meio urbano foram sendo aprimoradas com o propósito de compensação entre o tempo de produção e a precisão dos resultados (LI *et al.*, 2020).

Desde 2009, Swan e Ugursal (2009) já demonstravam a modelagem de edifícios residenciais a partir de diferentes abordagens: “de cima para baixo” (*top-down*) e “de baixo para cima” (*bottom-up*). Sendo modelos de transferência de calor difundidos também na escala urbana, o primeiro se trata de estimativas energéticas em grande escala com base em dados históricos, sem detalhamento técnico dos edifícios e aspectos socioeconômicos atualizados. No entanto, devido à extensão territorial deste

modelo, as limitações tornaram-se mais evidentes nas avaliações de apenas um recorte do contexto urbano ou da inserção de novos edifícios, o que impulsionou o desenvolvimento de modelos estatísticos e físicos, pertencentes à classificação *bottom-up* (HAO; HONG, 2021).

Com a finalidade de estimar dados de energia regionais a partir do nível do edifício, o modelo estatístico correlaciona dados do uso final com as características similares de um conjunto de edifícios. Já o modelo físico, ou de engenharia, é fundamentado em simulações termodinâmicas de construções (LI *et al.*; 2020; HAO; HANG, 2021). Esta última abordagem utiliza os aspectos físicos e tecnológicos dos edifícios, viabilizando a flexibilidade na avaliação de demanda energética por meio de cenários mais eficientes. Em virtude da quantidade de dados necessários, um modelo híbrido – que agregue o modelo estatístico ao físico – pode compensar as limitações de cada abordagem, no qual as características físicas estejam alinhadas às estatísticas de análises históricas do uso de energia (LAUZET *et al.*, 2019; JOHARI *et al.*, 2020).

Denominada como *Urban Building Energy Model* (UBEM) por Reinhart e Davila (2016), o modelo de energia de edifícios urbanos fundamenta-se na abrangência do conceito de modelo de energia da construção (*Building Energy Model*) – utilizado na adequação projetual para melhorias no desempenho de edifícios individuais –, introduzindo a avaliação energética na escala da cidade a partir de um fluxo de modelagem e simulação automatizado. No intuito de estimar o uso de energia, modelos físicos são aplicados ao edifício e seu entorno urbano para a verificação dos fluxos de calor e massa e das condições ambientais em conjuntos edilícios novos ou existentes.

As ferramentas fundamentadas no modelo físico de abordagem de baixo para cima, incluindo a interação entre edifício e ambiente externo, proporcionam análises de demanda energética com resolução espacial e temporal. Em função da complexidade do sistema urbano, as simulações tendem a apresentar uma simplificação no procedimento, com o detalhamento em alguns aspectos selecionados, que varia entre as ferramentas (FERRANDO *et al.*, 2020). Além disso, a modelagem de edifícios urbanos torna-se mais relevante com a incorporação de dados confiáveis – calibrados com dados reais – e acoplamento a outros sistemas, como de energia, clima urbano, uso do solo, meios de transporte e, até mesmo, microeconômicos (HAO; HONG, 2021).

Dentre os sistemas citados, um modelo de energia completo deve envolver a estimativa de geração e distribuição energética para uma demanda específica (JOHARI *et al.*, 2020). Reinhart e Davila (2019) afirmam o potencial dessa modelagem energética na previsão do uso operacional e economia de energia de diferentes edificações urbanas, sendo importante a criação de bibliotecas de arquétipos, que é a classificação de um agrupamento de edifícios por uma característica em comum, assim como a padronização desse conjunto de dados. Essa organização dos dados edilícios facilita no processo de modelagem na escala de vizinhança, que ocorre em etapas sequenciais: o conjunto de dados de entrada sobre o clima e geometria da edificação, com materialidade e sistemas internos; a modelagem térmica para simulação de energia; e, por fim, a validação dos resultados para aplicação no planejamento.

Convém ressaltar que, para medidas eficientes a longo prazo, os dados climáticos podem ser modelados para fenômenos urbanos – como o efeito de ilha de calor – e projeções de mudanças climáticas (REINHART; DAVILA, 2016). Para o cálculo da intensidade de ilha de calor existem três métodos principais: monitoramento local, sensoriamento remoto e simulação computacional (PALME *et al.*, 2019). Já para computar a variabilidade das mudanças climáticas, comumente são utilizadas ferramentas de modificação dos dados de clima a partir de modelos representativos dos processos físicos e regionais ocasionados por essas alterações (INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE, 2019).

Atualmente, os modelos mais recentes de emissões são os Representative Concentration Pathways (RCPs), divulgados pelo Quinto Relatório (*Fifth Assessment Report – AR5*) do IPCC (2014). Entretanto, a adoção do RCP encontra-se em expansão para o uso em larga escala, visto que muitas publicações ainda se apoiam na reprodução dos modelos antigos ou realizam o comparativo dos modelos climáticos, tais como a aplicação de quatro conjuntos de dados meteorológicos futuros na simulação energética de edifício residencial em Roma por Tootkaboni *et al.* (2021) e a identificação das diferenças entre duas ferramentas utilizadas para gerar projeções futuras, *WeatherShift™* e *CCWorldWeatherGen*, por Moazami, Carlucci e Geving (2017). Esta última apresentou grande contribuição científica pelos seus dados satisfatórios em uma interface gratuita, configurando projeções para os intervalos anuais representativos de 2020, 2050 e 2080 (JENTSCH *et al.*, 2013).

O interesse na quantificação dos impactos climáticos e padrões urbanísticos na escala da cidade incentivou o desenvolvimento de diferentes ferramentas, de acordo com a capacidade de resolução desejada. Ferrando *et al.* (2020) citaram as principais ferramentas de aplicação do UBEM, aplicadas em estudos urbanos, que são: CitySim, SimStadt, *Urban Modeling Interface* (UMI), *City Building Energy Saver* (CityBES), *Open Framework for Integrated District Energy Simulations* (OpenIDEAS), *City Energy Analyst* (CEA), *Urban Renewable Building And Neighborhood optimization* (URBANopt) e *Tool for Energy Analysis and Simulation for Efficient Retrofit* (TEASER). Os dados espaciais podem ser importados por dados georreferenciados de código aberto, como CityGML ou GeoJSON, e dados meteorológicos com modelos de clima urbano (HAO; HONG, 2021).

Há um constante aperfeiçoamento destas ferramentas, porém, assim como salientam Natanian, Aleksandrowicz e Auer (2019), são restritas ao acoplamento de análises paramétricas devido à quantidade de dados de entrada e ao desempenho do processamento. A análise de desempenho ambiental almejada para diferentes configurações urbanas pode ser facilitada pelo fluxo de trabalho proporcionado pela interface do *plug-in Grasshopper* e seus componentes, com destaque para as ferramentas *Ladybug*, que dispõe de mecanismos que vão desde a modelagem até o pós-processamento. A busca pela interoperabilidade causou a recente migração das ferramentas de modelagem urbana à interface supracitada, com especial destaque para o URBANopt e CitySim, já em funcionamento, e a adaptação, em andamento, do CEA (NABONI *et al.*, 2019; FERRANDO *et al.*, 2020).

A parametrização urbana permite a integração com modelos climáticos em diferentes escalas espaciais, categorizados pela resolução de esquemas na horizontal e vertical. O clima urbano na escala horizontal pode abranger os fluxos de calor que interagem com o edifício desde a mesoescala até à microescala. Além disso, os modelos de cobertura urbana tridimensional, com cálculos nas camadas atmosféricas, demonstraram-se abrangentes o suficiente para as simulações de efeitos ICU na mesoescala (JOHARI *et al.*, 2020). Na escala local ou vizinhança, sugerem-se as seguintes ferramentas: para análises microclimáticas, o Envi-met, o OpenFOAM e o SOLENE-Microclimat; e para a parametrização climática, o *Canopy Interface Model* e *Urban Weather Generator* (LAUZET *et al.*, 2019; MAUREE *et al.*, 2019).

Com o objetivo de captar o balanço energético que ocorre no meio urbano, Bueno *et al.* (2013) desenvolveram o *Urban Weather Generator* (UWG) para a modificação dos dados climáticos normalmente aferidos em áreas isoladas e não representativas da dinâmica das cidades. Esse programa tem sido utilizado em diferentes zonas climáticas e ambiências urbanas para análises de intensidades de calor e, quando acoplado às ferramentas de simulação energética, das variações anuais de demanda energética em edificações. Ademais, a ferramenta é indicada para a geração de modelo de clima paramétrico por estimar constantes climáticas pela camada limite urbana e ser baseada em cálculos de conservação de energia (LAUZET *et al.*, 2019).

Sobre os dados de energia, a maioria dos programas utilizados na modelagem de edifícios urbanos abrange múltiplos recursos de análises simplificadas ou detalhadas com a possibilidade de interligar a outras ferramentas. A literatura destaca, dentre outros, os programas *Transient System Simulation Tool* (TRANSYS) e *EnergyPlus* (ALLEGRINI *et al.*, 2015; LAUZET *et al.*, 2019; LI, *et al.*, 2019). A simulação realizada pelo programa TRNSYS compreende o sistema detalhado de energia térmica e elétrica, mas não é adequado para modelagem de energia em nível de bairro (ALLEGRINI *et al.*, 2015).

Já o programa *EnergyPlus* é amplamente utilizado em simulações energéticas de edificações, principalmente para a estimativa da necessidade de resfriamento (REINHART; DAVILA, 2016; SALVATI; COCH ROURA; CECERE, 2017), e, além do mais, pode ser executada pela plataforma *OpenStudio* (FERRANDO *et al.*, 2020). Sabendo-se da sensibilidade da modelagem energética de edifícios individuais aos modelos de clima urbano, a conexão entre o *EnergyPlus* ao UWG possibilitou o cálculo horário anual das variáveis climáticas, índices de conforto térmico e demanda de energia. Esse procedimento foi explorado em diversos estudos que objetivavam avaliações da influência de parâmetros urbanos na intensidade de calor e, destes, na demanda por energia de edificações.

Sendo um exemplo de referência para a UBEM, Boston (Estados Unidos) foi a pioneira na aplicação do modelo de energia completo na escala da cidade, com a configuração de todos os edifícios urbanos. Davila, Reinhart e Bemis (2016) modelaram a cidade com o suporte de ferramentas CAD no ambiente Rhinoceros 3D a partir da geometria determinada pelo *Geographic Information Systemas* (GIS) e configurada pelo *plug-in* interno *Grasshopper*. O estudo afirmou a viabilidade de intervenções no planejamento

urbano pautadas na modelagem, com destaque para a comparação de medidas de geração e oferta de energia a serem aplicadas em locais ou edifícios específicos. Embora o conceito UBEM seja direcionado à modelagem, minimamente, de todo um bairro, as ferramentas viabilizaram a integração do modelo de energia ao de clima para estudos com foco na qualidade ambiental em escalas menores, inclusive análises energéticas de edifícios específicos inseridos no contexto urbano.

Considerando a mesma cidade, Street *et al.* (2013) analisaram a influência da modelagem de ilha de calor urbana nos dados de energia. As variações de temperatura e umidade urbanas demonstraram uma variabilidade de 8% a 13% na intensidade de energia de escritório e residência unifamiliar, respectivamente, quando comparado com dados meteorológicos da estação situada no aeroporto. Recomendado pelas modificações horárias, o UWG forneceu, de modo rápido, dados flexíveis de acordo com a morfologia urbana, devendo ter um detalhamento mínimo para representações físicas confiáveis.

Nos Emirados Árabes Unidos, Mao *et al.* (2017) fizeram uma análise de sensibilidade dos parâmetros requeridos pelo UWG em um distrito heterogêneo de clima tropical e subtropical. A ferramenta apresentou a relevância do sistema construtivo no consumo energético diário e comprovou a capacidade de reprodução do comportamento termodinâmico urbano, sendo indicado pelos autores o comparativo com a modelagem numérica das trocas de calor. De modo geral, Bande *et al.* (2019) mencionam a confiabilidade dos resultados para a cidade de Abu Dhabi – especialmente na amplitude térmica do inverno – com baixa variabilidade em relação aos dados medidos e, também, sugerem análises contínuas dos dados em diferentes estações.

Ainda sobre a sensibilidade da ferramenta, Alchapar *et al.* (2019) aplicaram o UWG em duas cidades de climas distintos: clima desértico de Mendoza (Argentina) e clima tropical de Campinas (Brasil). O clima foi um dos parâmetros que ofereceu variações consideráveis de intensidade de ilha de calor, junto a proporção de cânion urbano, que modificou a temperatura do ar em até 1,3°C entre cenários. Para a confiabilidade dessa temperatura, foi recomendada a integração de modelos urbanos simulados em diferentes escalas, como a mesoescala com a microescala.

Em regiões da América Latina, Palme *et al.* (2019) realizaram um comparativo da ilha de calor em 24 amostras das cidades de Guayaquil (Equador), Lima (Peru), Antofagasta e Valparaíso (Chile), localizadas na costa do Pacífico. Nestas cidades, a intensidade de ICU variou de 1°C a 5°C, com maior amplitude no inverno e nas amostras com edificações mais altas. De modo geral, as regiões de clima tropical, como de Guayaquil, tendem a apresentar as menores variações de temperatura e radiação solar ao longo do ano em relação ao clima árido e mediterrâneo das outras cidades. Isso contribui para o aumento da demanda de energia por resfriamento, já previsto em cidades de mesmo clima.

A alteração das trocas térmicas nas edificações desencadeia em mudanças no padrão de uso energético. Pela simulação no UWG e *OpenStudio*, Lima, Scalco e Lamberts (2019) identificaram um grande impacto da geometria urbana na carga térmica de edificações de escritório condicionado em Maceió (Brasil), uma cidade de clima quente e úmido. O sombreamento das edificações do entorno reduziu em até 16% a demanda térmica anual, uma porcentagem que pode ser incrementada pelas características de refletância e proporção envidraçada dessas edificações. Com o mesmo objeto de estudo, Machado (2019b) simulou – com o *EnergyPlus* e o UWG – o desempenho energético de escritórios sob o efeito de ilha de calor na cidade de Santa Maria (Brasil), de clima temperado úmido. O impacto foi de acréscimos entre 5% a 59% sobre a carga térmica por resfriamento, com os parâmetros mais influentes sendo a taxa de ocupação e a quantidade de pavimentos, seguido das propriedades físicas das janelas.

Sob outra perspectiva, as edificações com consumo energético quase nulo enquadram-se como uma diretriz projetual em conformidade aos princípios da sustentabilidade. A modelagem energética de edifícios urbanos favoreceu o desenvolvimento de procedimentos eficazes para abranger este conceito ao nível de vizinhança. Boccalatte *et al.* (2020) verificou a influência do entorno urbano e ilha de calor na geração de energia fotovoltaica aplicada em telhado e fachada de um edifício residencial. As temperaturas mais altas contribuíram para um aumento de 30% no uso de ar-condicionado concomitante a uma redução de 37% na produção de energia por área. Uma redução também foi verificada ao relacionar as superfícies escuras de fachadas e solo, que interferem na quantidade de radiação solar refletida a ser aproveitada pelos painéis.

Girotti, Marins e Lara (2019) correlacionaram o aproveitamento da radiação solar na cobertura de edifícios parametrizados com os índices urbanísticos da cidade de São Paulo por meio do *Grasshopper* e seus componentes. A ocupação máxima do solo não demonstrou ser a mais pertinente à utilização dos sistemas fotovoltaicos, pois a morfologia do entorno poderia interferir nos dados de radiação. Desse modo, até o potencial de geração de energia e a sua distribuição local devem ser verificados na escala de vizinhança.

A tendência da ampliação do conceito de eficiência energética para a escala urbana é fundamentada na integração de estratégias para as cidades. Diante da complexidade urbana, a classificação do contexto em diferentes zonas climáticas locais contribuiu para uma análise mais apurada dos efeitos de ilha de calor na camada de dossel urbano, conforme o método adotado na China por Liu *et al.* (2020). A intensidade de calor demonstrou-se superior em áreas adensadas, chegando a uma média de 2,3°C de ilha de calor no período noturno. Foi constatado que a redução do calor pode ser mais efetiva com alterações na densidade do que na altura das edificações em cidades pouco ventiladas, uma vez que a tendência já é de temperaturas mais altas e maior quantidade de radiação solar direta.

Salvati *et al.* (2020) acrescentam que o adensamento urbano, apesar dos benefícios para a sustentabilidade, deve ser analisado junto aos impactos energéticos. No estudo em Roma e Antofagasta, a intensidade de ilha de calor, calculada pelo UWG, apresentou-se maior no verão em locais com grandes áreas de fachadas ou menor espaçamento entre edifícios. Porém, para fins de comparação, a relação entre a morfologia e a ilha de calor parte do princípio que são localidades com mesmas características de clima, localização e parâmetros urbanos (tráfego, edifício e cobertura de superfície).

Seguindo a concepção de diferentes zonas climáticas locais, percebe-se que a análise de desempenho com combinações de diferentes parâmetros construtivos e externos tem incentivado o desenvolvimento de novos métodos de conformações urbanas. Ma *et al.* (2020) propuseram a composição ajustável de um conjunto de blocos para dedução dos impactos da ilha de calor no clima local, sendo uma maneira de simular a cidade completa e verificar a influência de diferentes entornos na carga térmica do edifício. Utilizando os programas *EnergyPlus* e UWG, foram inseridos dados de três locais – Miami, Hong Kong e Singapura – caracterizados majoritariamente por clima

tropical, que apresentaram um aumento de 5% a 25% na demanda por resfriamento no edifício residencial.

Pela criação de células modulares de construção no *Grasshopper*, Javanroodi, Mohammadjavad e Nik (2018) avaliaram o impacto de diferentes configurações urbanas na demanda energética por resfriamento do edifício principal e potencial de ventilação em 1600 cenários e, destes, 100 apresentaram-se como eficientes em clima quente e árido. As recomendações para os parâmetros de densidade, forma do edifício e padrões urbanos alcançou uma redução de 10,2% na demanda por resfriamento. Nesse sentido, a densidade urbana foi bem avaliada para construções novas, podendo ser projetadas com a análise de composição das células, sendo o edifício em formato “L” e ruas menos largas eficientes na cidade de Teerã.

Os estudos paramétricos, em sua maioria, são realizados pela simplificação do modelo geométrico, principalmente em relação à configuração das zonas térmicas. Exemplificando esse tipo de estudo, Natanian, Aleksandrowicz e Auer (2019) desenvolveram a simulação de edificações de uso residencial e escritórios com diferentes parâmetros edilícios e urbanos no contexto Mediterrâneo. A metodologia paramétrica com formato simplificado do edifício permitiu o desenvolvimento de mais de mil iterações e demonstrou-se adaptável à avaliação de diversas métricas, como o conforto térmico, produção de energia, dados de radiação e disponibilidade de luz.

Comparando parâmetros da morfologia urbana, Chokhachian *et al.* (2020) verificou a qualidade ambiental pela relação da forma e densidade construída para um planejamento adaptado às mudanças climáticas na cidade de Munique. Utilizando a parametrização proporcionada pelo *Grasshopper*, são observados os índices de disponibilidade de luz em ambientes internos e externos e o potencial máximo do fenômeno ilha de calor. A altura dos edifícios influenciou no acesso solar e, quando a radiação é desejável no verão ou inverno, deve-se considerar o formato de cânions mais largos.

As projeções de mudanças climáticas, associadas ao modelo de clima urbano, tornaram-se fundamentais nas análises de desempenho termoenergético, visto que as edificações e o meio urbano devem estar preparados às adversidades do clima. Correlacionado à intensidade de ilha de calor, Palme *et al.* (2019) pontua a instabilidade vertical ocasionada pelas mudanças climáticas, que podem contribuir na

dissipação de calor, porém, as ondas de calor agravariam a condição do clima urbano. Assim, a modelagem “de baixo para cima” pode integrar avaliações holísticas de mitigação às mudanças climáticas para integrá-las nas políticas públicas urbanas (MAUREE *et al.*, 2019).

Nakano *et al.* (2015) realizaram a modelagem iterativa de um Campus do MIT almejando modificações com conforto térmico e baixo consumo energético. Os principais parâmetros urbanos influentes na ilha de calor, utilizados pelos autores, foram a taxa de ocupação local, relação entre área de fachada e a total e o calor antropogênico sensível. Além disso, o modelo urbano incorporado na simulação combina o efeito de ilha de calor com as mudanças climáticas, configurados pelo UWG e *CCWorldWeatherGen*, respectivamente. Observaram que o efeito de ilha de calor correspondeu à proporção média de um décimo das mudanças climáticas. Somadas essas projeções no clima, foi observado um aumento máximo de 13,5°C na temperatura média anual até 2050.

Diante da produção científica para a modelagem de edifícios e climas urbanos, destacou-se, recentemente, a incorporação do UWG ao ambiente *Grasshopper*. O modelo climático inserido na interface paramétrica viabilizou, além da avaliação analítica, o desenvolvimento do *design* generativo, proporcionando o manuseio de um processo dinâmico de configuração com resultados individuais por um fluxo de trabalho contínuo e iterativo, a ser definido para a métrica desejada (NABONI *et al.*; 2019; CHOKHACHIAN *et al.*, 2020). Com isso, os estudos apresentados a seguir foram realizados por meio do acoplamento dos programas citados para compreender a relação do meio ambiente com o sistema de energia em edificações de diferentes usos, visando configurações urbanas mais eficientes com premissas de mitigação do efeito de ilha de calor.

Relacionando os modelos de clima, conforto térmico e demanda de energia na mesma interface, Naboni *et al.* (2019) ressaltaram a possibilidade de análises em várias escalas e as diferentes respostas do ambiente construído perante as projeções de mudanças no clima. O projeto regenerativo e eficiente, defendido no estudo, é baseado na avaliação holística com a quantificação unificada de indicadores de desempenho, relacionados à biofilia, conforto térmico externo, bem-estar, demanda energética da edificação e potencial de fontes renováveis.

A materialidade urbana é especificada por propriedades térmicas que colaboram no balanço energético, como a proporção de radiação refletida para a atmosfera determinada pelo albedo. Incluindo esse índice, Evola *et al.* (2020) apurou as relações do desempenho energético e conforto térmico externo com o microclima urbano da cidade de Catânia (Itália). As simulações paramétricas no cânion urbano demonstraram que o albedo de 0,4 aumentou a sensação térmica dos pedestres em 0,4°C e a demanda energética por resfriamento em 5%, enquanto os valores mais baixos foram insignificantes na alteração dos mesmos dados. Esses dados estão relacionados com o efeito de sombras e a quantidade de radiação que atinge as superfícies, determinando a temperatura média radiante local.

Xu *et al.* (2020) analisaram o impacto líquido dos gases de efeito estufa (GEE) pelas mudanças de temperatura do ar e de demanda energética com a aplicação de pavimentos frios em diferentes zonas climáticas locais de Boston (Estados Unidos). As emissões de carbono e temperatura média reduziram com o aumento do albedo, especialmente em áreas urbanas com definição de alta densidade. Dessa forma, observou-se que a morfologia urbana pode potencializar ou inibir os benefícios de variações de albedo e que o ciclo de vida do material influenciar neste impacto local.

Desse modo, há uma variedade de métricas que podem ser abordadas em modelagens urbanas e as vantagens de um modelo integrado e generativo são enfatizadas por Natanian e Auer (2020). Tomando como base a cidade de Tel Aviv (Israel) e sua condição climática quente e seca, verificaram a qualidade ambiental e o balanço energético de um quarteirão urbano pelas métricas de conforto térmico externo, autonomia espacial da luz e dados de energia (demanda e produção fotovoltaica). Com isso, o impacto da ilha de calor no desempenho energético por resfriamento foi maior no edifício residencial em tipologia de pátio, sendo proporcional à alta densidade. Os autores destacaram a flexibilidade da metodologia no *Grasshopper* utilizando variados mecanismos de simulação, podendo aplicar em diferentes contextos e incluir novos índices, como avaliação do ciclo de vida. Ressalta-se, também, que esse processo pode guiar em medidas norteadoras de uma comunidade com baixo consumo energético.

Assim sendo, verifica-se uma diversidade de estudos na escala de vizinhança baseados na modelagem energética de edifícios urbanos, que objetivam avaliar o desempenho termoenergético de edificações em diferentes climas e cidades. Palme

et al. (2019) ressaltaram a necessidade de estudos de ilha de calor na América Latina diante de eminentes características nas cidades, marcadas pela expansão urbana sem planejamento sustentável e vulnerável às mudanças climáticas e transformações no perfil de uso energético.

As problemáticas no meio urbano incentivaram o desenvolvimento de metodologias mais integrativas, visto que a complexidade das interações entre edificações e clima dificulta uma abordagem holística. Conforme o explicitado, os programas de caráter urbano se encontram em constante aprimoramento em função da quantidade de aspectos considerados na avaliação da dinâmica das cidades. De qualquer maneira, sugere-se a conexão de ferramentas com distintas funções e a validação dos dados para a incorporação de medidas oficiais no planejamento urbano.

Devido ao alto processamento computacional necessário para avaliações em escala de bairro – proporcional ao detalhamento inserido –, a parametrização construtiva na interface *Grasshopper* demonstrou-se promissora com configurações simplificadas, como a definição de zonas térmicas automáticas, cenários genéricos e amostras representativas de áreas urbanas. Aliado a isso, as análises termoenergéticas podem ser abrangentes em relação aos objetivos estudados, escala urbana e modificações do clima local.

Nesse sentido, o *Urban Weather Generator* e o *CCWorldWeatherGen* possibilitaram modelagens do clima em consonância com o fenômeno de ilha de calor e as projeções das mudanças climáticas. Cabe ressaltar que os dados do UWG são calculados a partir da média ponderada da geometria inserida, sendo vantajoso, especialmente, na avaliação de áreas intraurbanas relativamente homogêneas, sem considerar a evolução urbana condizente com cenários urbanos futuros.

A avaliação do consumo energético frente as condicionantes do contexto propiciam dados mais confiáveis, necessários para as tomadas de decisão de planejadores e o desenvolvimento de políticas públicas eficientes. Oportunamente às análises complementares, como de conforto térmico externo, radiação solar e ventilação, o estudo visa a relação do clima com a demanda energética por resfriamento de edificação residencial em cidade brasileira por meio de simulações com os programas supracitados.

3. PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS

Considerando que o objetivo principal da pesquisa foi analisar a influência do contexto urbano no consumo energético por resfriamento de edificações residenciais em face do fenômeno ilha de calor e das mudanças climáticas, o procedimento metodológico foi estabelecido a partir da definição da estratégia de simulação para a obtenção dos resultados. Assim, foram definidas três fases principais: definição dos cenários; simulação de consumo energético; e análise dos dados, que totalizaram sete etapas de pesquisa. A primeira foi composta por três etapas: a parametrização do contexto urbano; a seleção dos parâmetros físicos e climáticos, incluindo a caracterização do edifício residencial em análise; e a configuração de cada cenário a ser simulado. Na fase de simulação energética, composta por três etapas, foi estabelecida a sistematização do processo de simulação dos cenários; a modificação do arquivo climático para a ilha de calor e mudanças climáticas; e, em seguida, os cenários foram modelados com os parâmetros indicados para a realização das simulações. Por fim, na última fase, foi realizada a análise comparativa dos dados para elaboração de diretrizes que visavam a melhor eficiência no ambiente construído.

3.1 DEFINIÇÃO DOS CENÁRIOS

A primeira fase metodológica consistiu em definir as configurações básicas para o modelo urbano a ser simulado, com a inclusão do clima e parâmetros construtivos. Os dados climáticos foram definidos com base em uma localidade selecionada – a cidade de Vitória (ES) – assim como a escolha dos índices urbanísticos e recortes territoriais, que caracterizaram a volumetria do contexto urbano.

Os cenários foram modelados utilizando-se a parametrização construtiva proporcionada pelo *software CAD Rhinoceros* associado ao *plug-in Grasshopper* e seus componentes. A modelagem estende-se ao arquivo climático, que por meio do componente *Urban Weather Generator*, foi modificado para a consideração do efeito de ilha de calor urbano a partir dos dados urbanos inseridos. As especificações gerais foram determinadas por normas relacionadas às edificações e, por fim, instituiu-se o processo de simulação dos cenários para se verificar a influência do entorno na edificação principal.

3.1.1 Parametrização construtiva

O desenvolvimento dos cenários urbanos analisados na pesquisa parte do pressuposto de que a modificação evolutiva de variáveis atualiza os dados de saída para cada iteração (CHOKHACHIAN *et al.*, 2020). Essa abordagem pode ser alcançada por meio de um fluxo de trabalho paramétrico, em que as combinações dos parâmetros pré-selecionados direcionam as trocas de dados entre as ferramentas para a otimização dos cenários. Dentre as vantagens na utilização da modelagem paramétrica estão a economia de tempo ao explorar diferentes formas urbanas e o acoplamento aos motores de simulação, viabilizando análises de desempenho ambiental (NABONI *et al.*, 2019).

Deste modo, os cenários foram gerados por meio da associação entre a interface *3D Computer-Aided Design (CAD)* do software *Rhinoceros for Windows* na versão 6 (MCNEEL & ASSOCIATES, 2021) e o editor gráfico de algoritmos generativos *Grasshopper* (GRASSHOPPER3D, 2021). A representação da linguagem *Python* em uma interface gráfica e intuitiva facilita o estabelecimento de um fluxo de dados contínuo e automático para a visualização de geometria, a análise ambiental e energética e o pós-processamento. Para isso, são utilizados *plug-ins* com funções particulares, que oferecem diversas possibilidades de estudos, incluindo o desempenho ambiental no meio urbano com avaliação de diferentes contextos climáticos e escalas urbanas (NATANIAN; ALEKSANDROWICZ; AUER, 2019).

Como suporte no acoplamento do sistema, as ferramentas do *Ladybug Tools* oferecem um conjunto de componentes com funções de programação visual e mecanismos de simulação validados (LADYBUG TOOLS, 2021a). Sendo uma interface flexível de código aberto, é muito utilizada em análises ambientais e energéticas mais complexas. Para a realização do estudo, foram utilizados os seguintes *plug-ins*: *Ladybug*, que propicia a importação e análise de dados meteorológicos, além da geração de diagramas de estudos específicos, como radiação, sombras e vistas; *Honeybee*, com uma biblioteca de componentes para a construção da base de energia, conforto e iluminação, como o *EnergyPlus*, *OpenStudio* e *Radiance*; e, *Dragonfly*, que, a partir do componente *Urban Weather Generator (UWG)*, permite a manipulação de modelos em grande escala e a

modificação para fenômenos climáticos. A Figura 3 apresenta a interoperabilidade entre as ferramentas, sendo finalizada pelo *Excel*, um componente do *TToolbox*, para a geração e arquivamento de dados.

Figura 3 – Programas para o desenvolvimento do processo de simulação



Fonte: a autora, baseado em LadybugTools (2021a).

O fluxo de trabalho apresentado propicia o cálculo de desempenho para as variantes inseridas, salvando os resultados automaticamente e gerando saídas processadas graficamente (CHOKHACHIAN *et al.*, 2020), sendo um potencial contribuidor na otimização de projetos e planejamento de ambientes voltados para a sustentabilidade. Naboni *et al.* (2019) defendem o design regenerativo na escala urbana, integrando os aspectos necessários a um ambiente que promova a qualidade térmica e o bem-estar, assim como a adaptação às mudanças climáticas. Sendo promissora a parametrização na escala urbana, diversos estudos têm buscado análises integrativas, tais como Samuelson *et al.* (2016), Quan (2017), Aydin e Jakubiec (2018), Duan *et al.* (2019), Santos *et al.* (2021) e Zhang e Gao (2021).

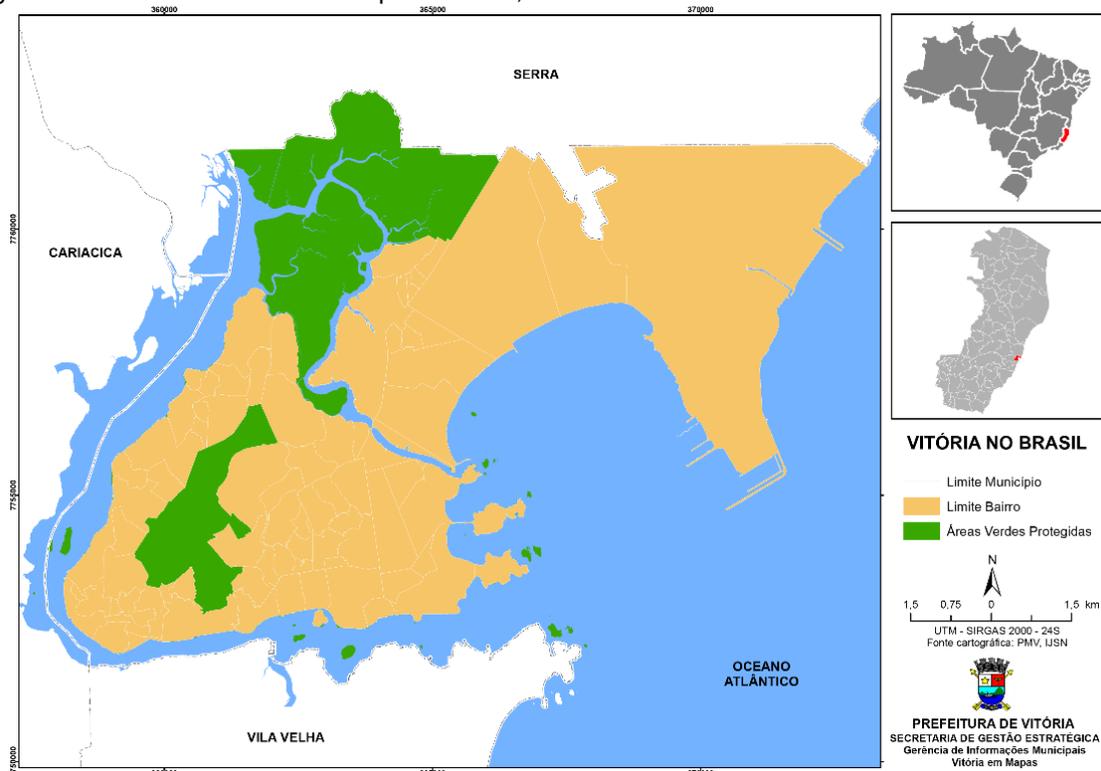
3.1.2 Parâmetros de modelagem

Os parâmetros de modelagem envolvem, necessariamente, os dados climáticos e a contextualização urbana da cidade selecionada como estudo de caso, a caracterização do edifício principal a ser analisado e a definição do processo de simulação com a ordem de modificação dos parâmetros externos.

3.1.2.1 Dados climáticos

A cidade de Vitória, capital do estado do Espírito Santo, está situada na região Sudeste do Brasil, à Latitude 20°19'15"S e Longitude 40°20'10"WGr (PREFEITURA MUNICIPAL DE VITÓRIA, 2019). Pertencente à Região Metropolitana da Grande Vitória (RMGV), o município possui território segmentado em ilha e continente, com mais da metade de sua área urbanizada (Figura 4).

Figura 4 – Cidade de Vitória no Espírito Santo, Brasil

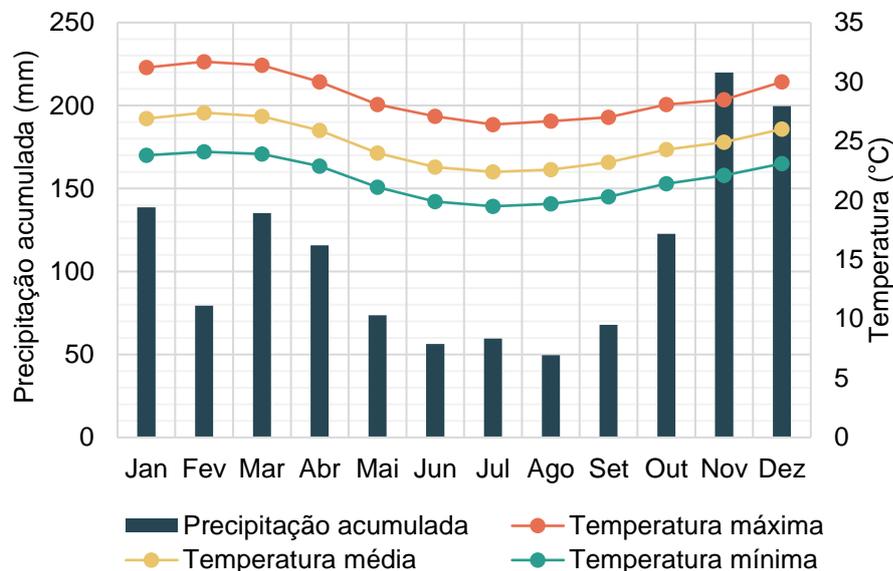


Fonte: PREFEITURA MUNICIPAL DE VITÓRIA (2019).

De acordo com a classificação climática de Köppen e Geiger, Vitória é caracterizada como clima tropical Aw, denominado de savana equatorial com inverno seco, de precipitação abaixo de 60 mm. A região da RMGV apresenta uma transição com a classificação Am e chuvas abundantes no período do verão (AYLAS *et al.*, 2020). No

Gráfico 1 são apresentadas as normais climatológicas de temperatura e precipitação para o período de 1981-2010. Segundo o Instituto Nacional de Meteorologia – INMET (2021), a temperatura média anual é de 24,8°C, podendo chegar à média máxima de 31,7°C no mês de fevereiro e a mínima de 19,5°C em julho. Os dados de precipitação acumulada indicavam uma média anual de 1318,6 mm, na qual o mês de agosto apresentou o menor valor médio e o mês de novembro foi considerado o mais chuvoso, com uma diferença de precipitação de 170,3 mm. Isso vai de encontro ao fato de a região ser caracterizada por estações bem definidas, tendo o inverno seco e o verão chuvoso (INSTITUTO ESTADUAL DE MEIO AMBIENTE E RECURSOS HÍDRICOS, 2019).

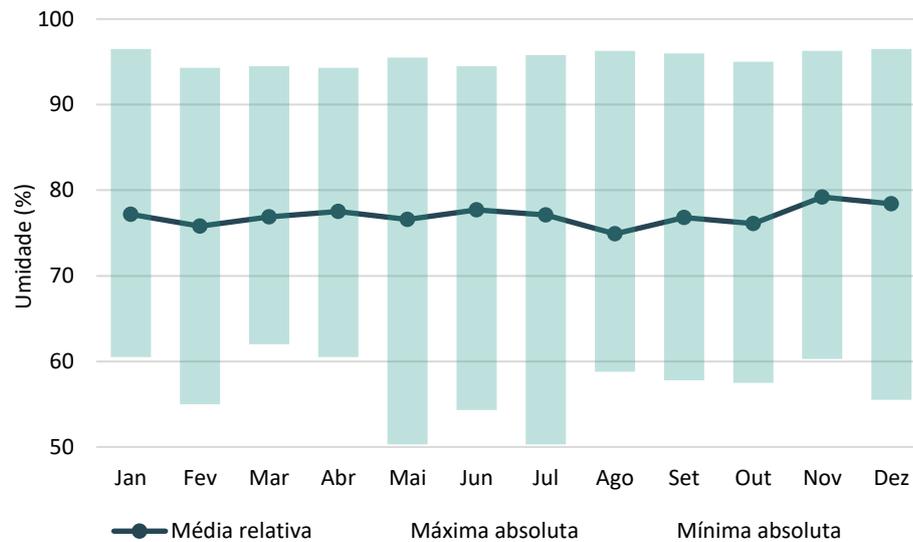
Gráfico 1 – Normais climatológicas de precipitação e temperatura no período de 1981-2010 em Vitória



Fonte: a autora, baseado no Instituto Nacional de Meteorologia (2021).

Conforme os dados INMET, para o mesmo intervalo de tempo, entre 1981 a 2010, as normais de umidade relativa indicam uma média anual de 77%, correspondente às médias elevadas encontradas em regiões próximas ao mar (Gráfico 2). As localidades que apresentam altas umidades tendem a apresentar desconforto térmico e baixa amplitude térmica durante o dia, mesmo que o ciclo de umidade relativa do ar seja inversamente proporcional ao ciclo horário da temperatura, estando com valores mínimos durante o período de maior insolação (PROJETANDO EDIFICAÇÕES ENERGETICAMENTE EFICIENTES, 2016; INSTITUTO ESTADUAL DE MEIO AMBIENTE E RECURSOS HÍDRICOS, 2019).

Gráfico 2 – Umidade absoluta e relativa no período de 1981-2010 em Vitória

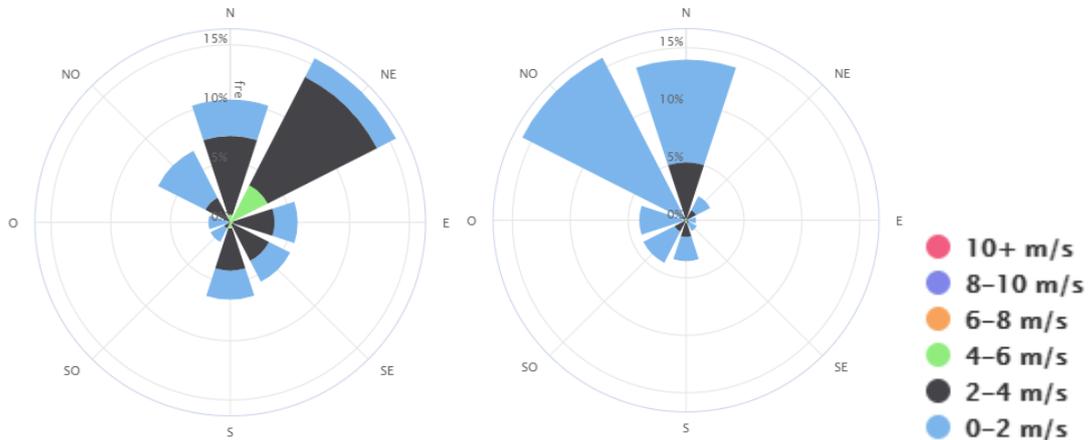


Fonte: a autora, baseado no Instituto Nacional de Meteorologia (2021).

Ainda sobre as características do clima, vale ressaltar que a radiação solar (W/m^2) e a direção ($^\circ$) e velocidades dos ventos (m/s) são dados representativos para a avaliação do desempenho da envoltória edílica (AMERICAN SOCIETY OF HEATING, REFRIGERATING AND AIR-CONDITIONING ENGINEERS, 2013). A insolação solar representa os períodos sem alta nebulosidade e chuvas (PEREIRA *et al.*, 2017) e, em Vitória, a média é de 185,5 horas totais por mês, com o maior valor em fevereiro (INSTITUTO NACIONAL DE METEOROLOGIA, 2021). Já a irradiância global horizontal indica “a taxa de energia total por unidade de área incidente numa superfície horizontal” pela somatória das componentes direta ou difusa, sendo encontrada uma média anual de 4,75 a 5,00 kWh/m².dia na região (PEREIRA *et al.*, 2017).

No mesmo período das normais climatológicas, as médias mensais de direção resultante dos ventos apontam a predominância no quadrante nordeste e a intensidade anual de 4,2 m/s. A Figura 5 demonstra a frequência, direção e velocidade em diferentes partes do dia, relevantes na previsão dos ventos (PROJETANDO EDIFICAÇÕES ENERGETICAMENTE EFICIENTES, 2016). Pode-se observar que há maior frequência e velocidade dos ventos durante o dia, alcançando de 4 a 6 m/s na direção nordeste, enquanto à noite, apesar de prevalecer a frequência em noroeste, a direção norte mostra a maior velocidade sendo de 2 a 4 m/s.

Figura 5 – Frequência de velocidades por direção no período diurno (esquerda) e noturno (direita) em Vitória



Fonte: Projetando Edificações Energeticamente Eficientes (2016).

Considerando a extensão territorial com diferentes contextos climáticos no país, as variáveis de médias mensais das temperaturas mínimas e máximas em graus Celsius, assim como das umidades relativas do ar em porcentagem, foram utilizadas para a classificação do “Zoneamento Bioclimático Brasileiro”. Segundo a Associação Brasileira de Normas Técnicas (2003b), as características bioclimáticas encontradas no território brasileiro originaram oito zonas, estando a cidade de Vitória localizada na Zona Bioclimática 8 (ZB8), considerada a mais quente dentre as zonas. Porém, percebeu-se que, para uma mesma zona, haviam regiões com características distintas e uma nova classificação, considerando mais parâmetros do clima, foi realizada por Roriz (2014).

O zoneamento visa o melhor desempenho térmico das edificações, orientando, para cada zona, diretrizes construtivas e estratégias de condicionamento térmico passivo de acordo com o tamanho de abertura para ventilação, proteção de aberturas e vedações externas (parede e cobertura). Apesar da atualização da Zona Bioclimática de Vitória para a 13, a recente classificação ainda não aborda novas recomendações técnico-construtivas adequadas ao clima e, conseqüentemente, permanecendo desajustadas para as edificações de determinadas localidades.

3.1.2.2 Contextualização urbana

Um dos principais objetos de interesse da pesquisa foi a configuração do contexto urbano, definida a partir dos índices urbanísticos previstos no Plano Diretor Urbano (PDU) da cidade de Vitória. Inicialmente, buscou-se a determinação de recortes

territoriais diferentes, que atendessem aos seguintes critérios: regiões planas com traçado urbano e parcelamento do solo homogêneos; áreas predominantemente residenciais ao uso misto; e, tipologias verticalizadas.

Tomando como base as premissas citadas, foram selecionados os bairros Jardim da Penha, Mata da Praia e Praia do Canto. As respectivas formas urbanas predominantes determinaram a média das dimensões de quadras, lotes e alturas das edificações, que compõem a geometria construtiva dos cenários. Para identificar essas características individuais, os dados disponibilizados pela Prefeitura Municipal de Vitória (2018) e imagens aéreas do *Google Earth Pro* (2020) foi possível realizar levantamentos de zoneamento, gabarito médio, tipologia habitacional principal e tamanho de lotes em cada bairro.

Segundo o “Zoneamento Urbano” e “Zona de Gabarito e Altura” da Prefeitura Municipal de Vitória (2018), os bairros Jardim da Penha e Praia do Canto localizam-se nas “Zona de Ocupação Controlada” (ZOC) – 2 e 3, respectivamente – e o Mata da Praia na “Zona de Ocupação Restrita 1” (ZOR1). Similares em alguns aspectos, as zonas objetivam o controle da ocupação e compatibilização do adensamento com o sistema viário e infraestrutura urbana, na medida em que se preservam os marcos visuais da paisagem urbana. Cabe ressaltar que, quanto à diferenciação destas zonas, optou-se por respeitar o maior limite de afastamento lateral e fundos estipulado a partir do gabarito máximo para a edificação. A Tabela 1 apresenta os principais índices urbanísticos utilizados na modelagem dos cenários.

Tabela 1 – Índices Urbanísticos para a ZOC2, ZOC3 e ZOR1

Índices de controle urbanístico	Valores
Coeficiente de aproveitamento	1,2 (mínimo) a 2,8 (máximo)
Taxa de ocupação máxima (%)	60
Taxa de permeabilidade mínima (%)	10
Afastamento frontal mínimo (m)	3
Testada mínima (m)	15
Área mínima (m ²)	450

Fonte: a autora, a partir de Prefeitura Municipal de Vitória (2018).

As características físicas de cada bairro permitiram verificar as possíveis variações para um mesmo índice construtivo. O bairro Jardim da Penha (A) é marcado por quadras compridas de 45 m por 175 m e lotes transversais estreitos com a largura

média de 14,6 m, nos quais as edificações seguem o mesmo formato e afastamentos longitudinais regulares. Convém destacar que, neste bairro, a divisão dos lotes se dá pelo agrupamento de duas edificações, que compartilham áreas em comum. Na Mata da Praia (B) a quadra é retangular de 60 m por 150 m dividida em lotes uniformes de 15 m por 30 m; e na Praia do Canto (C), a quadra de 115 m por 115 m é formada por uma área central cercada por edifícios em lotes de 15 m por 42,5 m. Essas dimensões médias são representativas das quadras demarcadas na Figura 6, na qual há imagens dos recortes urbanos de cada bairro.

Figura 6 – Imagens aéreas dos recortes territoriais em Vitória



LEGENDA

A: Jardim da Penha B: Mata da Praia C: Praia do Canto

Fonte: a autora, a partir de Google (2020).

Com a forma urbana pré-definida, a parametrização construtiva foi realizada utilizando-se o índice mínimo e máximo de coeficiente de aproveitamento (CA) e taxa de ocupação (TO) regulamentado pelo Plano Diretor, sendo o primeiro estabelecido em 1,2 e 2,8 e, o segundo, em 40% e 60%. A combinação entre eles determinou a base e gabarito do edifício principal, compondo quatro volumes edifícios diferentes para cada forma urbana.

Ainda que, na prática, não é comumente encontrada uma homogeneização dos índices urbanísticos na escala da cidade, Machado (2019b) e Natanian, Aleksandrowicz e Auer (2019), assim como outros estudos similares, reafirmam o caráter genérico dos cenários para estudos experimentais com tipologias urbanas. Por outro lado, diante da rentabilidade do solo principalmente em áreas de orlas, centrais e estratégias de comércio, os índices urbanísticos para a cidade de Vitória, além de serem utilizados como reguladores da ocupação urbana, funcionam como um limitador ao mercado imobiliário (FERREIRA; FERREIRA; RODRIGUES, 2019), que tendem a ocupar todo o espaço construtivo permitido, ou seja, adotar o máximo do

índice de aproveitamento. Dessa forma, algumas definições dos cenários desse estudo foram escolhidas na busca por melhores soluções para aproximação da realidade urbana ao mesmo tempo que para otimizar os dados de saídas nas simulações.

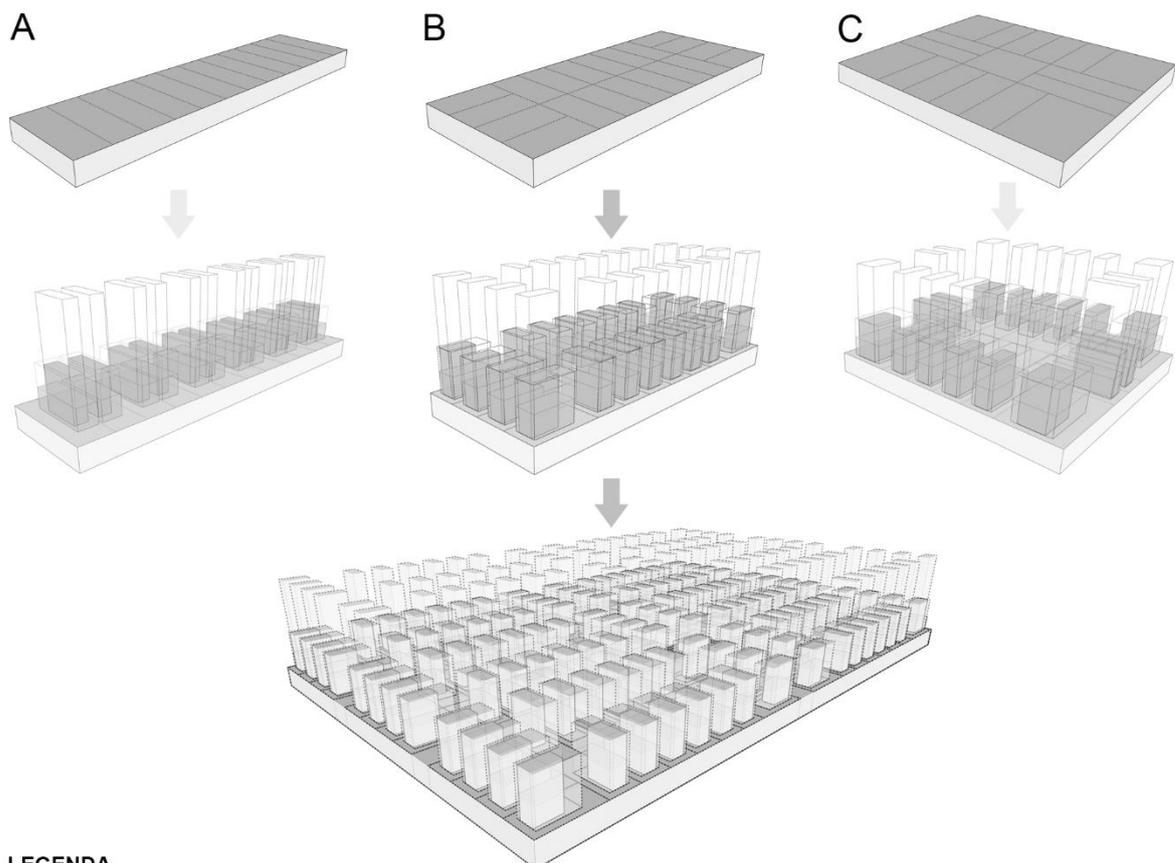
Um desses pontos ajustados é a implantação da edificação. Considerando que o pavimento tipo da construção tem formato retangular, a fachada de menor dimensão está voltada para a rua independente dos ambientes internos. As ocupações foram demarcadas no lote de modo que atendessem ao afastamento mínimo de 3 m, com exceção da forma urbana A, na qual a edificação foi inserida centralizada no comprimento do lote. Logo, a implantação da edificação não se altera e as modificações de orientação se dão em sua totalidade, ou seja, rotaciona-se todo o cenário nas quatro posições cardeais (Norte, Sul, Leste e Oeste).

Determinando a distância entre as quadras, a estrutura viária vigente na cidade configurou as características físicas dos cenários, incluindo a especificação de pavimentação. As variáveis comuns para uma via local são uma faixa de domínio mínima de 12 m sem a presença de canteiro central, sendo 2 faixas de rolamento de 3 m por sentido; não há estacionamento e a pavimentação pode ser de asfalto ou concreto (PREFEITURA MUNICIPAL DE VITÓRIA, 2018). Um dos pontos importantes dessa estrutura é a definição das distâncias entre as fachadas que, junto a com as alturas das edificações, controlam a proporção de cânion urbano.

Com base nas especificações para a ambiência urbana, adotou-se que a pavimentação poderia ser de concreto ou asfalto, com a inclusão de taxa de permeabilidade mínima de 10% em cada lote. A partir dos parâmetros utilizados em estudos de mesmo enfoque, como em Nakano (2015), a aplicação da permeabilidade sucedeu pela aplicação da porcentagem de 20% de áreas gramadas. Aplicada em cada lote, essa porcentagem representou a área mínima exigida pelo Código de Edificações e a parcela destinada à vegetação nos espaços públicos, que devido às variações construtivas entre cenários, não houve a padronização da relação de área verde pela área total. Tratando-se da arborização urbana, buscou-se a conformidade com o Plano Diretor de Arborização e Áreas Verdes da Prefeitura Municipal de Vitória (2019), no qual é recomendado, para calçadas de 2,5 m a 3,0 m, a inclusão de árvores de médio porte (minimamente) com afastamento mínimo de 6 m entre elas.

Os aspectos construtivos urbanos – dimensão de quadras, implantação de edificações e largura de vias – permitiram criar o contexto, de forma que esteja alinhado às conformações indicadas pela legislação urbana. Por conseguinte, o dimensionamento escolhido para o cenário deve estar adequado à escala estudada (MARTINS; BONHOMME; ADOLPHE, 2013) e, neste estudo, deve englobar o edifício e o seu entorno imediato entre 200-450 m de diâmetro. Tendo em consideração que esse recorte se repete dentro da escala de bairro e a fim de manter um bom ritmo de processamento computacional, o contexto urbano total corresponde aproximadamente à 60.000 m². A quantidade de quadras variou de acordo com as dimensões para cada forma urbana, sendo A (57.558 m²) e B (63.648 m²) compostos por seis quadras retangulares e C com quatro quadras quadradas (58.564 m²). A Figura 7 mostra os cenários em suas diferentes combinações.

Figura 7 – Configuração volumétrica dos cenários



LEGENDA

A: Jardim da Penha B: Mata da Praia C: Praia do Canto

Fonte: a autora (2021).

A partir da forma urbana (A, B e C), os cenários foram nomeados segundo os índices aplicados, como o coeficiente de aproveitamento – sendo CA 1,2 como 1 e CA 2,8 como 2 – seguido da porcentagem de ocupação, com T4 para 40% e T6 para 60%.

Essas combinações geraram o total de 12 cenários principais, nos quais pode-se verificar diferentes relações espaciais, tais como: a altura média das edificações (H); a fração da ocupação por edificações pela área total, descrevendo a proximidade entre edifícios; a área das superfícies verticais (fachadas) pela área total; a fração de áreas verdes (gramado e árvores) pela área total; e a proporção de cânion urbano (Tabela 2).

Tabela 2 – Dados construtivos dos cenários

Cenários	Altura média das edificações (m)	Relação área ocupada pela área total	Relação fachada pela área ocupada	Relação de árvores por área total	Relação de grama por área total	H/W
A1T4	18	0,13	1,13	0,18	0,16	1,20
A1T6	8	0,30	0,72	0,18	0,16	0,70
A2T4	45	0,13	2,74	0,18	0,16	3,00
A2T6	18	0,30	1,69	0,18	0,16	1,70
B1T4	18	0,14	1,28	0,15	0,17	1,40
B1T6	8	0,31	0,82	0,15	0,17	0,80
B2T4	45	0,14	3,12	0,15	0,17	3,30
B2T6	18	0,31	1,92	0,15	0,17	1,90
C1T4	18	0,13	1,00	0,09	0,23	1,10
C1T6	8	0,30	0,64	0,09	0,23	0,70
C2T4	45	0,13	2,43	0,09	0,23	2,60
C2T6	18	0,30	1,50	0,09	0,23	1,50

Fonte: a autora (2021).

Além da caracterização de uma região, esses cenários genéricos se enquadram como zonas climáticas locais (ZCL), uma classificação criada por Stewart e Oke (2012). As zonas estabelecem padrões urbanos homogêneos a partir de variáveis de proporções construtivas e cobertura do solo. Elas contribuem no fornecimento de dados de entrada para modelos que utilizam parâmetros de dossel urbano, utilizados nas previsões de temperatura ou magnitudes de ICU e na comparação dos resultados em diferentes zonas para verificar as alterações climáticas.

Dada a dificuldade de todas as variáveis coincidirem, inicialmente foram feitos os comparativos dos cenários com as ZCL pela fração de cobertura da área. Os cenários parametrizados do estudo apresentaram dois intervalos principais: entre 10% e 20% de área ocupada nos cenários T4 e, nos T6, de 20% a 40%. Após analisar a cobertura, a variação na proporção de cânion urbano – de 0,70 a 3,30 – abrangeu mais classificação de zonas e fez-se necessário o comparativo das alturas médias das edificações (8 m, 18 m e 45 m). Assim, as características dos cenários genéricos direcionaram a classificação em ZCL, conforme demonstra o Quadro 4.

Quadro 4 – Zonas climáticas locais representativas dos cenários urbanos

Cenários	A2T4, B2T4, C2T4	A1T4, B1T4, C1T4 A2T6, B2T6, C2T6	A1T6, B1T6, C1T6
Zonas climáticas locais	Edifícios altos compactos	Edifícios médios compactos	Edifícios baixos espalhados
			
Descrição	<ul style="list-style-type: none"> • Mistura densa de edifícios altos com muitos pavimentos. • Poucas ou nenhuma árvore. • Cobertura do solo, em sua maioria, pavimentada. • Principais materiais construtivos: concreto, aço, pedra e vidro. 	<ul style="list-style-type: none"> • Mistura densa de edificações médias, de 3 a 9 pavimentos. • Pouca ou nenhuma árvore. • Cobertura do solo principalmente pavimentada. • Principais materiais construtivos: concreto, pedra, alvenaria e cerâmica. 	<ul style="list-style-type: none"> • Arranjo aberto de edifícios baixos (1 a 3 pavimentos). • Abundância de cobertura de solo permeável, com plantas baixas e árvores dispersas. • Principais materiais construtivos: concreto, madeira, alvenaria, pedra e cerâmica.

Fonte: a autora, baseado em Stewart e Oke (2012), tradução nossa.

Além da determinação das variáveis supracitadas, os valores de albedo e calor antropogênico foram padronizados: o primeiro de acordo com a materialidade aplicada (asfalto e concreto) e, o segundo, com base nos limites típicos de 5 a 50 W/m² estipulados para a ZCL 6 por Oke *et al.* (2017). O cálculo do calor antropogênico consiste na somatória de fluxos de energia diurnos liberados, aproximadamente, em 41% pelas edificações, 9% pelo metabolismo humano e 50% por veículos (FERREIRA; DE OLIVEIRA; SOARES, 2011). Sailor *et al.* (2015) encontraram um valor total máximo no verão de 33,45 W/m² para a cidade de São Paulo e, os dados de tráfego isolados podem atingir o pico de 15 W/m², como, por exemplo, na cidade tropical de Singapura (YANG, 2016).

A associação dos parâmetros de morfologia, cobertura vegetal, calor antropogênico e albedo é utilizada para a caracterização de zonas em diversos estudos comparativos de intensidade de ilha de calor. A título de exemplo, Litardo *et al.* (2020) definiu amostras urbanas representativas da cidade de Durán (Equador), a fim de reduzir a quantidade de zonas a serem utilizadas na modificação do arquivo climático urbano, e Salvati *et al.* (2019) calculou as intensidades em recortes urbanos correspondentes à diferentes épocas de desenvolvimento das capitais Roma (Itália) e Barcelona (Espanha). Deste modo, o estudo compara 12 cenários fundamentados na

combinação de índices urbanísticos e preceitos compatíveis aos parâmetros requeridos, sendo aplicados às três formas urbanas regulares da cidade selecionada.

3.1.2.3 Caracterização do edifício principal

Seguindo o modelo dinâmico do contexto urbano, no qual as medidas foram definidas de acordo com a parametrização das áreas construídas, em cada cenário há uma volumetria de edifício com diferentes áreas por pavimento, escolhida para o detalhamento construtivo e funcionamento interno. Após a geometria parametrizada, são definidos os materiais – isolamento e massa térmica –; as cargas e programações internas; padrão de uso e ocupação; cálculo das trocas de calor; e ventilação natural e sistema de condicionamento de ar. Porém, para modelos de energia confiáveis, deve-se reduzir a incompatibilidade entre a realidade e modelo, sendo, alternativamente, pelo uso de dados detalhados obtidos em documentos de construção (AKKOSE; AKGUL; DINO, 2021).

Um dos critérios para a seleção da funcionalidade da edificação principal, a ser analisada, foi a ocupação pelos usuários primordialmente no período noturno, concomitante à predominância do efeito de ilha de calor. Sendo um padrão particular de uso residencial, o edifício é “utilizado para fins habitacionais, que contenha espaços destinados ao repouso, alimentação, serviços domésticos e higiene” (INSTITUTO NACIONAL DE METROLOGIA, QUALIDADE E TECNOLOGIA, 2012). Bueno *et al.* (2013) apontou a variação de consumo em até 20% nas edificações de uso residencial, visto que estes são mais afetados do que os edifícios comerciais normalmente influenciados pelo maior ganho interno de calor.

Assim sendo, para a caracterização do edifício principal foram utilizados os seguintes documentos: “Proposta de Instrução Normativa Inmetro para a Classe de Eficiência Energética de Edificações Residenciais” do Centro Brasileiro de Eficiência Energética em Edificações (2018); a NBR 15.575/2013 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2013); e o “Regulamento Técnico de Qualidade para o Nível de Eficiência Energética de Edificações Residenciais” (2012). Este último especifica os aspectos construtivos e estimula o maior desempenho térmico da envoltória por meio da classificação da eficiência energética de edificações residenciais unifamiliares e multifamiliares, sendo premissa a concordância das especificações dos materiais de

acordo com a Zona Bioclimática (ZB) em que se encontra a edificação (INSTITUTO NACIONAL DE METROLOGIA, QUALIDADE E TECNOLOGIA, 2012). Com isso, a seleção dos materiais da edificação foi baseada naqueles comumente empregados nos edifícios residenciais brasileiros em conformidade aos pré-requisitos definidos para a Zona Bioclimática 8.

Quanto à determinação do modelo, Li *et al.* (2020) afirmam sobre a necessidade de compensação entre a precisão dos resultados e a duração do processamento visto que o cálculo de energia em edifícios urbanos requer mais tempo de trabalho. Partindo desse princípio e pelo caráter genérico dos cenários urbanos modelados parametricamente, a estratégia de zoneamento térmico implementada na edificação foi semelhante à indicada na *Standard 90.1* da *American Society of Heating, Refrigerating and Air-conditioning Engineers* (2013), na qual os pavimentos são divididos automaticamente em zonas internas e perimetrais por fachada.

O método de zoneamento tem impacto sobre o uso de energia na edificação simulada, Chen e Hong (2018) e Johari *et al.* (2020) recomendam o uso do zoneamento automático concomitante ao multiplicador de pisos para economizar tempo de simulação mantendo a boa precisão do desempenho de edifícios urbanos com andares intermediários operativos. Explorada também nos estudos com enfoque no uso residencial, essa metodologia foi adotada por Samuelson *et al.* (2016) e Natanian, Aleksandrowicz e Auer (2019).

Devido à escala urbana utilizada na pesquisa, assim como os limites de processamento computacional, fez-se necessária a adaptação nas dimensões dessas zonas. Na busca pela conformidade da edificação residencial com o modelo base utilizado para simulações do “Regulamento Técnico de Qualidade para Uso Residencial” (RTQ-R), na qual a somatória das áreas de ambientes de permanência prolongada (APP) corresponde à aproximadamente 70% (58,34m²) da área total de cada pavimento, foram realizados testes de profundidade e cálculos das zonas perimetrais, de forma que correspondessem à mesma proporcionalidade.

Dessa forma, a uniformização das áreas de APPs para as combinações entre TO e CA, relativas à uma forma urbana específica, se deu pela padronização da profundidade das zonas perimetrais em 2,80m e 1,80m para a TO 60% e TO 40%,

respectivamente. Assim, alcançou-se um desvio médio de 1,31% entre essas áreas, representadas como 69,65% do pavimento em A, 72% em B e 68,47% em C.

Ainda nesse sentido, as áreas internas definidas pelas zonas térmicas foram utilizadas para o cálculo de abertura de janelas. Para as APPs situadas na ZB8 da Região Sudeste brasileira, a NBR 15.575/2013 indica aberturas grandes para ventilação, que correspondam igual ou maior que 8% da área do piso (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2013). Entretanto, sobrepondo-se a esse valor, a legislação local por meio do Código de Edificações no Município de Vitória (Lei nº4821/1998) recomenda aberturas para ventilação e iluminação com dimensões mínimas de 1/8 da área do ambiente – equivalente à 12,50% –, sendo no mínimo de 0,60m² e destinando 50% para a ventilação (PREFEITURA MUNICIPAL DE VITÓRIA, 1988). Essa última porcentagem foi a aplicada na parametrização das aberturas da edificação em análise.

A Tabela 3 apresenta a configuração geral das zonas térmicas por meio da relação entre áreas totais e pavimentos. Pode-se observar que a taxa de ocupação possui grande influência sobre a área final ao mesmo tempo em que é possível equipará-lo com os outros cenários. Quanto às porcentagens de aberturas nas fachadas (PAF), os cálculos relacionam as áreas de abertura para as zonas com as áreas das fachadas. Os valores encontrados para as maiores zonas ditaram a padronização em todas as fachadas, sendo seccionados à proporção de janelas individuais.

Tabela 3 – Dados dimensionais das zonas por cenário

Cenários	Profundidade da zona (m)	Área de APP (m ²)	Área de Corredor (m ²)	Porcentagem APP por pavimento (%)	Porcentagem de abertura por fachada (%)
A1T4	1,80	72,72	31,68	69,65	21
A1T6	2,70	163,62	71,28	69,65	14
A2T4	1,80	72,72	31,68	69,65	21
A2T6	2,70	163,62	71,28	69,65	14
B1T4	1,80	51,84	20,16	72,00	22
B1T6	2,70	116,64	45,36	72,00	15
B2T4	1,80	51,84	20,16	72,00	22
B2T6	2,70	116,64	45,36	72,00	15
C1T4	1,80	69,84	32,16	68,47	21
C1T6	2,70	157,14	72,36	68,47	14
C2T4	1,80	69,84	32,16	68,47	21
C2T6	2,70	157,14	72,36	68,47	14

Fonte: a autora (2021).

Após a definição da volumetria e aberturas do edifício, foram selecionados os materiais para cada tipo de superfície da envoltória, que é definida como um “conjunto de planos que separam o ambiente interno do ambiente externo, tais como fachadas,

empenas, cobertura, aberturas, assim como quaisquer elementos que os compõem” (INSTITUTO NACIONAL DE METROLOGIA, QUALIDADE E TECNOLOGIA, 2012). Com o intuito de estimar os dados de edificações brasileiras e a rotina de uso de seus moradores, um levantamento foi realizado pela Eletrobrás para o Procel e divulgado no relatório “Pesquisa de Posse e Hábitos” (PPH) em 2019. Dentre os questionamentos feitos à população, alguns abrangiam a arquitetura e a configuração das moradias atuais (Quadro 5), visto que o relatório nortearia novas pesquisas de impactos regulatórios e definição dos índices de eficiência.

Quadro 5 – Informes do relatório "Pesquisa de Posse e Hábitos"

Perguntas	Respostas no Sudeste
Andar de localização do apartamento	64,21% a partir do segundo andar
Tom predominante das paredes externas da residência	64,74% Claro
Sentido Cardeal da maioria das janelas da residência	28,28% Norte
Existência de janelas, em mais de uma parede externa	76,13% Sim
Tipo de proteção solar existente, pelo lado de fora	54,34% Nenhuma
Área (em m ²) construída do domicílio	86,33% Média
Material que predomina na construção das paredes externas do domicílio	78,73% Alvenaria com revestimento externo
Material que predomina na cobertura	55,90% Laje de concreto
Visualização direta do telhado estando posicionado dentro de casa	64,97% Não
Visualização da inclinação do teto estando posicionado dentro de casa	65,56% Sim

Fonte: adaptado de Eletrobrás (2019).

Observando o levantamento da PPH, é possível perceber que a maioria das habitações possui a envoltória composta por paredes de vedação em alvenaria com revestimento externo claro e laje de concreto. Além disso, verifica-se a presença de janela em mais de uma parede externa sem proteção solar pelo lado de fora. Diante da situação das moradias e análise dos potenciais para economia de energia, as perguntas relacionadas aos equipamentos utilizados nas atividades desenvolvidas nas moradias demonstravam que a maioria da população utiliza estratégia mecânica para manter o conforto térmico nos ambientes (ELETROBRÁS, 2019).

Teixeira *et al.* (2015) já afirmavam que a maioria das edificações brasileiras são constituídas por uma envoltória similar, residindo as diferenças sobre a divisão dos ambientes, acabamentos internos e elementos de sombreamento das aberturas. Esses aspectos construtivos não se distinguem por região geográfica, mas

representam as variadas tipologias de edifícios residenciais e níveis de padrões construtivos (baixo, médio e alto). Ao se considerar o local de implantação, critérios e níveis de desempenho dos materiais empregados na construção devem ser atendidos de acordo com a Zona Bioclimática (INSTITUTO NACIONAL DE METROLOGIA, QUALIDADE E TECNOLOGIA, 2012). Por conseguinte, a transmitância térmica, capacidade térmica e absorvância solar das coberturas e paredes externas dos ambientes considerados de longa permanência na ZB8 devem cumprir os valores indicados no Quadro 6.

Quadro 6 – Valores de desempenho térmico para paredes externas e coberturas

Zona Bioclimática 8			
Componente	Absorvância solar (adimensional)	Transmitância térmica [W/(m ² K)]	Capacidade térmica [kJ/(m ² K)]
Parede Externa	$\alpha \leq 0,6$	$U \leq 3,70$	Sem exigência
	$\alpha > 0,6$	$U \leq 2,50$	Sem exigência
Cobertura	$\alpha \leq 0,4$	$U \leq 2,30$	Sem exigência
	$\alpha > 0,4$	$U \leq 1,50$	Sem exigência

Fonte: adaptado de Associação Brasileira de Normas Técnicas (2013).

Perante o exposto, a materialidade de parede, cobertura e vidro foram selecionados, conforme as propriedades térmicas indicadas na NBR 15.575/2013, no “Catálogo de propriedades térmicas de paredes, coberturas e vidros” do Instituto Nacional de Metrologia, Qualidade e Tecnologia (2013). Cabe ressaltar que, após a escolha, há a necessidade de criação de todos os materiais e objetos a serem utilizados na modelagem e adicionados à biblioteca do programa. Devendo ser configuradas com as camadas individuais e os valores de rugosidade, espessura, condutividade, densidade e absorção solar, as propriedades térmicas individuais foram calculadas pelo método da Associação Brasileira de Normas Técnicas (2003a).

Considerando as respostas do questionário do PPH (2019) e o levantamento de Teixeira *et al.* (2015), a envoltória das edificações brasileiras é comumente formada por paredes de alvenaria e coberturas com estrutura de madeira e telha de fibrocimento. Já a laje é um dos elementos da divisão de pavimentos-tipo da edificação, configuradas como mista de acordo com o modelo de Sorgato e Lamberts (2011). Os componentes construtivos promissores ao estudo, com as respectivas especificações, são apresentados, resumidamente, no Quadro 7 e detalhados no Apêndice A.

Quadro 7 – Características construtivas da edificação principal

Componente Construtivo	Descrição	Especificação
Paredes externas	Argamassa interna e externa de 2,5 cm; bloco cerâmico (9,0x14,0x24,0 cm); pintura externa	$U = 2,46 \text{ W}/(\text{m}^2.\text{K})$
Cobertura	Laje maciça de 10 cm; câmara de ar > 5 cm; telha fibrocimento	$U = 2,06 \text{ W}/(\text{m}^2.\text{K})$
Laje	Laje mista	$R = 0,09 \text{ (m}^2.\text{K}/\text{W})$

Fonte: a autora, baseado em Instituto Nacional de Metrologia, Qualidade e Tecnologia (2013) e Sorgato e Lamberts (2011).

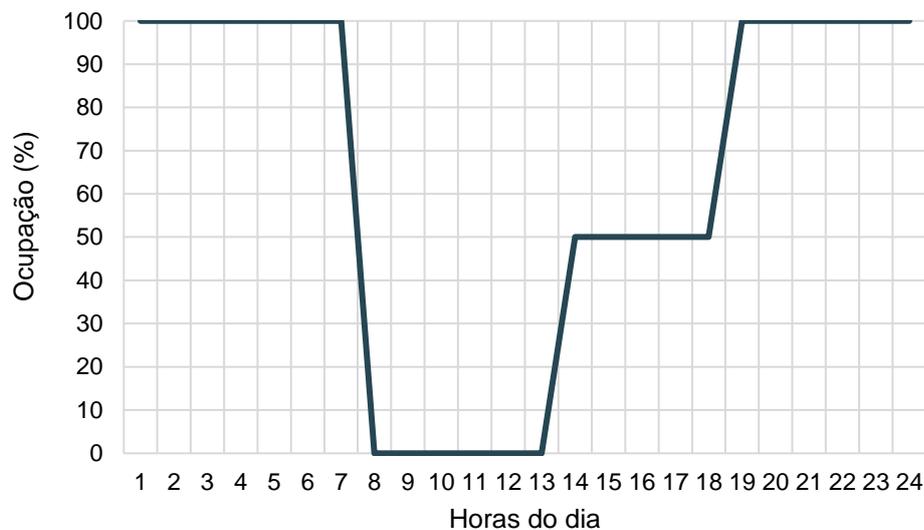
Em relação à área envidraçada das fachadas, a Emenda ABNT NBR 15575-4:2013 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2021b) permite o percentual de abertura com elementos transparentes superior à 20% para a ZB8, desde que os vidros sejam de alto desempenho e contenha elemento de sombreamento. Para a abertura máxima de 22% encontrada nos cenários, espera-se que o fator solar máximo seja de 0,61. Assim como toda a materialidade da envoltória, o vidro da janela foi selecionado conforme os limites sugeridos no método simplificado do Centro Brasileiro de Eficiência Energética em Edificações (2018), ou seja, a transmitância térmica máxima de $5,7 \text{ W}/\text{m}^2.\text{K}$ e fator solar entre valores de 0,22 e 0,87. Dentro destes critérios, o vidro laminado com incolor de 8 mm “Eco Lite Incolor” da CEBRACE demonstrou-se compatível ao apresentar a máxima transmitância e fator solar de 0,57.

Uma das pontuações de Teixeira *et al.* (2015) foi a presença de elementos de sombreamento nas aberturas como um componente de diferenciação das residências brasileiras, destacando-se a incorporação de sacadas com função, também, de brise horizontal. Entretanto, a partir de um levantamento nos bairros em processo de valorização imobiliária, Nico-Rodrigues *et al.* (2015) constataram que a maioria das aberturas das edificações não se beneficiam da incorporação de venezianas ou persianas, elementos indicados ao melhor desempenho energético da envoltória, principalmente em zonas bioclimáticas quentes.

Para a Zona Bioclimática 8, o período de sombreamento por dispositivos nas aberturas deve ser para o ano inteiro, no horário das 8h às 18h. Na presente pesquisa, a integração de dispositivo de sombreamento nas janelas dos ambientes de longa permanência foi caracterizada como venezianas horizontais de madeira, com refletância de 0,5, condutividade de $0,23 \text{ (W}/\text{m}.\text{K})$ e espessura de 5 mm (SORGATO; LAMBERTS, 2011), recomendada pelo RTQ-R de forma a impedir a radiação solar direta nos ambientes internos.

Além do horário recomendado aos dispositivos, o padrão de ocupação determina o horário em que os ambientes são utilizados pelos moradores, assim como o controle de sistemas internos e cargas térmicas. O Gráfico 3 demonstra a rotina semanal dos seus usuários de acordo com o horário que, por se tratar de uma zona de compartilhamento da sala e dormitório, refere-se tanto à ocupação quanto ao sistema de iluminação de ambos os ambientes (CENTRO BRASILEIRO DE EFICIÊNCIA ENERGÉTICA EM EDIFICAÇÕES, 2018).

Gráfico 3 – Padrão de ocupação em dias de semana e final de semana



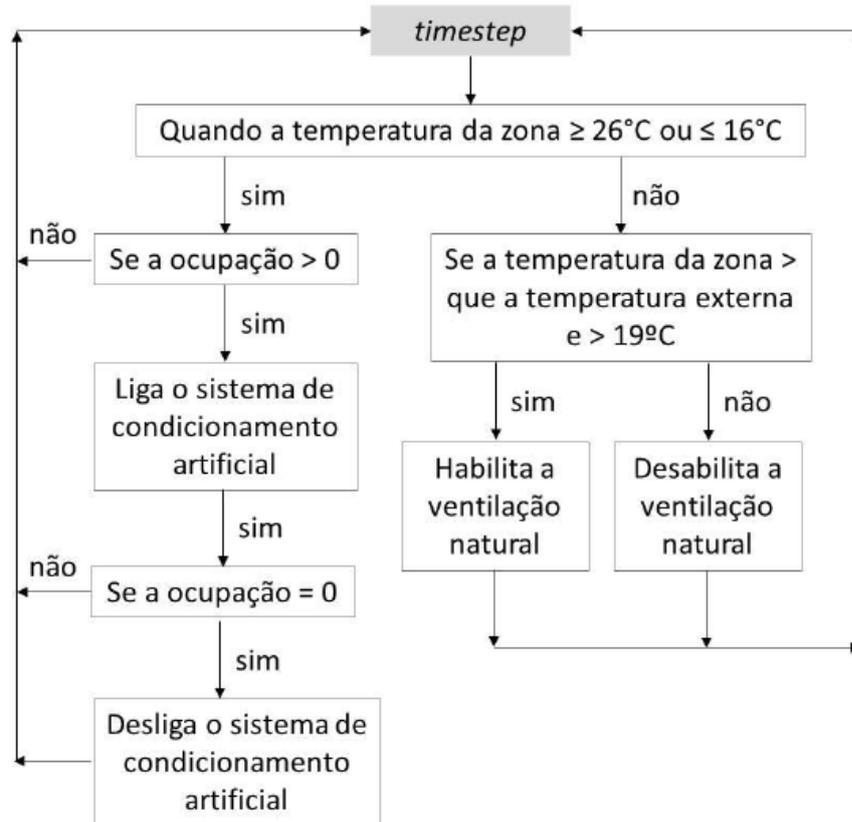
Fonte: a autora, baseado em Centro Brasileiro de Eficiência Energética em Edificações (2018).

Como sugerido pelo Centro Brasileiro de Eficiência Energética em Edificações (2018), a densidade de potência para iluminação (DPI) é de 5,0 W/m². Para o ambiente sala, considera-se o período de uso de equipamentos de 14h às 21h59min e a densidade de carga interna como 120W. Porém, ajustando a densidade de potência de equipamento (DPE) para a simulação, foi calculado o valor aproximado pela área condicionada e verificados valores utilizados em outros trabalhos, como Yang (2016), que apresenta uma média de 5,06 W/m² para edificações residenciais intermediárias.

O modelo apresenta ventilação híbrida, combinando a ventilação natural com sistema de condicionamento de ar, acionado quando a temperatura interna do ambiente ocupado se encontra acima do limite de conforto aceitável (CENTRO BRASILEIRO DE EFICIÊNCIA ENERGÉTICA EM EDIFICAÇÕES, 2018). Para ambientes naturalmente ventilados, considera-se adequado às condições de conforto entre 18°C e 26°C, entretanto, assume-se que o desconforto por calor, que ativa o sistema de

resfriamento no ambiente, é a partir de 26°C e, por frio, ocorre abaixo dos 16°C (Figura 8). O coeficiente de descarga aplicado foi de 0,6 para a ventilação natural.

Figura 8 – Fluxograma do controle de acionamento do sistema de ventilação híbrida



Fonte: Centro Brasileiro de Eficiência Energética em Edificações (2018).

Segundo a *Standard 90.1* (AMERICAN SOCIETY OF HEATING, REFRIGERATING AND AIR-CONDITIONING ENGINEERS, 2019), o sistema de ar-condicionado para o uso residencial em zonas climáticas 1A (Brasil) é o *Packaged Terminal Heat Pump* (PTHP). Na condição de referência do Centro Brasileiro de Eficiência Energética em Edificações (2018), o edifício deve ser simulado considerando, além do sistema PTHP, a modelagem com sistema de condicionamento nos ambientes de permanência prolongada no modo de operação do ventilador contínuo e o estabelecimento dos parâmetros fixos de eficiência e energia consumida pelo equipamento (COP), indicados na Tabela 4. Além disso, deve-se atingir o máximo de 10% da quantidade horária não atendida pelo sistema quando a APP estiver ocupada.

Tabela 4 – Modelagem do sistema de condicionamento de ar

Parâmetros	Valores
Taxa de renovação do ar	0,0075 m ³ /s
Eficiência do ventilador	0,7
Eficiência do motor	0,9
COP	3,5 W/W

Fonte: a autora, baseado em Centro Brasileiro de Eficiência Energética em Edifícios (2018).

Em síntese, a partir da conformação urbana parametrizada, foi possível definir a volumetria das edificações em cada cenário. O conjunto de especificações construtivas e de funcionamento interno configurou a edificação principal de uso residencial e, junto aos dados climáticos e materialidade externa, viabilizaram a formação dos diferentes cenários a serem simulados.

3.1.3 Configuração dos cenários urbanos

A definição do contexto urbano e do edifício de análise determinaram a geometria principal dos cenários de simulação, nos quais há ainda a incorporação de parâmetros externos e internos. Cada cenário configura interferências na edificação de maneiras distintas e evolutivas, a começar pelo mais utilizado em simulações termoenergéticas – edifícios avaliados isoladamente – até cenários mais adequados para simulações de áreas urbanas, com complexos sistemas de refletância direta ou indireta em consonância com a diferenciação na configuração do entorno, baseados na metodologia de Lima, Scalco e Lamberts (2019).

Para a avaliação na escala urbana, foram realizados testes com outras tipologias edilícias – como blocos centralizados e em fita – e variação de gabarito, que exigiram modelagens individuais de parametrização. Uma vez que o programa faz a leitura dos cenários por média ponderada da geometria, os parâmetros construtivos urbanos são priorizados e sua aplicação na forma urbana pode representar diferentes cenários. A modificação dos edifícios para a tipologia em fita ou centralizados com diferentes afastamentos laterais foi utilizada apenas nos dados de sombreamento, sendo descartado o acréscimo desses resultados no estudo.

As edificações do entorno são modeladas como elementos de sombreamento (BOCCALATTE; FOSSA; MÉNÉZO, 2020), sendo definidos apenas pela configuração dos dados de entrada utilizados para a alteração do clima, tais como: uso, ano de construção, porcentagem de abertura nas fachadas, fator de ganho solar do vidro e albedo das superfícies (paredes e cobertura). O detalhamento, tanto na modelagem como nos parâmetros, se dá unicamente no edifício em análise, representado pelo uso residencial, dimensionamento das aberturas, especificações construtivas, separação de zonas e presença de dispositivo de sombreamento.

A materialidade aplicada às paredes e pavimentação determinam os fluxos de calor na escala do cânion urbano. A fim de verificar a influência direta sobre o edifício, os valores de albedo das superfícies externas foram modificados em condições baixa, padrão e alta. Outro tipo de superfície é a permeável, denominada como área gramada com propriedades específicas, e a presença de arborização urbana.

Ainda em relação aos fatores externos, os dados do clima foram ajustados ao contexto urbano, com efeito de ilha de calor e mudanças climáticas. Os cenários foram estabelecidos com diferentes combinações de arquivos climáticos (rurais e urbanos), tanto em 2018 como nos anos futuros, sendo determinados como parâmetros os anos de 2050 e 2080.

Deste modo, fica evidente a configuração setorizada dos aspectos que compõem os cenários, uma vez que alguns parâmetros foram fixados, principalmente das edificações, e outros possuem alterações com vistas à verificação das intensidades de ilha de calor. Para resumir os arranjos destes parâmetros, a Quadro 8 apresenta as variáveis utilizadas na formação dos 186 cenários.

Quadro 8 – Interações de parâmetros fixos e dinâmicos nos cenários

Composição dos cenários		
Parâmetros fixos	Definições	Interações
Edificação principal	Uso residencial	1
	Coberturas e lajes	1
	Aberturas de janelas	1
Parâmetros dinâmicos	Variações	Interações
Edificação principal	Paredes externas	2
	Coefficiente dos vidros	2
Índices urbanísticos	Taxa de ocupação	2
	Coefficiente de Aproveitamento	2
	Gabarito	3
Sombreamento	Norte, sul, leste e oeste	4
Clima	Rural, urbano e futuro	6
Pavimentação	Asfalto e concreto	2
Áreas verdes	Arborização e gramados	2
Dispositivo de sombreamento	Adaptado e não adaptado	2
Edificações do entorno	Albedo de parede e cobertura	4
	Aberturas	2
	Usos	2

Fonte: a autora (2021).

A combinação de parâmetros fixos e dinâmicos, aplicados nos cenários urbanos, foram fundamentais para a identificação da influência específica destas modificações nas simulações, tanto em relação aos dados climáticos como ao consumo energético.

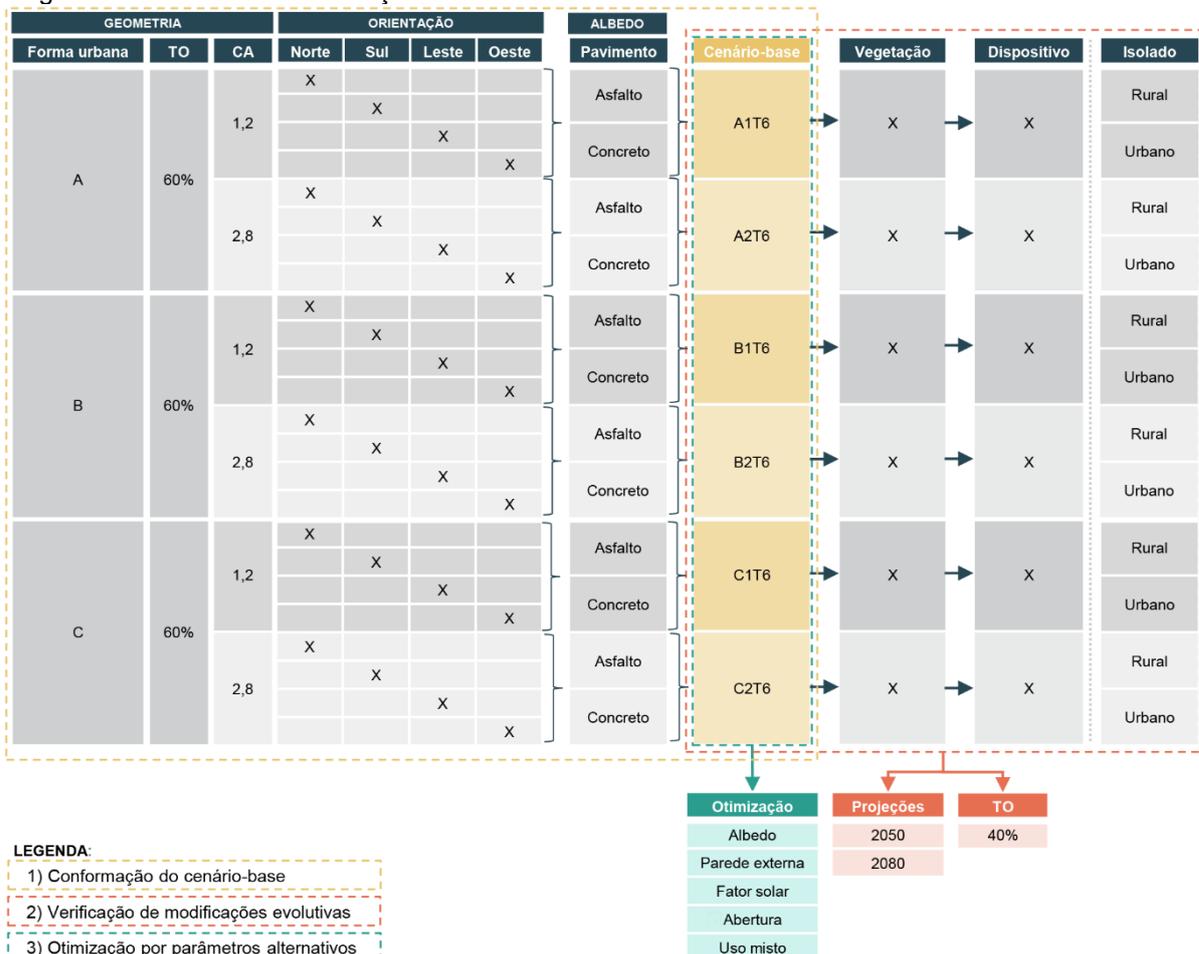
3.2 SIMULAÇÃO DE CONSUMO ENERGÉTICO

O consumo de energia do edifício analisado foi estipulado pela simulação computacional a partir do procedimento de parametrização com a inserção dos dados de entrada. Para isso, anteriormente, foram definidos o processo de simulação dos cenários e a modificação dos arquivos climáticos.

3.2.1 Processo de simulação

A fim de aprimorar o processamento dos dados conforme o desenvolvimento do estudo, o processo de simulação, posterior à definição dos cenários, foi estruturado em três etapas principais: i) conformação do cenário-base; ii) verificação de modificações evolutivas; e, iii) otimização por parâmetros alternativos. Essas etapas estão representadas nos elementos visuais da Figura 9 pelas cores amarelo, vermelho e verde, respectivamente.

Figura 9 – Processo de simulação dos cenários



Fonte: a autora (2021).

No primeiro momento, o cenário-base foi manipulado para as formas urbanas A, B e C com máxima ocupação e os coeficientes de aproveitamento. Nestas conformações geométricas, foram incorporados os parâmetros externos de pavimento asfalto, fachada com valores padrões e uso unicamente residencial. Os cenários foram simulados para as quatro orientações e, aqueles que apresentaram os melhores índices de consumo energético para resfriamento em kWh/m².ano, passaram por nova seleção com o pavimento concreto. Assim, os cenários-base destacaram-se, inicialmente, pela melhor orientação e pavimentação de acordo com o consumo.

Diante da caracterização principal, a segunda etapa ocorreu pelo acréscimo de parâmetros diretamente ao cenário-base, ou seja, a presença de áreas verdes e o dispositivo de sombreamento no edifício principal. Além disso, os arquivos climáticos rural e urbano foram analisados sem a interferência do entorno, visando identificar a estimativa de consumo energético apenas com as intensidades de ilha de calor. O diferencial dessa etapa se deu pela repetição do processo em projeções climáticas futuras e aplicação da menor taxa de ocupação nos cenários.

Por último, obtive a alternância de parâmetros entre os valores menores e maiores de albedo (paredes e coberturas) e a área verde combinada ao outro tipo de pavimento, além da variação de tamanho de aberturas e usos nos edifícios do entorno. Já na edificação principal, houve a modificação otimizada do coeficiente de ganho solar dos vidros e transmitância térmica das paredes externas (Tabela 5). Vale ressaltar que os valores escolhidos nesta etapa visaram o reconhecimento dos efeitos pela alteração e das melhorias em cada parâmetro.

Tabela 5 – Dados dos parâmetros alternativos

Parâmetros dinâmicos		Valores			
		Padrão	Menor	Maior	
Edifício	Paredes externas	2,46	1,85	-	
	Fator solar	0,57	0,30	-	
Entorno	Usos	Residencial	Misto	-	
	PAF	50%	20%	-	
	Albedo	Parede	0,40	0,10	0,60
		Cobertura	0,65	0,07	0,30

Fonte: a autora (2021).

A determinação dos cenários, a partir da forma urbana e parâmetros externos, foi organizada na modelagem dos arquivos climáticos urbanos, ou seja, cada cenário possui um arquivo individualizado. Assim, todo o processo de simulação – incluindo as modificações iniciais – estava correlacionado às configurações pré-selecionadas.

3.2.2 Modificação do arquivo climático

A simulação computacional requer algumas entradas, como os arquivos climáticos, que devem ser de domínio público, gerado por uma instituição de reconhecida capacidade técnica e com fontes de dados referenciadas (SORGATO *et al.*, 2012). Além disto, deve fornecer dados horários para os parâmetros relevantes do programa – temperatura e umidade; radiação solar, direção e velocidade do vento – e representativos da Zona Bioclimática onde a edificação está inserida (INSTITUTO NACIONAL DE METROLOGIA, QUALIDADE E TECNOLOGIA, 2012).

Para uma simulação mais precisa ao objetivo da pesquisa, o arquivo climático foi modificado em duas fases: projeções futuras e efeito de ilha de calor urbana. No primeiro, os dados de medição disponibilizados pelo INMET no ano de 2018 foram adaptados às estimativas de mudanças no clima e, posteriormente, às configurações do contexto urbano para considerar as intensidades de temperaturas comuns nessas regiões.

3.2.2.1 Projeções climáticas

A transformação do arquivo climático às projeções futuras é uma metodologia comumente empregada em estudos que visam análises a longo prazo, considerando as mudanças climáticas previstas pelo *Intergovernmental Panel on Climate Change* (IPCC). Para isso, são utilizados modelos climáticos representativos dessas mudanças, atualizados à medida em que as pesquisas avançam e novos relatórios são divulgados.

Uma ferramenta amplamente utilizada nesse tipo de estudo é a *Climate Change World Weather File Generator for World-Wide Weather Data* (CCWorldWeatherGen), desenvolvido pela *Sustainable Energy Research Group* para a geração de arquivos climáticos modificados às mudanças climáticas de qualquer lugar do mundo (ENERGY AND CLIMATE CHANGE DIVISION, 2021). Disponibilizada gratuitamente, a *CCWorldWeatherGen* viabiliza o uso direto do arquivo em simulações de desempenho de edifícios, como, por exemplo, no trabalho desenvolvido por Callejas *et al.* (2021).

A transformação dos dados meteorológicos é feita pela metodologia *morphing* proposta por Belcher, Hacker e Powell (2005), em que são necessários os arquivos climáticos atuais em EPW e os dados resumidos do modelo climático (JENTSCH, BAHAJ, JAMES, 2017). Por meio da interface do Microsoft® Excel, são realizados os cálculos dos dados climáticos e a geração dos arquivos finais em *EnergyPlus Weather Format* (EPW) ou *Typical Meteorological Years* (TMY2).

Previamente, o arquivo climático atual da cidade de Vitória foi selecionado no formato EPW. Com os dados meteorológicos medidos pelo Instituto Nacional de Meteorologia (INMET), o arquivo foi disponibilizado pelo Laboratório de Eficiência Energética em Edificações – LABEEE (2018) após correções de nebulosidade, no ano de 2018. Com base nos dados históricos de 2000 a 2010, este arquivo foi configurado para um ano de referência com os dados climáticos que representassem os meses típicos em cada localidade (RORIZ, 2012).

Já os modelos climáticos retratam os processos físicos regionais frente às mudanças no clima, constituindo-se de uma estimativa média de 20 e 30 anos e organizados nos seguintes períodos: 1961-1990; 2010-2039; 2040-2069; e, 2070-2099 (INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE, 2019). Dentre os modelos criados, a ferramenta indica a inserção dos dados de médias mensais estipuladas pelo *General Circulation Model* (GCM) do *Hadley Centre Coupled Model version 3* (HadCM3) – utilizado no *Third Assessment Report* (TAR) e, posteriormente, no *Fourth Assessment Report* (AR4) –, disponibilizado pelo *Data Distribution Centre* (DDC) do IPCC.

Para explorar as possibilidades de desenvolvimento futuro, principalmente em relação às forças impulsionadoras de produção de gases de efeito estufa e emissão de precursores de aerossol, o *Special Report on Emissions Scenarios* (SRES) definiu quatro cenários principais (A1, A2, B1 e B2) a serem acoplados nos modelos climáticos. Conforme definido pelo manual da ferramenta, o cenário escolhido foi o A2, que caracteriza um cenário heterogêneo de contínuo crescimento populacional e econômico mais lento e fragmentado (INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE, 2007). Este cenário possui três experimentos (a, b e c), totalizando 76 arquivos para uso na ferramenta.

No primeiro momento, foi necessário modificar a leitura do Microsoft® Excel do símbolo decimal como ponto e o símbolo de agrupamento de dígitos como vírgula, além da permissão dos macros e tempo de vinte minutos para a recuperação automática (JENTSCH, BAHAJ, JAMES, 2017). Após as adaptações no sistema, os arquivos selecionados anteriormente foram inseridos na interface do *CCWorldWeatherGen*, versão 1.9, na seguinte ordem: 1. local do arquivo de dados HadCM3; 2. seleção do arquivo climático EPW; 3. escolha do período de tempo do cenário HadCM3 A2 (Figura 10).

Figura 10 – Interface do *CCWorldWeatherGen*

CCWorldWeatherGen climate change weather file generator V1.9 [manual](#)
For transforming EPW weather files into climate change TMY2/EPW files. (Acknowledgements & disclaimer of warranties below)

Specify the HadCM3 data file path:

Summary of combined HadCM3 A2 ensemble climate change predictions for the selected weather site

No scenario selected

		JAN	FEB	MAR	APR	MAY	JUN	JUL	AUG	SEP	OCT	NOV	DEC	ANN
Daily mean temperature	TEMP (°C)	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Maximum temperature	TMAX (°C)	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Minimum temperature	TMIN (°C)	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Horizontal solar irradiation	DSWF W/m ²	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Total cloud cover	TCLW % points	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Total precipitation rate	PREC %	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Relative humidity	RHUM % points	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Mean sea level pressure	MSLP hpa	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Wind speed*	WIND %	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00

* Please note that wind speed resides on a 96x72 grid whilst all the other data is on a 96x73 grid

EPW weather file selection

(1) Please specify the EPW file you want to transform

Select EPW File for Morphing

Current EPW baseline weather file for morphing:

No weather file selected Latitude: 0,00 N
Longitude: 0,00 E
Elevation: 0 m

HadCM3 scenario timeframe selection

(2) Please select a HadCM3 A2 scenario ensemble timeframe

2020's 2050's 2080's

Closest four HadCM3 96x73 grid points to

	A	Latitude:	Longitude:
No weather file selected	B	0,00 N	0,00 E
	C	0,00 N	0,00 E
No scenario selected	D	0,00 N	0,00 E

EPW weather file morphing

(3) Click button to start morphing procedure

Start Morphing Procedure

Current morphed EPW weather file:

No morphed weather file

EPW/TMY2 weather file generation

(4) Click the appropriate button for EPW / TMY2 file generation

Generate Climate Change EPW Weather File

Generate Climate Change TMY2 Weather File

To create a TMY2 file of the original EPW file click the button below:

Generate Present-Day TMY2 Weather File form EPW data

Fonte: a autora, baseado em *CCWorldWeatherGen* (2017).

A ferramenta carregou os resultados do cenário A2 e seus experimentos, que são utilizados na transformação do arquivo original pelo procedimento *morphing* (JENTSCH, BAHAJ, JAMES, 2017). Em alguns minutos o processo foi finalizado,

sendo necessária a geração do arquivo climático final – com a inserção das mudanças climáticas – no formato EPW, para a posterior aplicação no *software* de simulação.

Casagrande e Alvarez (2013) ressaltam a importância de adequação dos cenários às projeções futuras para análise do impacto do clima urbano nas edificações. Assim, o processo de transformação do arquivo foi executado nos períodos de 2050 (2040-2069) e 2080 (2070-2099) para a cidade de Vitória.

Cabe ressaltar que, para a modificação do arquivo considerando as mudanças climáticas, é recomendado o uso de dados climáticos computados no intervalo de 30 anos (1961-1990), uma condição não oferecida pelo arquivo disponibilizado para a cidade selecionada. Assim, sugere-se que a inserção de uma menor quantidade de valores pode levar a uma variação na estimativa dos dados de projeção climática.

3.2.2.2 Efeito de ilha de calor urbana

Normalmente, as simulações energéticas de edificações são realizadas utilizando-se as bases de dados climáticos obtidas pelas medições em estações meteorológicas localizadas em campo aberto, como os aeroportos (BUENO *et al.*, 2013). A fim de prever o efeito de ilha de calor nas áreas urbanas, a ferramenta *Urban Weather Generator* (UWG) foi desenvolvida no *Sustainable Design Lab* do Instituto de Tecnologia de Massachusetts (MIT) pelo Bruno Bueno, supervisionado por Leslie Norford, em 2010.

A ferramenta está em constante aperfeiçoamento para reproduzir cálculos internos com mais precisão. Inicialmente, foi desenvolvida na versão do *Matlab Runtime*, um programa independente habilitado pela leitura de arquivo xml (*Extensible Markup Language*) com a caracterização da área rural e urbana (NAKANO *et al.*, 2015). Em 2018, o UWG foi traduzido para o formato *Python*, inserido como componente da ferramenta *Dragonfly* no ambiente *Grasshopper* (GITHUB, 2021). Essa versão permitiu o desenvolvimento de um fluxo de trabalho em uma única interface, de modo que o impacto individual dos parâmetros pudesse ser analisado nos espaços internos e externos (NATANIAN, ALEKSANDROWICZ E AUER, 2019; EVOLA *et al.*, 2020).

Desde a sua criação, o *Urban Weather Generator* foi validado em diversos estudos, como Bueno *et al.* (2013), Street *et al.* (2013), Nakano *et al.* (2015); Yang (2016); Mao

et al. (2017), Palme *et al.* (2019), Natanian, Aleksandrowicz e Auer (2019), Evola *et al.* (2020), Xu *et al.* (2020), entre outros. Sendo uma ferramenta gratuita e de baixo custo computacional, o desempenho é comparado aos modelos atmosféricos de mesoescala com maior processamento, ainda que, devido às simplificações do modelo, os efeitos microclimáticos específicos não sejam capturados. Além disso, destaca-se a facilidade de adaptação às diferentes localidades e condições climáticas e a viabilidade de parametrização construtiva às proporções de cânions urbanos (MASSACHUSETTS INSTITUTE OF TECHNOLOGY, 2014).

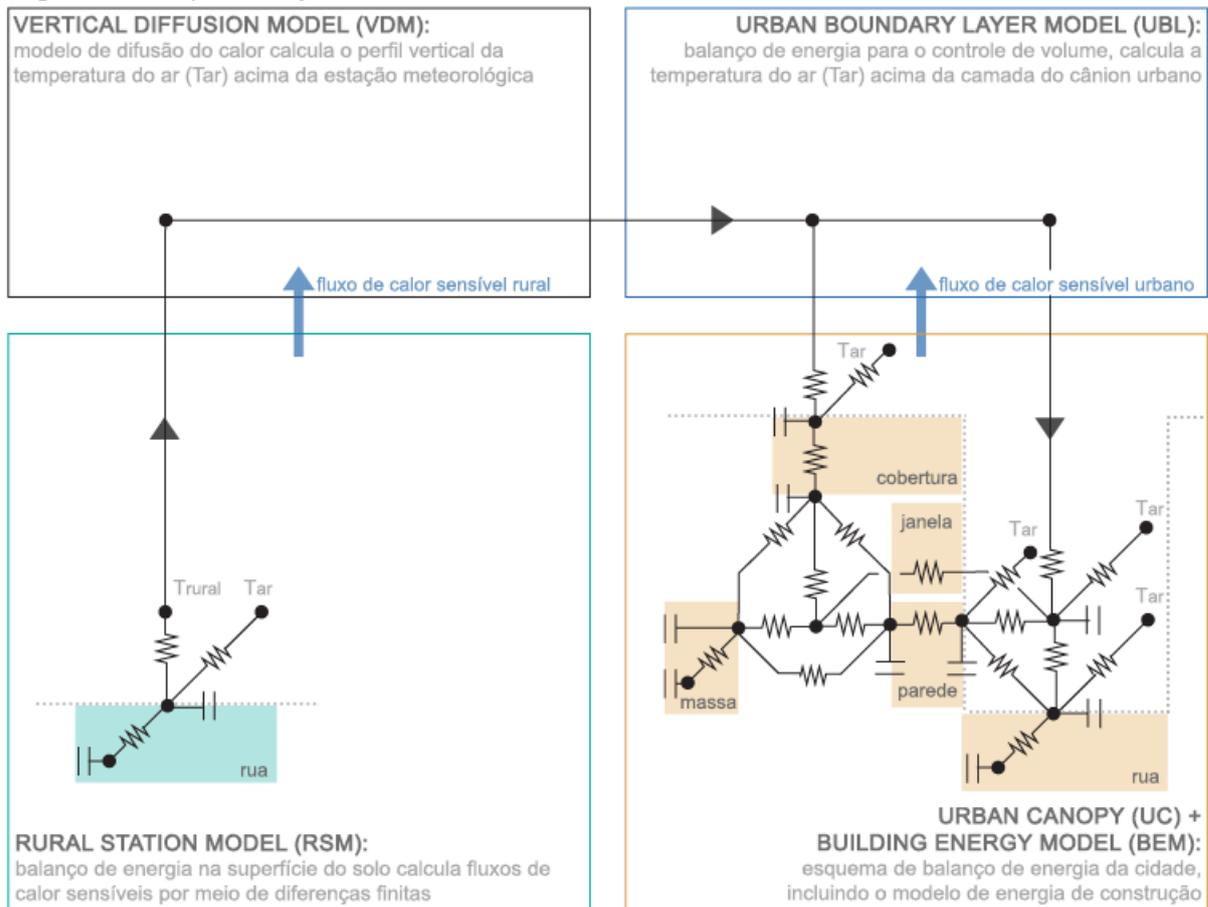
O UWG parte da premissa de que a ilha de calor é influenciada tanto pelo ambiente construído como pelas atividades antropogênicas, fatores determinantes para a definição da troca de calor no cânion urbano (EVOLA *et al.*, 2020). Assim, os cálculos de temperatura e umidade relativa do ar são estimados a partir da interação de um conjunto de parâmetros físicos e térmicos, que resultam na modificação dos dados climáticos rurais – medidos em campo aberto – com permanência do formato EPW.

A transformação do arquivo climático ocorre por meio do acoplamento entre quatro módulos: 1. Modelo de Estação Rural – *Rural Station Model* (RSM); 2. Modelo de Difusão Vertical – *Vertical Diffusion Model* (VDM); 3. Camada de Limite Urbano – *Urban Boundary Layer* (UBL); e, 4. Modelo de Cânion Urbano – *Urban Canopy Model* (UCM). No primeiro deles, há a leitura horária das medições em local de caráter rural e cálculo de difusão dos fluxos de calor sensíveis, definindo o armazenamento e liberação de calor do solo. Com esses valores estimados pelo RSM e uma nova leitura da temperatura e velocidade do ar, o VDM calcula os perfis verticais da temperatura do ar, na camada atmosférica acima da estação, também por meio da equação de difusão de calor (BUENO *et al.*, 2013).

Estes dados são fornecidos ao modelo seguinte (UBL), que calcula o perfil vertical de temperatura do ar na camada acima do cânion urbano, considerando os fluxos de calor sensível tanto do UCM como de RSM. Dessa maneira, o modelo UBL é fundamentado no balanço energético de um volume selecionado dentro da camada limite urbana. Já na camada imediatamente inferior à UBL, há o UCM associado ao modelo de energia de edificações (*Building Energy Model* – BEM), que definem a temperatura e umidade do ar a partir dos dados de radiação e precipitação; e, umidade e velocidade do ar pela medição da estação meteorológica, além da temperatura do ar calculada pelo UBL (BUENO *et al.*, 2013; BUENO *et al.*, 2014).

Na Figura 11 é exemplificada a conexão entre os modelos citados e os fluxos de calor e energia que ocorrem entre eles. Além disso, o UCM-BEM apresenta a correlação entre os ambientes internos e externos, baseado no esquema de torre de balanço energético (*Town Energy Balance – TEB*). Criado por Masson *et al.* em 2000 (apud BUENO *et al.*, 2012), esse esquema é baseado na estrutura de um dossel urbano, representando os efeitos fluido e termodinâmico que ocorrem na atmosfera de uma área urbanizada.

Figura 11 – Representação dos modelos



Fonte: adaptado de Massachusetts Institute of Technology (2014).

Dessa maneira, o UWG foi desenvolvido a partir da associação entre o esquema de balanço de energia em áreas urbanas com a modelagem energética de edificações, visando a compreensão dos efeitos do ambiente construído sobre clima urbano e, além do aprimoramento dos dados climáticos, contribuir para a estimativa do consumo de energia de edifícios urbanos (BUENO *et al.*, 2012). Isso permite que as regulamentações urbanas sejam verificadas em suas variações de densidade, vegetação, uso do solo, intensidade de tráfego, juntamente às implicações

energéticas e térmicas proveniente de intervenções construtivas (MASSACHUSETTS INSTITUTE OF TECHNOLOGY, 2014).

Nesse sentido, a ferramenta UWG demonstrou-se compatível com o objetivo principal do presente estudo, sendo manuseada na versão 5.0 (março de 2020) pertencente ao *Dragonfly Legacy 0.0.03*. Integrante das ferramentas *Ladybug*, este componente foi criado com a finalidade de permitir a modelagem e estimativa de fenômenos climáticos em grandes escalas, como as ilhas de calor urbana (LADYBUG TOOLS, 2021b). Nele é possível encontrar conjuntos de dados meteorológicos (*National Climatic Data Center – NDCC*) e imagens térmicas de satélites LANDSAT, além de motores termodinâmicos tal qual o UWG, o CitySim e o Envi-met. A integração desses componentes permitiu que o estudo fosse desenvolvido em uma única plataforma e, assim como citado por Akkose, Akgul e Dino (2021), diferentemente das análises diárias oferecidas pelo *software* ENVI-met, o UWG possui a capacidade de gerar arquivos meteorológicos anuais, fundamentais para as simulações energéticas.

Definido o motor termodinâmico para a análise de fluxos de calor no âmbito externo, os parâmetros de entrada foram selecionados para caracterizar os cenários, tanto das edificações como da área urbana. Totalizando 34 entradas na versão utilizada, primeiramente eram inseridas as configurações de tipologia da construção, determinando o programa de necessidades, intervalo de anos das construções, pé direito, fração de calor pelo condicionamento artificial liberado da edificação; e, materiais de envoltória, com valores de fração da fachada ocupada por janelas, coeficiente de ganho de calor solar dos vidros e albedo da parede e cobertura.

As informações eram conectadas no componente de definição da cidade (*City*), juntamente à área total urbana e elementos verdes (grama e árvores). A geometria da área abrangia todos os lotes e ruas e o modelo utilizado para as árvores foi proposto por um dos criadores do *Grasshopper* para estudos de radiação solar (GITHUB, 2016).

Já na segunda parte, eram especificados: a zona climática segundo a ASHRAE e os parâmetros de tráfego, com o valor de calor antropogênico¹ (W/m²) e os padrões de variações horárias típicas diárias e dos finais de semana; vegetação, em dados de albedo, os meses de influência no balanço energético e calor latente das árvores e gramas; e, pavimento, pelo albedo, espessura (m), condutividade (W/m.K) e

capacidade de calor volumétrico ($J/m^3.K$). Esses parâmetros geométricos e térmicos das superfícies contribuem para a estimativa de radiação de ondas curtas absorvidas e longas refletidas (EVOLA *et al.*, 2020).

Quando se trata da pavimentação e áreas permeáveis, assim como o requisitado pela ferramenta, faz-se necessária a compreensão dos fluxos de calor, que podem ser divididos em sensível, calculado pelo coeficiente de transferência de calor convectivo; ou latente, referente à evapotranspiração da vegetação, calculado como fração de radiação de ondas curtas absorvidas, refletivo no cânion urbano como a compensação do calor sensível. O modelo assume que a radiação líquida é praticamente constante durante o dia, visto que as de ondas curtas e longas apresentam pequenas variações e, à noite, a transpiração das plantas é quase nula (BUENO *et al.*, 2012; BUENO *et al.*, 2014).

A saída de *City* (Cidade) foi transferida para o último componente – o *RunUWG* –, responsável pelo processo *morphing* do EPW rural para refletir as condições de um cânion urbano. Outros dados conectados no mesmo foram o arquivo climático a ser modificado e valores de camadas limites em *Boundary Layer*, divididos entre o período diurno e noturno para toda área urbana; altura de inversão, onde o perfil vertical de temperatura se encontra estável; e coeficientes de circulação e *exchange*. Por fim, houve a geração de um arquivo climático urbano, considerando o efeito de ilha de calor urbano, com valores horários prontos para ser inserido no processo de simulação de desempenho de edificações. Esse novo arquivo refletiu as condições do ambiente urbano, oferecendo estimativas de consumo mais precisas para edificações situadas no centro da cidade (Figura 12).

Figura 12 – Esquema representativo do sistema do UWG



Fonte: a autora (2021).

Nakano (2015) demonstrou como o UWG poderia ser utilizado com outras ferramentas para uma análise integral, dentre eles, o *CCWorldWeatherGen*. Os arquivos climáticos

modificados no tópico anterior puderam, também, ser incorporados na simulação do UWG, de forma que fossem avaliadas as contribuições tanto das mudanças climáticas como da ilha de calor urbana. Assim, foram gerados arquivos individuais para cada cenário descrito no tópico 1.2.1, incorporando arquivos climáticos atuais (EPW INMET 2018) e futuros (projeções de 2050 e 2080), ao mesmo tempo em que houve a modificação manual dos parâmetros de entrada e suas conexões. Todos os valores requeridos nesse processo estão especificados no Apêndice B.

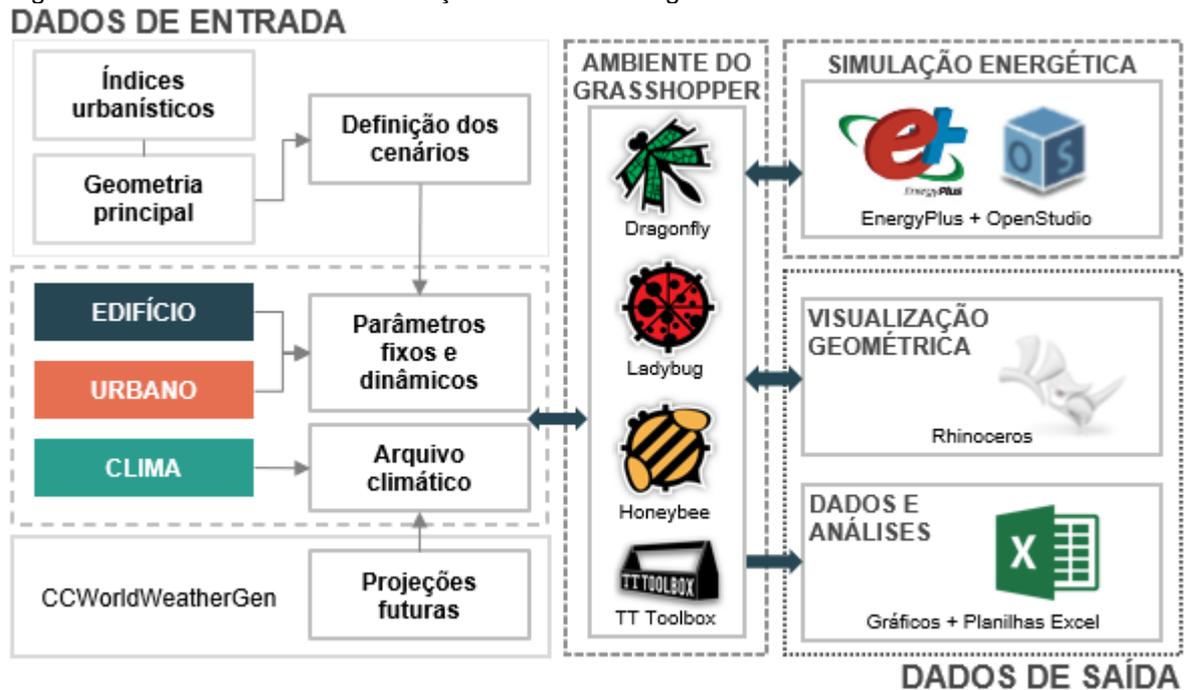
Por outro lado, antes do uso em simulações de desempenho, a leitura do EPW urbano apresentou as diferenças médias climáticas entre uma área rural e urbana, como para a temperatura de bulbo seco e umidade relativa. E, apesar de não ser uma ferramenta de análise fluidodinâmica, que computa dados específicos de variação dos fluxos de ar, foi possível verificar um acréscimo de velocidade mensal.

Machado (2019b) e Lima, Scalco e Lamberts (2019) explanam sobre a necessidade do procedimento de modelagem do clima antes da modelagem energética da edificação, o que promove mais precisão na verificação da porcentagem de horas em que a temperatura do ar está acima ou abaixo do intervalo de conforto térmico. Além disso, a análise dos dados climáticos permite identificar mudanças no intervalo de horas com conforto térmico externo e em quais conformações urbanas isso ocorre com maior ou menor intensidade, de forma que, associada aos resultados de desempenho interno, contribui para o desenvolvimento de estratégias integradas para as cidades.

3.2.3 Modelagem e simulação do modelo integrado

Definida a ordem de processamento dos cenários e a modificação dos respectivos arquivos climáticos, iniciou-se a modelagem energética com os algoritmos gráficos para o mecanismo de análise termoenergética. A Figura 13 apresenta o procedimento utilizado na interface selecionada para a simulação, descrevendo desde a caracterização da modelagem aos dados de saída.

Figura 13 – Procedimento de simulação do modelo integrado



Fonte: a autora, baseado em Natanian, Aleksandrowicz e Auer (2019).

Para a avaliação do desempenho térmico da envoltória de edificações residenciais por meio do método de simulação computacional, é recomendado o emprego de programas avaliados pela ASHRAE Standard 140-2004 com modelagem de 8.760 horas por ano, incluindo as variações horárias de ocupação, de cargas internas (iluminação, equipamentos) e de efeitos de inércia térmica em um conjunto de zonas térmicas (INSTITUTO NACIONAL DE METROLOGIA, QUALIDADE E TECNOLOGIA, 2012). Segundo a Emenda ABNT NBR 15.575-1:2013 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2021a), “o programa de simulação computacional deve ser capaz de simular o sombreamento proveniente de elementos externos às zonas térmicas, como brises, sacadas e entorno”.

Um dos programas consolidados entre arquitetos e engenheiros para a modelagem energética de edifícios (*Building Energy Model – BEM*) é o *software EnergyPlus*, utilizado na estimativa do consumo de energia para aquecimento, refrigeração, ventilação e iluminação (ENERGYPLUS, 2019). O programa permite a inserção de arquivos climáticos com dados horários de vários lugares do mundo, o que contribui para o estudo de edificações em locais específicos (ENERGYPLUS, 2019; INSTITUTO NACIONAL DE METROLOGIA, QUALIDADE E TECNOLOGIA, 2012).

Tendo isso em vista, a configuração do sistema na interface do *Grasshopper*, o componente *Honeybee*, acompanhado de funções específicas do *Ladybug*, permitiu

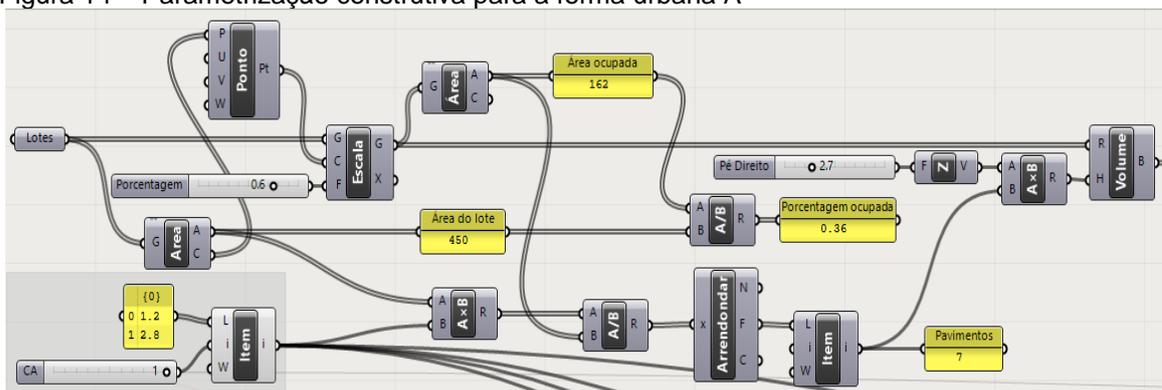
a criação da modelagem tridimensional a ser conectada aos motores de simulação. O processo de simulação energética foi realizado pelo componente *OpenStudio* – formado por ferramentas de suporte à modelagem de energia –, no qual os dados de entrada são exportados ao *EnergyPlus* para verificar as trocas de calor e eletricidade do edifício (GITHUB, 2021).

Os dados de entrada foram selecionados para os aspectos climático, urbano e edilício. No primeiro momento, o recorte territorial da cidade de Vitória foi utilizado tanto para aquisição do arquivo climático como para levantamento da ambiência urbana. Fundamentado em três diferentes formas urbanas, os cenários tiveram os lotes, quadras e vias modelados diretamente no *software Rhinoceros* como objetos de contexto.

Baseada em Girotti, Marins e Lara (2019), a modelagem dos edifícios foi realizada a partir da geometria de cada lote. A parametrização dos índices urbanísticos em cada superfície permitiu a construção da volumetria, atualizando automaticamente com a modificação no intervalo de valores (Figura 14). O parâmetro de taxa de ocupação foi aplicado por meio de uma proporção fixa de 40% e 60% do lote, configurando a base do edifício com uma porcentagem de ocupação final por área total de 36% e 16%, respectivamente.

As áreas ocupadas foram equivalentes à necessária para determinar o gabarito estipulado, ou seja, a porcentagem de ocupação final combinada com o coeficiente de aproveitamento (1,2 e 2,8) delimitaram as alturas das edificações, com tendência a uma altura média encontrada nos bairros e áreas mínimas por pavimento para o uso residencial. Já a quantidade de pavimentos foi delimitada pela inserção do valor para o pé direito de 2,7 m.

Figura 14 – Parametrização construtiva para a forma urbana A



Fonte: a autora, baseado em Girotti, Marins e Lara (2019).

A combinação de índices configurou as diferentes geometrias urbanas dos cenários. Em cada um, houve a definição dos parâmetros fixados no processo e outros que variaram durante a simulação individual dos cenários. Ao contrário da parametrização realizada automaticamente por componentes da interface, como o *Galápagos*, a modificação dos parâmetros foi realizada manualmente e, para viabilizar resultados satisfatórios em paralelo à otimização do tempo, seguiu-se a ordem estabelecida no item 3.2.1.

Após a parametrização homogênea das edificações, um deles foi selecionado para a análise energética principal. A primeira parte da caracterização da volumetria como um edifício de uso residencial foi a definição do zoneamento interno, sendo dividido pela quantidade de pavimentos com suas respectivas zonas perimetrais e de núcleo. Individualmente, as zonas foram especificadas pelo programa de necessidades – apartamento e corredor – e a presença de condicionamento de ar.

As janelas foram modeladas nas zonas perimetrais a partir da porcentagem de abertura, padronizada em 1 m de altura e 1,10 m de peitoril. Essas superfícies criadas estabeleceram as medidas dos dispositivos de sombreamento, inseridos na simulação como “objetos do contexto” por serem elementos externos ao edifício. O programa *EnergyPlus* pressupõe que o dispositivo de sombreamento não forma um bloqueio ao fluxo de ar para a ventilação natural e que a área envidraçada representa janelas fechadas para o cálculo de trocas térmicas de calor (SORGATO; LAMBERTS, 2011).

Em seguida, editou-se o fluxo de ar por ventilação natural nas janelas de correr, com metade da área total operável, e as temperaturas mínimas e máximas, tanto internas como externas, para determinar o fechamento das janelas e acionamento do sistema de resfriamento. Os valores acima e abaixo deste limite de temperaturas interna indicam, respectivamente, o ponto de ajuste do termostato de resfriamento (26°C) e aquecimento (16°C). Em paralelo, o sistema de aquecimento, ventilação e ar-condicionado (AVAC) – configurado como *Packaged Terminal Heat Pump* (PTHP) – foi desenvolvido com um conjunto de componentes *Ironbug*, que proporciona a modelagem completa do AVAC na categoria *split*.

Ainda nesse sentido, foram estipulados os padrões das zonas, que representam quando estão ocupadas ou a iluminação e equipamentos são utilizados durante os dias da semana. A rotina presumida do apartamento determinou a quantidade total de

carga térmica interna, distribuída entre equipamentos, iluminação e ocupação, além dos dados de infiltração por área de fachada e taxa mínima de ventilação do ar externo por pessoa.

Os componentes construtivos foram criados a partir da materialidade de cada camada, sendo empregados na especificação de parede, cobertura, laje e janela. Ademais, buscou-se a resolução de erros de adjacências entre eles. No Apêndice C é apresentado o processo geral de simulação, com as subseções necessárias para a caracterização do edifício e entorno urbano.

A partir do detalhamento físico da construção, o programa simula a transferência de ar, calor e umidade combinado ao cálculo de conforto térmico, lumínico e visual, além das cargas do sistema de climatização. Todo o processo se dá em etapas horárias para verificar a dinamicidade do sistema e com uma interface programável com outros tipos de análises (ENERGYPLUS, 2019). Para isso, o componente *OpenStudio* requisita, além das zonas configuradas e objetos do contexto, a inserção de direção norte, arquivo climático (EPW) e saídas de simulação.

A orientação e os arquivos climáticos foram determinados em função da ordem de processamento dos cenários. Em paralelo à configuração do edifício principal, a geometria do cenário urbano foi utilizada, primeiramente, na simulação do UWG, configurando os respectivos arquivos climáticos urbanos, e, depois, inserida na simulação energética. Já as saídas de simulação foram selecionadas em métricas de energia, em conformidade ao objetivo do trabalho.

Finalizada a estruturação do sistema, iniciou-se a simulação para um ano inteiro, sendo gerado um relatório com os resultados registrados em diferentes formatos. Para a leitura dos resultados, concentrou-se nos dados de resfriamento por área condicionada, por zona e total de energia. A transposição dos dados para o formato tabela do *Excel*® foi realizado pelo componente *TT Toolbox*, já o *Honeybee* possibilitou a representação em gráficos.

As planilhas foram sistematizadas de maneira que facilitasse a compreensão da relação mútua entre parâmetros e cenários urbanos. Ademais, como cada cenário abrangia diferentes configurações climáticas e espaciais, ampliavam-se as vertentes de pós-processamento e análise dos dados.

3.3 ANÁLISE DE DADOS

Visando estabelecer a compreensão das influências pontuais dos parâmetros urbanos na eficiência energética, a sistematização dos dados de saída permitiu identificar as variações dos resultados obtidos por meio do processo de modelagem de cenários. Além disso, devido às diversas variáveis presentes no estudo, as análises foram feitas para investigar as imprecisões dos métodos e materiais utilizados.

Na primeira parte, buscou-se a compreensão das variações climáticas ao longo dos cenários. As modificações dos arquivos climáticos permitiram averiguar os dados de temperatura de bulbo seco e umidade relativa em condições rurais e urbanas, tanto atuais como futuras. Dentre estas conformações, a intensidade de ilha de calor evidencia as áreas urbanas mais propensas ao estoque de calor durante o dia e, conseqüentemente, maior desconforto em ambientes externos e internos. O sistema, programado para regular a temperatura interna, estipula a necessidade de abertura das janelas ou condicionamento artificial nos ambientes residenciais, colaborando na determinação de dados de consumo energético para esse fim.

A comparação dos resultados de cada cenário urbano permitiu estabelecer também um processo evolutivo da alteração do desempenho energético. Isso foi identificado com a análise das simulações com edificação sem entorno e após a inclusão do contexto, onde novos parâmetros foram gradualmente configurados para as interações da ambiência urbana. Em sequência, os parâmetros analisados foram: i) orientação, pavimentação, vegetação e dispositivo de sombreamento; ii) projeções de 2050 e 2080 e TO 40%; iii) albedo na parede e cobertura, transmitância de parede externa, fator solar dos vidros, abertura nas fachadas e uso misto.

Com isso, a carga térmica por resfriamento da edificação tende a se alterar em menor ou maior impacto durante o ano. Aqueles cenários que apresentaram maiores reduções no consumo energético, definiram as características da configuração seguinte com a adição de um novo parâmetro. Assim, cada modificação foi analisada pelos diferentes níveis de influência, variando conforme as múltiplas combinações e diante do cenário como um todo.

Por se tratar de um edifício modelado em configurações de referência, espera-se que a eficiência energética seja em níveis mais altos. Antes do comparativo entre cenários, os resultados das simulações foram verificados individualmente sobre a consonância

com a médias recomendadas de cargas térmicas anuais para resfriamento em avaliações do desempenho da envoltória. O Centro Brasileiro de Eficiência Energética em Edificações (2018) propõe, para edifícios classificados em A para a cidade de Vitória, valores de 12,54 kWh/(m².ano) no dormitório e 69,13 kWh/(m².ano) na sala. De modo geral, o intervalo de valores para classificação dos níveis de eficiência energética de envoltórias das edificações é apresentado no Tabela 6.

Tabela 6 – Níveis de eficiência energética para a cidade de Vitória (ES)

Eficiência	CR (kWh/m².ano)
A	CR ≤ 35,126
B	35,126 < CR ≤ 53,578
C	53,578 < CR ≤ 75,241
D	75,241 < CR ≤ 92,938
E	92,938 < CR

Fonte: a autora, adaptado de Programa Nacional de Conservação de Energia Elétrica (2013).

Cabe ressaltar que, embora o método de simulação aplicado na pesquisa não se assemelhe integralmente aos prescritos no regulamento brasileiro, utilizou-se os valores de referência como um indicativo de modelagem e simulação em conformidade a um edifício de uso residencial.

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

A análise da influência da ilha de calor no desempenho energético da edificação em diferentes cenários urbanos, almejada no estudo, foi realizada por meio de simulações computacionais, cujos resultados serão apresentados neste capítulo. Vale ressaltar que a métrica utilizada foi o consumo energético por resfriamento, visto que o clima considerado é o tropical úmido e não há a consideração de aquecimento na região. Por se tratar da correlação entre fatores externos e internos, os resultados foram baseados na análise comparativa entre cenários, divididos em dois principais tópicos: primeiro, os dados do microclima para as características rurais e urbanas; e segundo, o consumo energético da edificação principal e suas variáveis de acordo com os parâmetros aplicados.

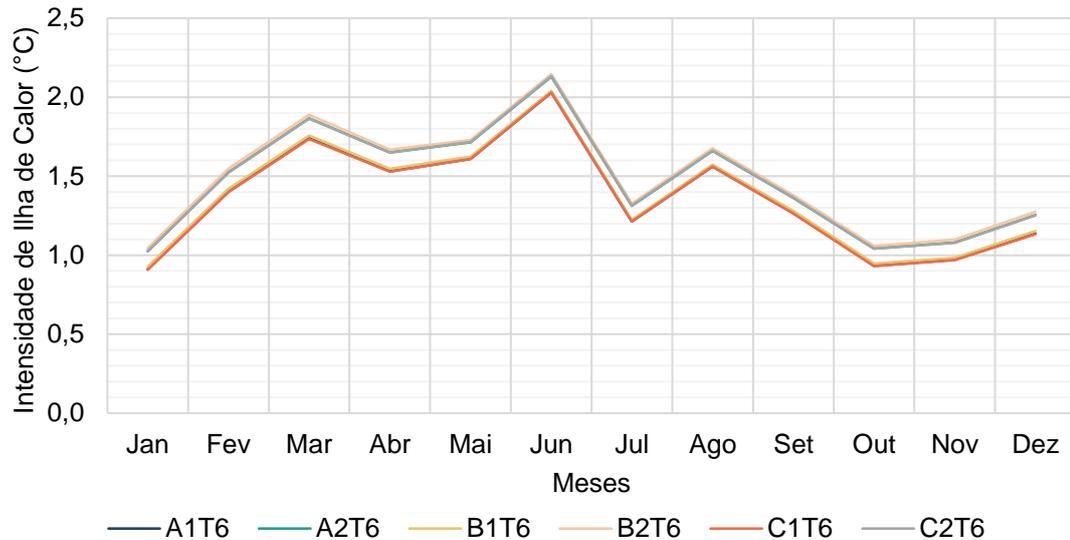
4.1 EFEITO DE ILHA DE CALOR

A ferramenta *Urban Weather Generator* permitiu modificar o arquivo climático original de medição em áreas com características rurais para a consideração do efeito de ilha de calor encontrado no contexto urbano. De modo geral, os novos arquivos apresentaram variações de temperatura do bulbo seco e umidade relativa do ar em proporções diretamente relacionadas aos parâmetros inseridos nos diferentes cenários, afetando também o conforto térmico nos espaços externos.

4.1.1 Temperatura de bulbo seco

A temperatura de bulbo seco (TBS) externo refere-se à medição da temperatura do ar por um termômetro exposto ao ar exterior (AMERICAN SOCIETY OF HEATING, REFRIGERATING AND AIR-CONDITIONING ENGINEERS, 2004). Para avaliar a intensidade da ilha de calor urbana (ICU), foram comparadas as TBS externas estipuladas pelo arquivo de caráter rural e os arquivos modificados para cada cenário-base, composto pela geometria urbana de A, B e C com a inserção do pavimento. A média mensal de intensidade de temperatura é representada no Gráfico 4, no qual é possível perceber que a configuração urbana contribuiu de 0,91°C a 2,15°C.

Gráfico 4 – Intensidade de ICU mensal por cenário (°C)

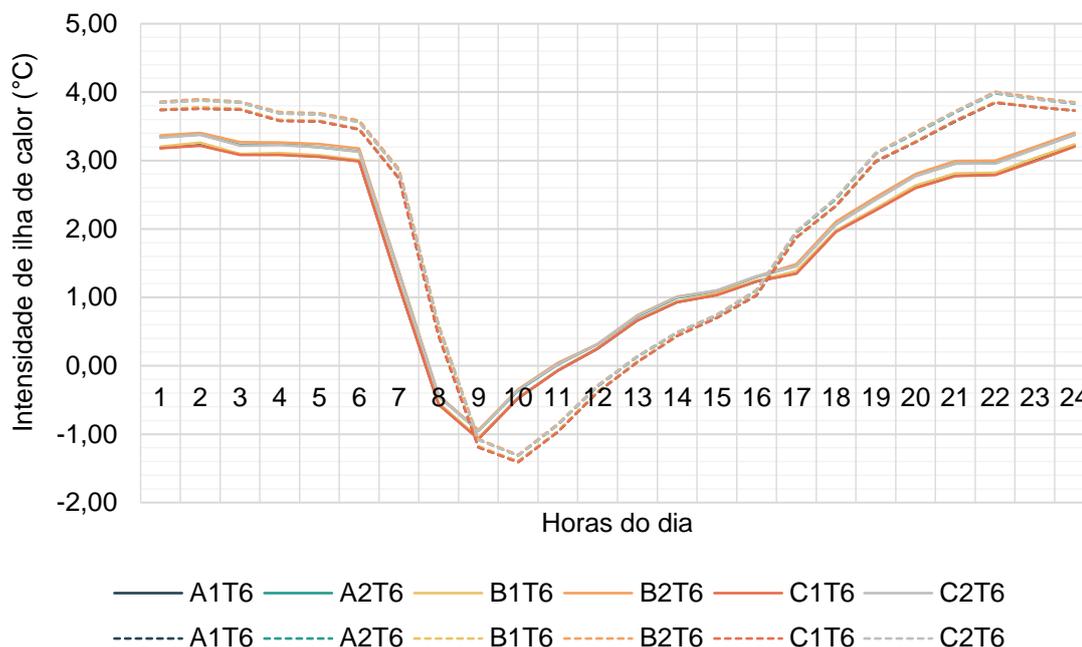


Fonte: a autora (2021).

Caracterizados pela dificuldade na dissipação de calor, permanecendo mais quentes durante o dia e período da noite, os cenários mais adensados de CA 2,8 apresentaram as maiores intensidades médias mensais de ICU – 2,13°C (A2T6), 2,15°C (B2T6) e 2,13°C (C2T6) – e as menores amplitudes térmicas. Mesmo pouco acentuadas, as diferenças de intensidade foram maiores nos cenários de baixo coeficiente de aproveitamento, com variação entre a mínima e a máxima de até 1,12°C em C1T6. Ao comparar as formas urbanas, os cenários A e C obtiveram dados relativamente próximos, ficando os maiores valores de intensidades a cargo do cenário B.

A diferença entre a intensidade mínima e máxima dos meses foi na média de 1,10°C, com o mês de janeiro com a menor amplitude e os meses de março e junho exibindo os maiores incrementos térmicos. Para compreender a variação de temperatura nestes meses, a análise da média horária mensal permitiu identificar o perfil de temperatura durante um dia típico de cada mês (Apêndice D). Verificou-se um aumento em pequenas intensidades durante o dia e os maiores valores no período noturno, além de uma redução relativamente abrupta às 9h (Gráfico 5). As maiores intensidades ocorreram no período das 19h às 7h, variando, neste intervalo horário, de 2,47°C a 3,41°C em março e 3,11°C a 4,01°C em junho (B2T6).

Gráfico 5 – Intensidade de UCI nos meses de março (linha contínua) e junho (linha pontilhada) por cenário



Fonte: a autora (2021).

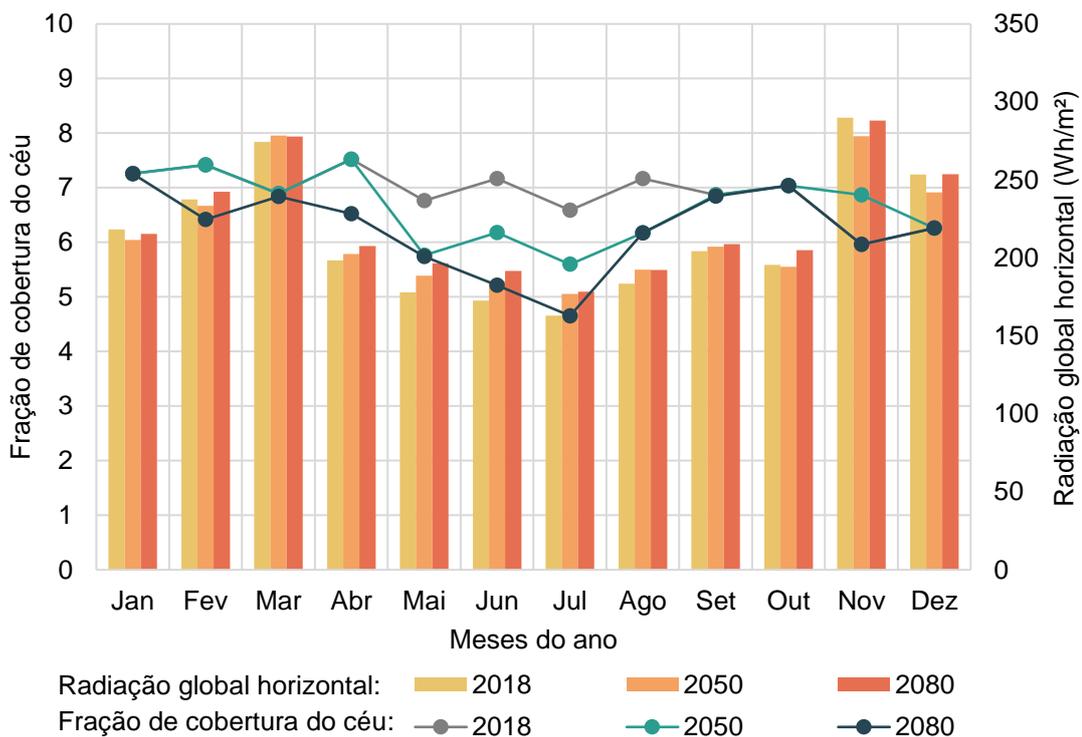
Observando as variações horárias do mês inteiro, foi possível encontrar diferenças ainda maiores. No mês de março, a máxima intensidade foi de 4,60°C em B2T6 e, considerando o mesmo cenário em junho, a intensidade chega a 6,80°C. De maneira oposta, no período de 8h às 14h, pode ocorrer uma intensidade negativa de até 2°C em março e 2,8°C em junho, estando relacionada à capacidade do sistema urbano em dissipar o calor. Quando se trata da amplitude de intensidade diária, em março pode chegar à 6°C e, em junho, à 9,10°C. A diferença de temperatura variou de acordo com o cenário e o dia do mês, destacando-se as intensidades maiores sucederem no início de março ou no meio de junho.

A intensidade de calor pode ser ainda maior no decorrer dos anos, visto que a tendência é de temperaturas cada vez mais elevadas nos centros urbanos. Esse aumento ocorreu em praticamente todos os cenários com a média de 1,20°C em 2050 e 1,30°C em 2080. Corroborando com os resultados das projeções de Nakano *et al.* (2015), o cenário B2T6 manteve-se com a maior intensidade média mensal de 2,31°C e 2,43°C, nos respectivos anos futuros. Já os cenários com menor coeficiente, devido às superfícies mais expostas, tendem a apresentar uma maior amplitude térmica.

No entanto, ao analisar o perfil de temperatura em cenários futuros a partir da média mensal, foi observado um efeito atípico no mês de março, no qual a variação foi

negativa nos anos futuros. Esse comportamento pode ser explicado pela fração de cobertura do céu, que indica a proporção de nuvens em valores de 1 a 10, representando-o com poucas nuvens à totalmente coberto, respectivamente. Os arquivos climáticos originais dos anos 2018, 2050 e 2080 demonstraram alterações nesses dados, indicando a redução da cobertura concomitante ao aumento da radiação global horizontal em anos futuros, com menor ou maior grandeza dentre os meses (Gráfico 6).

Gráfico 6 – Fração de cobertura do céu em 2018, 2050 e 2080.



Fonte: a autora (2021).

No mês de março, houve uma relativa estabilidade de fração de cobertura do céu, permanecendo com valor próximo à 6,8 no decorrer dos anos, e uma pequena alteração de 0,56Wh/m² na radiação global horizontal. Sendo uma das maiores frações médias no ano, os dias nublados indicam a maior evapotranspiração que diminui a troca de radiação, ficando a intensidade de ilha de calor vinculada primordialmente à alta temperatura típica do período de verão em cenário futuro. Com isso, a variação da amplitude térmica do mês supracitado foi positiva em até 4,15% de 2018 a 2050 (B2T6) e negativa em até 1,29% de 2050 a 2080 (A1T6).

Ainda conferindo o mesmo mês, os cenários com CA 2,8 permaneceram com as maiores intensidades. Os valores máximos ocorreram no cenário B2T6 com 1,89°C

em 2018 e chegou a 1,98°C em 2050. Em contrapartida, os de CA 1,2 cresceram pouco até 2050 e reduziram em maiores proporções de 2050 a 2080. Como exemplo, o C1T6 apresentou a menor intensidade de 1,76°C em 2018 e, o B1T6, a máxima de 1,80°C em 2080. Desse modo, foi possível perceber que a máxima dos cenários CA 1,2 ainda foi menor que a mínima de CA 2,8 e a forma urbana B exibiu os maiores valores em ambos os coeficientes (Tabela 7).

Tabela 7 – Intensidade de ilha de calor nos diferentes cenários para o mês de março

CENÁRIOS	MARÇO			Variação em %	
	2018	2050	2080	2018-2050	2050-2080
A1T6	1,759	1,803	1,780	+2,440	-1,292
A2T6	1,872	1,945	1,929	+3,753	-0,829
B1T6	1,774	1,824	1,803	+2,741	-1,165
B2T6	1,896	1,978	1,966	+4,146	-0,610
C1T6	1,756	1,796	1,774	+2,227	-1,240
C2T6	1,872	1,937	1,922	+3,356	-0,780

Fonte: a autora (2021).

No mês de junho foi possível notar um efeito inverso, em que houve a diminuição da média de cobertura total de nuvens no céu. A redução da nebulosidade e, conseqüentemente, menos evapotranspiração e umidade, contribuiu para o aumento da radiação solar na área urbana (JIA *et al.*, 2019). Assim, mesmo que o crescimento tenha sido menor em comparação à 2050, a variação de intensidade de ICU continuou positiva em 2080 (4,93%). O cenário B2T6, de maior intensidade, apresentou variação de 2,15°C em 2018, 2,31°C em 2050 e 2,43°C em 2080 (Tabela 8).

Tabela 8 – Intensidade de ilha de calor nos diferentes cenários para o mês de junho

CENÁRIOS	JUNHO			Variação em %	
	2018	2050	2080	2018-2050	2050-2080
A1T6	2,048	2,186	2,292	+6,313	+4,625
A2T6	2,140	2,289	2,404	+6,509	+4,784
B1T6	2,055	2,204	2,309	+6,760	+4,547
B2T6	2,154	2,314	2,434	+6,914	+4,930
C1T6	2,047	2,183	2,288	+6,230	+4,589
C2T6	2,144	2,289	2,404	+6,335	+4,784

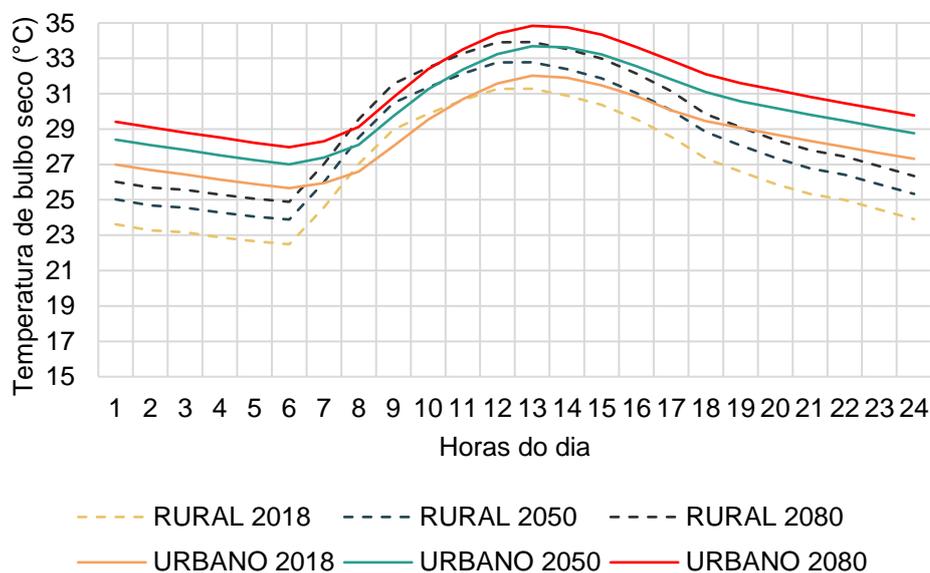
Fonte: a autora (2021).

Os resultados de intensidade mensal média, tanto de março como de junho, demonstraram que, apesar da expectativa no aumento da temperatura ao longo dos cenários futuros, a intensidade pode não seguir a mesma proporção. Portanto, sugere-se que as altas temperaturas em 2080 compense o efeito de ilha de calor, tornando os dias inteiramente mais quentes.

Ao analisar o perfil de temperatura horária, foi observado que a inclusão do efeito de ilha de calor pode mudar substancialmente no período noturno. Ademais, em cenários futuros, houve menor quantidade de valores negativos de intensidade, ocorrendo no máximo até às 13h, um horário anterior ao que ocorre em 2018. Essa redução de período com baixa intensidade térmica denota mais tempo diário de temperaturas elevadas, influenciadas pelo efeito mencionado.

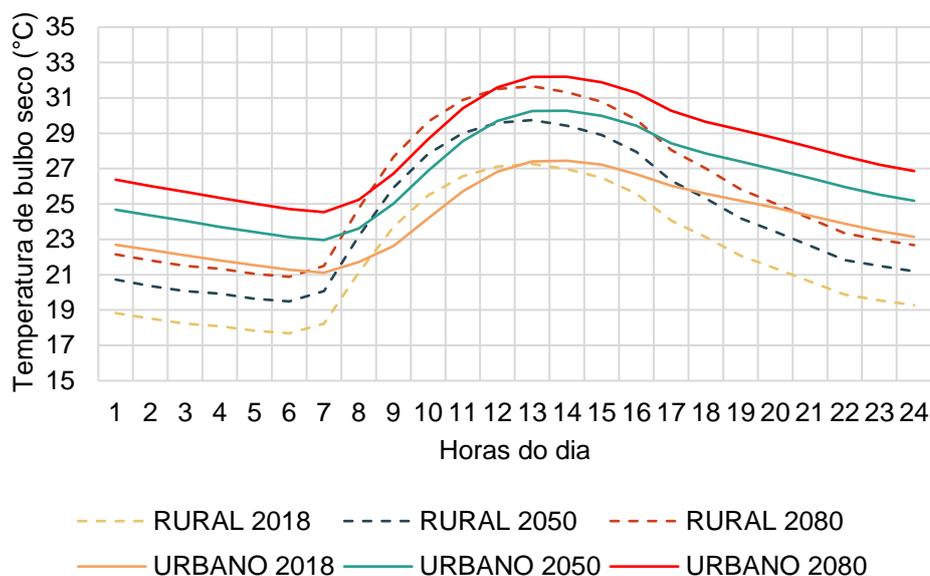
Tomando como base o cenário de maior intensidade, as variações de temperatura de bulbo seco são demonstradas nos Gráficos 7 e 8 em médias horárias para o mês de março e junho, tanto em cenários atuais – rurais e urbanos – como em anos futuros. Em março, a temperatura máxima foi de 32,02°C, 33,69°C e 34,84°C, respectivamente aos anos 2018, 2050 e 2080 e, nessa mesma ordem, alcançaram os valores de 27,45°C, 30,27°C e 32,19°C em junho. Embora esses dados se encontrem principalmente entre às 13h e 14h, foi observado que as maiores diferenças de temperaturas ocorreram no período noturno.

Gráfico 7 – Temperatura média horária em março no cenário B2T6 em 2018, 2050 e 2080



Fonte: a autora (2021).

Gráfico 8 – Temperatura média horária em junho no cenário B2T6 em 2018, 2050 e 2080

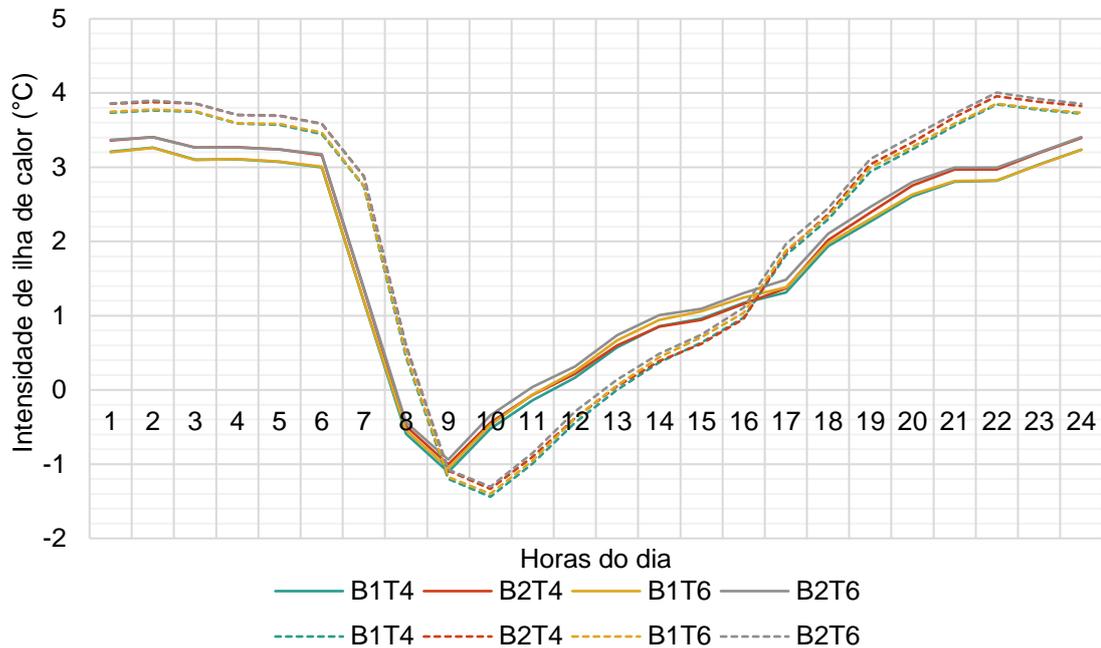


Fonte: a autora (2021).

As intensidades noturnas para um dia típico em cenários futuros variaram em torno de 3,40°C para março em cada ano e um aumento de 4°C a 4,35°C em junho, de 2018 a 2080. Já em projeções futuras, a intensidade de março permaneceu similar, aumentando apenas 0,1°C em 2080, enquanto o mês de junho apresentou um aumento acumulativo de 0,4°C em 2050 e 0,3°C em 2080. Com isso, percebe-se que junho obteve os maiores incrementos de temperatura com o efeito ICU e mudanças climáticas, reduzindo a diferença de temperatura diária, porém, não o enquadra como mês quente assim como março.

Sob outra perspectiva, além de cenários futuros, outros fatores podem colaborar na modificação dos dados de temperatura, como os índices construtivos e a materialidade urbana. Com a finalidade de verificar as variações de intensidade com novos parâmetros, os cenários tiveram a taxa de ocupação reduzida de T6 para T4. A análise principal permaneceu sobre o cenário B, no qual o coeficiente de 2,8 continuou apresentando dados superiores em relação à 1,2 (Gráfico 9).

Gráfico 9 – Intensidade nos meses de março (linha contínua) e junho (linha pontilhada) por cenário T4 e T6



Fonte: a autora (2021).

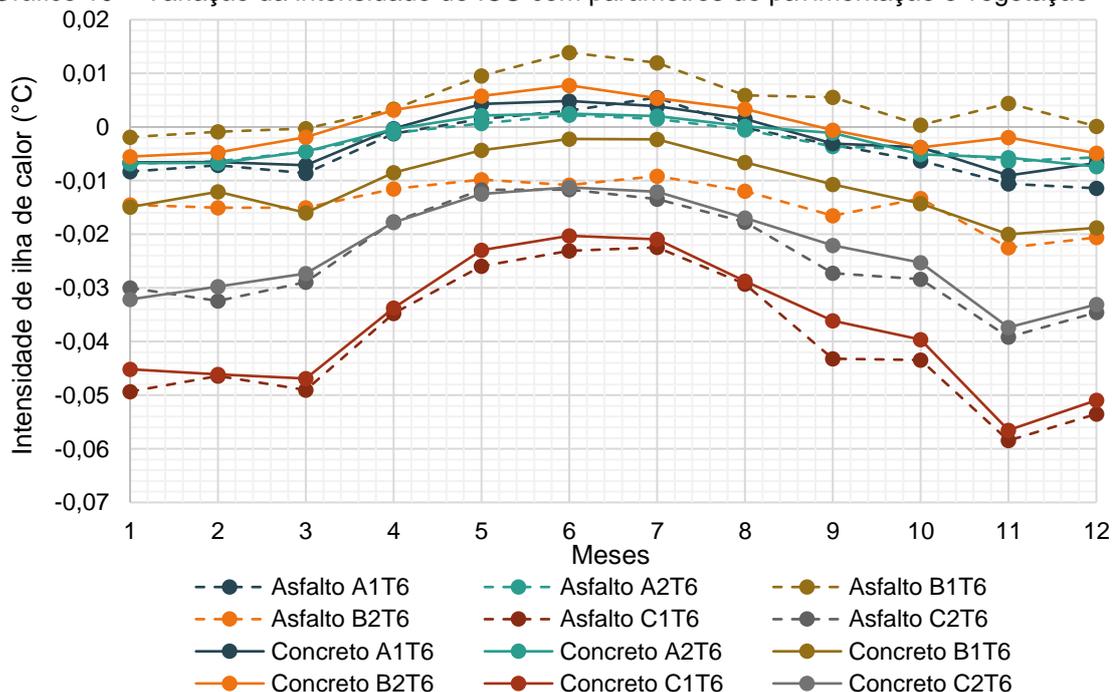
Embora a intensidade seja similar no decorrer do dia com a posição de maior temperatura no cenário B2T6 e de menor em B1T4, os outros cenários apresentaram uma inversão de posição das 11h às 18h. Nesse intervalo de tempo, B2T4 obteve menor intensidade que B1T6 e se aproximou novamente dos dados de B2T6 no período noturno, de maior intensidade geral para os cenários de CA 2,8. Isso pode ser explicado pela dificuldade do cenário B2T4 em dissipar o calor retido gradualmente durante o dia, de maneira oposta à B1T6, favorecido pelos espaços abertos entre as edificações.

Para identificar a contribuição de cada parâmetro, foi feita uma comparação das variações de cenários, relacionando as taxas de ocupação e coeficientes de aproveitamento dentro da forma urbana B, obtendo as maiores diferenças de intensidade entre B1 e B2 e as menores entre T6 e T4. A variação da intensidade pode chegar à 0,20°C horário no comparativo de cenários de diferentes índices urbanísticos, sendo verificada a menor diferença de 0,10°C entre os de CA 1,2. Além disso, em relação à amplitude térmica, T6 apresentou a intensidade mínima e máxima superior à de T4, confirmando uma configuração que favorece horas mais quentes no dia. Essas variabilidades evidenciaram que as maiores proporções de cânion urbano, assim como a maior taxa de ocupação do solo, podem intensificar a ilha de calor.

Alguns parâmetros demonstraram pouca sensibilidade na análise à mesoescala, como o tipo de pavimento. No primeiro momento, o asfalto foi modificado para o concreto, acarretando em uma diminuição de $0,01^{\circ}\text{C}$, de pouca alteração na média mensal. Em todos os cenários T6 foram testadas combinações dos dois pavimentos (asfalto ou concreto) com a adição de vegetação (grama e árvores), visando analisar a intensidade de calor para cada interação. De modo geral, a associação de pavimento asfalto com vegetação demonstrou maiores reduções de temperatura média mensal ($-0,059^{\circ}\text{C}$ a $0,006^{\circ}\text{C}$) quando comparado ao concreto com vegetação ($-0,057^{\circ}\text{C}$ a $0,014^{\circ}\text{C}$).

Apesar da interferência do pavimento na temperatura ser baixa em relação aos outros parâmetros, os cenários B apresentaram a maior variação com a mudança do material enquanto os outros permaneceram com valores aproximados. Os cenários A1 e A2 apresentaram as menores variações de intensidades para ambas combinações; ao contrário de B1, o B2 obteve maior redução com a inclusão do asfalto junto à vegetação; e, dentre todos os cenários, os C1 e C2 tiveram as maiores reduções de intensidade, variando pouco entre as combinações (Gráfico 10). Isso evidenciou a importância da forma urbana na acentuação ou anulação dos benefícios da inclusão de porcentagem de cobertura vegetal, tendo maior relevância ao suprir a necessidade de sombreamento no cenário caracterizado por espaços abertos.

Gráfico 10 – Variação da intensidade de ICU com parâmetros de pavimentação e vegetação

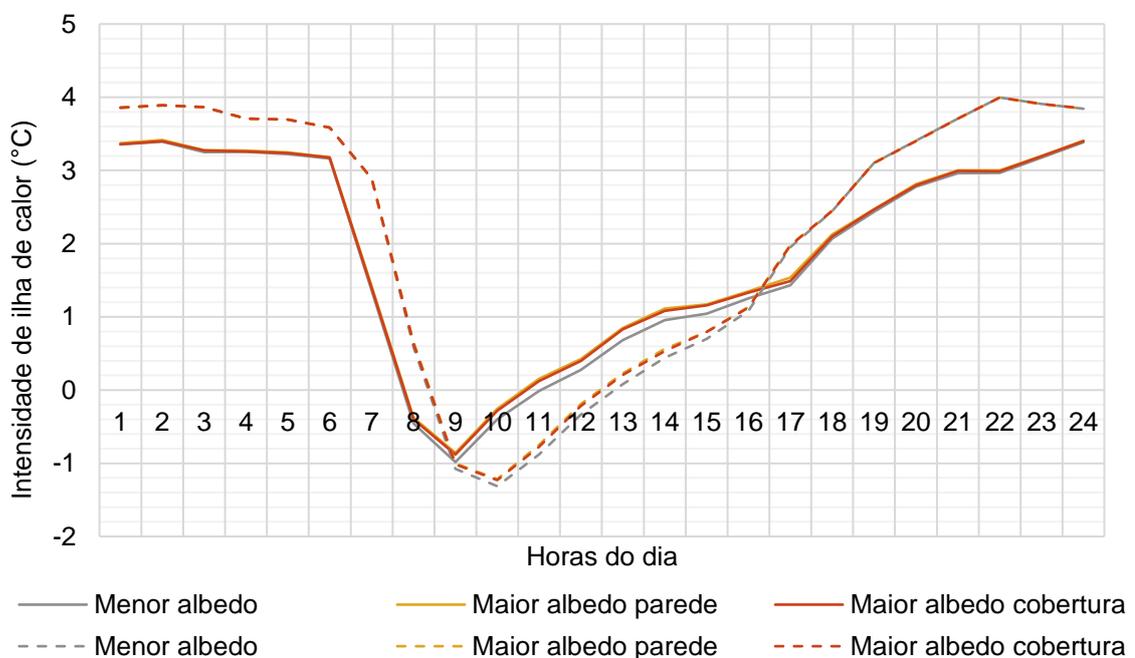


Fonte: a autora (2021).

Observou-se que a cobertura vegetal contribuiu em maiores proporções para a amenização da temperatura no período do verão, principalmente nos meses de novembro e dezembro e um efeito inverso entre março e setembro nos cenários A e B. As alterações na temperatura estão relacionadas, também, à porcentagem de vegetação em relação à área total aplicada em cada cenário: em A há 16% de grama 18% de árvores; em B, respectivamente, 17% e 15%; e, C apresenta a maior proporção de grama com 23% e a menor de árvores, 9%. Assim sendo, a extensão de área permeável com grama apresentou maior potencial de redução da temperatura de bulbo seco.

Do ponto de vista da modificação de albedo nas superfícies de paredes e coberturas, a variabilidade de temperatura ocorre durante todo o dia, ficando mais evidente no período diurno de 9h às 17h, em que atinge até 0,17°C de diferença entre a influência dos materiais de menor e maior albedo. No Gráfico 11 é exemplificada a intensidade encontrada no cenário B2T6 nos meses de março (linha contínua) e junho (linha tracejada).

Gráfico 11 – Intensidade nos meses de março (linha contínua) e junho (linha pontilhada) por albedo



Fonte: a autora (2021).

A materialidade de maior albedo, tanto na parede como na cobertura, contribuiu para a reflexão da radiação solar ao longo do dia, de modo que no período noturno não houvesse excesso de calor retido nas superfícies. De maneira oposta, os de menor

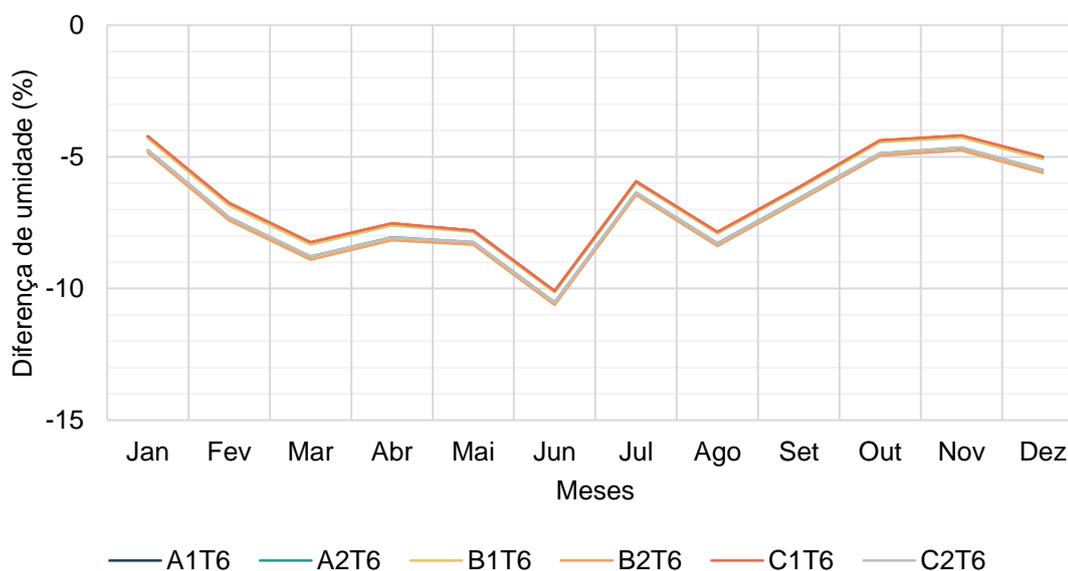
albedo absorveram a radiação e dissiparam o calor à noite, de forma que, neste intervalo, a intensidade de calor se equilibrava com ambos os materiais.

A intensidade de ICU encontrada foi na média horária de 4,60°C a 6,80°C no ano, sendo maior no mês da estação inverno do que no verão, corroborando com os estudos em território brasileiro citados por Palme (2021). Conforme observado nas análises, cada parâmetro teve uma contribuição específica na intensidade de ilha de calor, aumentando ou diminuindo os dados de temperatura do ar.

4.1.2 Umidade relativa do ar

A umidade relativa do ar (UR) é inversamente proporcional à temperatura de bulbo seco (TBS), ou seja, na medida em que a temperatura aumenta, a umidade tende a reduzir. Assim como em março e junho foram encontradas as maiores diferenças de temperatura de bulbo seco, nesses meses ocorreram uma redução significativa da umidade do ar nas áreas urbanas. No ano, o valor mínimo foi 4,19% em novembro, chegando à 10,62% em junho (Gráfico 12).

Gráfico 12 – Diferença de umidade durante o ano urbano

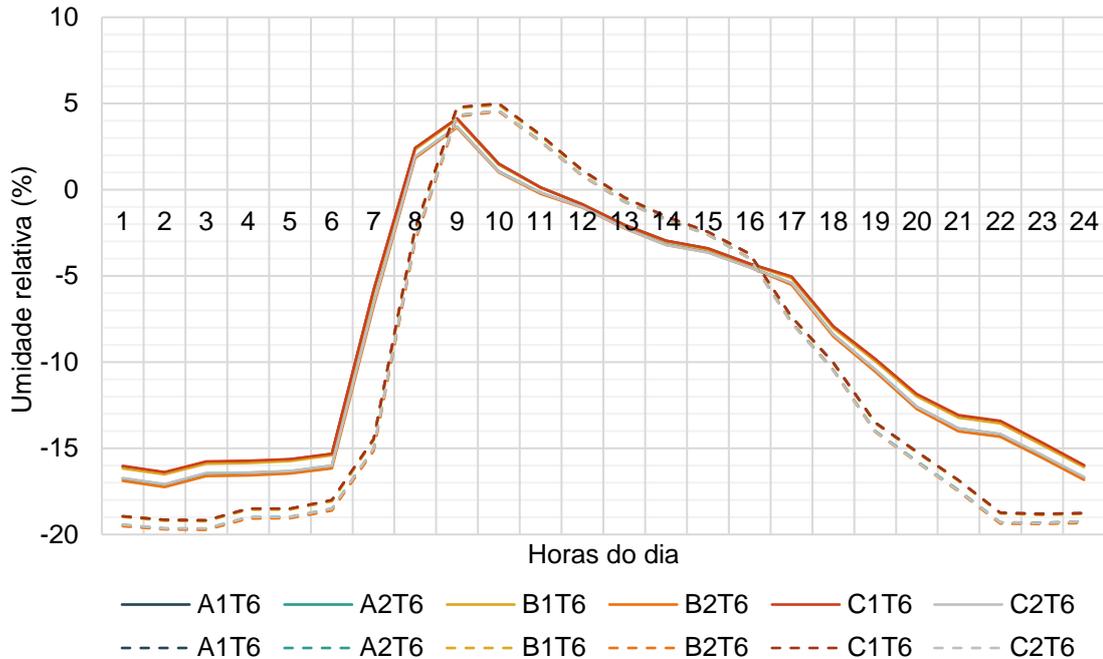


Fonte: a autora (2021).

A análise horária apresentou um perfil invertido ao da intensidade de ilha de calor, com a umidade relativa decrescendo em quase 20% no período noturno de junho e 17,25% de redução no mês de março. Ao observar os valores mínimos e máximos, o mês referente à estação inverno apresentou a maior alternância diária e quantidade

de horas com ganhos de quase 5% na umidade. Os perfis dos meses supracitados estão representados no Gráfico 13, no qual é possível observar também que os cenários de CA 2,8 obtiveram reduções superiores aos de CA 1,2.

Gráfico 13 – Variação de umidade relativa nos meses de março (linha contínua) e junho (linha pontilhada) nos cenários



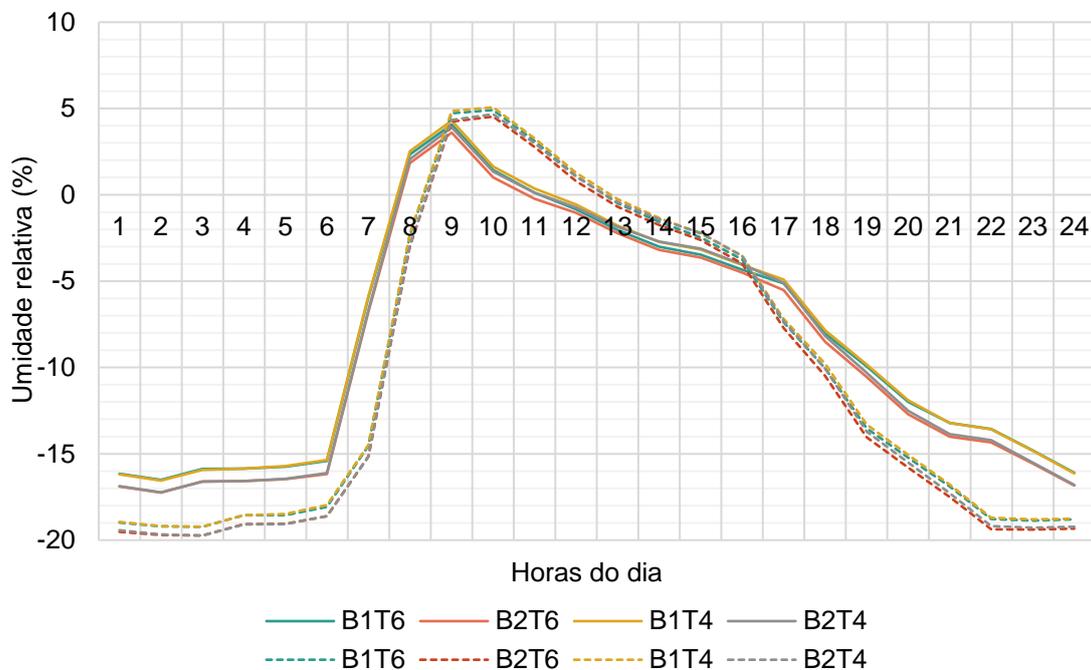
Fonte: a autora (2021).

A diferença de umidade a partir da mudança de coeficiente de aproveitamento entre os cenários variou de 0,15% a 0,84% em março e de 0,15% a 0,65% em junho. No comparativo entre as formas urbanas A, B e C, notou-se que de A para C a variação foi praticamente nula; de A para B chegou à 0,16% em março e 0,12% em junho; e de B para C, diferiu em até 0,18% em março e 0,13% em junho, sendo as maiores variações relacionadas ao cenário de CA 2,8. Deste modo, a umidade relativa variou em até 1%, dependendo do CA e forma urbana.

Ainda sobre os índices, a variabilidade pode aumentar ao modificar a taxa de ocupação de T6 para T4. Tomando como base o cenário de maiores reduções de umidade (B2), foi observado que, assim como na intensidade de temperatura, houve uma inversão de valores entre as taxas durante o período da tarde, no qual T4 apresentou reduções inferiores à T6, e se estabilizaram à noite como as maiores reduções (Gráfico 14). Isso ocorreu em função da correlação com os cânions de maiores proporções, que vão acumulando o calor e reduzindo a umidade ao longo do dia. Em março, a diferença entre as taxas chegou à 0,50% às 15h e a variação diária

em T4 foi quase 1% a mais que em T6, devido ao maior acréscimo de umidade proporcionado pelo cenário.

Gráfico 14 – Umidade relativa nos meses de março (linha contínua) e junho (linha pontilhada) por cenário T4 e T6



Fonte: a autora (2021).

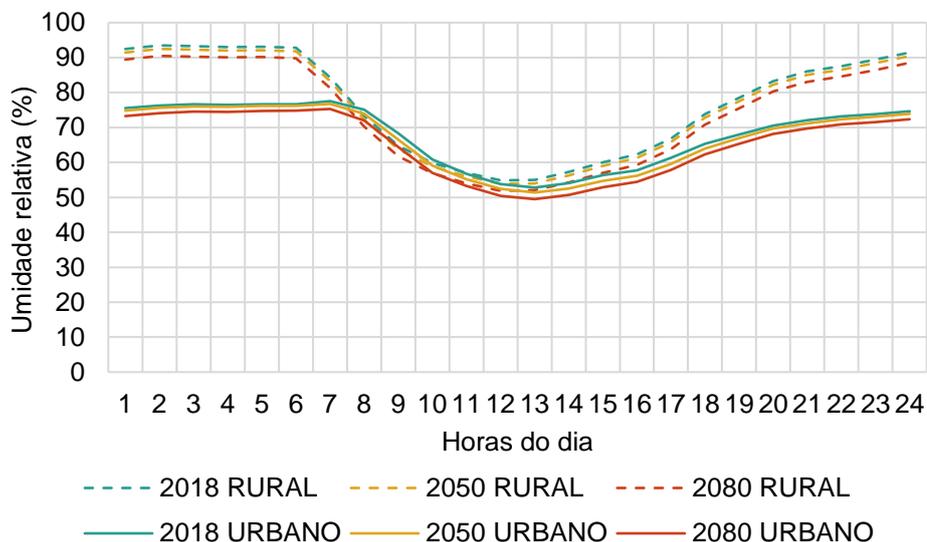
Desse mesmo modo, para exemplificar o perfil de umidade relativa em um dia típico, foram selecionados os dados do cenário B2T6. A temperatura, por incorporar o efeito de ilha de calor, indicou variações maiores ao longo do dia e a umidade relativa demonstrou amplitudes menores. Um ponto importante é que, mesmo com as maiores reduções ocorrendo no período noturno, elas não são suficientes para conduzir os valores totais de umidade à inferioridade das encontradas no período diurno. Ou seja, quando a temperatura de bulbo seco está alta, a umidade se encontra em seus valores mais baixos e com pouca amplitude.

Relacionando esses dados aos anos de 2050 e 2080, percebeu-se que ao longo do tempo a redução se acentua, ocorrendo em maiores proporções no mês de junho. No arquivo climático rural, a diminuição é gradual em março de 1% de 2018 a 2050 e 2% de 2050 a 2080 e, em junho, ela reduz nos respectivos intervalos de 3% para 2%. Desse modo, a umidade relativa foi de 76,82% em 2018 para 73,82% em 2080 de março e, de 78,47% para 73,44%, em junho.

Os Gráficos 15 e 16 mostram que a redução de umidade ao longo dos anos é ainda maior ao considerar a ilha de calor urbana. Com a modificação do arquivo para áreas

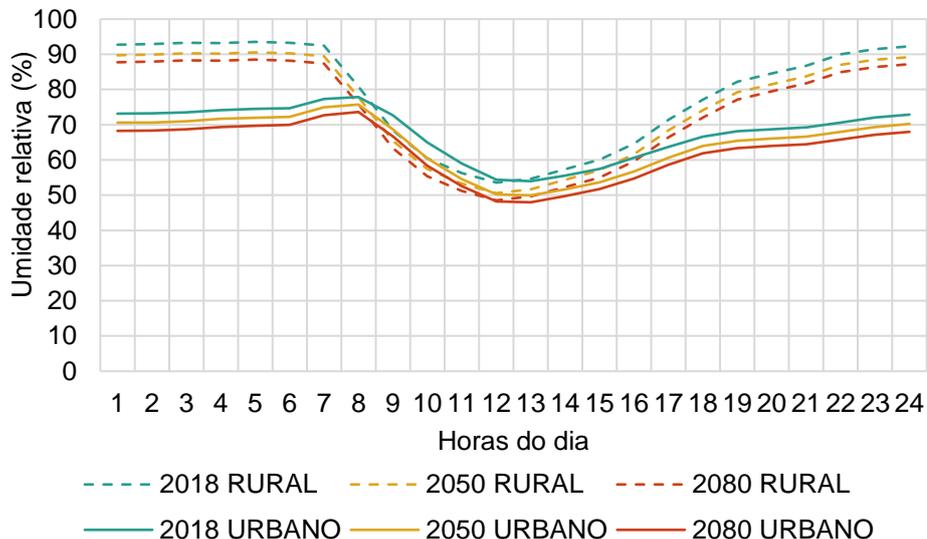
urbanas, a umidade diminuiu especialmente no intervalo das 18h às 7h, e atenuou a curva do perfil horário ao reduzi-la no período noturno, permanecendo mais baixa por mais tempo no dia em comparação ao cenário rural.

Gráfico 15 – Umidade relativa horária em março no cenário B2T6 em 2018, 2050 e 2080



Fonte: a autora (2021).

Gráfico 16 – Umidade relativa horária em junho no cenário B2T6 em 2018, 2050 e 2080



Fonte: a autora (2021).

Após a modificação para o arquivo urbano, contabilizou-se ainda a redução horária de umidade relativa em anos futuros. Essa redução de 2018 a 2050, foi de até 0,87% em março e 1,55% em junho e, de 2050 a 2080, de 0,58% e 2,37% nos respectivos meses. Ao contrário da média mensal, foi possível perceber que, enquanto a máxima redução em março diminuiu até 2080, junho manteve-se com valores em ascensão e uma tendência de reduzir em maior grandeza no horário mais cedo.

Ao analisar tanto a modificação do arquivo para o contexto urbano como para mudanças climáticas, percebeu-se que o primeiro oferecia uma redução importante ao inferir na caracterização diária de umidade, a ser ajustada pelos valores do segundo fenômeno climático. Diante disso, a máxima umidade relativa na média horária decaiu, em março, de 93,48% no cenário rural para 74,09% no cenário urbano de 2080. Para estes mesmos cenários, a redução em junho chegou à 24,60%, decrescendo de 93,26% à 68,67%.

Sabe-se que as constantes modificações no meio urbano suscitam no aumento da quantidade de superfícies secas e impermeáveis, influenciando no estoque de umidade local. Assim como na temperatura de bulbo seco, os parâmetros de pavimento, vegetação e albedo de coberturas e paredes contribuíram pouco para variação da umidade. Foi observado que a vegetação colaborou na redução durante o dia e o aumento no período da noite. Entretanto, mesmo estando relacionado à evapotranspiração, na mesoescala esse efeito foi captado em pequenas proporções, com variação de, no máximo, 0,16%. Já em relação ao albedo, o menor valor aplicado conferiu um aumento da umidade em até 0,13%.

Os resultados indicaram alterações gerais significativas de aumento da temperatura de bulbo seco e redução da umidade relativa. Ainda que a contribuição de alguns parâmetros seja mínima individualmente, a combinação dos elementos externos pode direcionar os dados finais à condição de conforto indesejada. Além disso, embora a metodologia utilizada não abranja análises fluidodinâmicas, a velocidade dos ventos também apresentou um acréscimo de valores, conforme indicado no Apêndice D.

Partindo das modificações indicadas, as condições climáticas determinaram novos níveis de conforto térmico externo em relação ao arquivo original, apresentadas no Apêndice E, e, mais que isso, influenciaram diretamente no consumo energético da edificação principal.

4.2 CONSUMO ENERGÉTICO POR RESFRIAMENTO

A modificação dos dados climáticos, junto a modelagem da área urbana, permitiu a consideração dos variados elementos do entorno à edificação na simulação do

desempenho do edifício, dentre eles, as saídas do consumo energético total e por área condicionada de acordo com os pavimentos, período e parâmetros externos e internos. Essa análise se estendeu ao comportamento do edifício urbano em cenários futuros, nos quais as variáveis do clima condicionadas à ilha de calor também sofreram alterações quando associadas às mudanças no clima.

4.2.1 Dados anuais

O principal índice utilizado neste estudo, para fins de comparação, foi o consumo energético anual (kWh) para resfriamento por metro quadrado (m²) de área útil condicionada, estando relacionada aos índices construtivos da edificação em análise e parâmetros urbanos.

4.2.1.1 Parâmetros

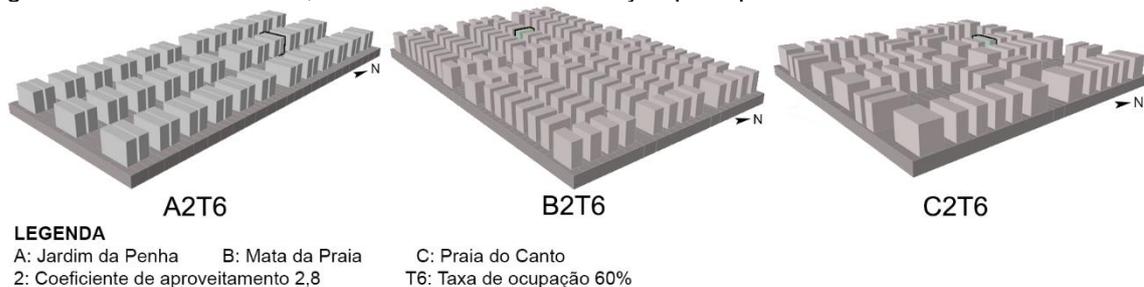
O processo de definição dos cenários envolveu a adição sequencial de parâmetros, partindo de um edifício isolado à inserção da volumetria do entorno e suas variáveis. Por se tratar de um entorno urbano, buscou-se, primeiramente, verificar o comportamento da edificação principal diante de um cenário com a maior taxa de ocupação (TO), ou seja, de 60% para cada lote. Foi adotada essa taxa para os coeficientes de aproveitamento (CA) mínimo e máximo selecionados de 1,2 e 2,8, respectivamente, que determinaram o volume construído dos primeiros cenários.

a) Orientação

Definidos os parâmetros construtivos, os cenários foram analisados em diferentes orientações – Norte, Sul, Leste e Oeste – com a padronização da pavimentação externa em asfalto. Para identificar a variação no consumo de acordo com o parâmetro de orientação, foram conferidas as diferenças entre elas, que chega a 2,23 kWh/m².ano em A2T6. No geral, ao analisar o consumo energético por área condicionada em cada orientação e cenário, as edificações com a fachada principal voltada para o sentido Oeste apresentaram o melhor desempenho.

A tendência de menor consumo para as fachadas Oeste pode ser explicada juntamente à menor variação encontrada nos cenários B2T6 (0,39 kWh/m².ano) e C2T6 (0,22 kWh/m².ano), que são caracterizados pelo maior coeficiente de aproveitamento e, assim, edificações mais altas. Isso está diretamente relacionado ao efeito de sombreamento nas maiores áreas de fachada do edifício, que contribui para a redução do consumo total por meio do bloqueio da radiação solar direta na maior parte do ano, principalmente nos apartamentos inferiores. Diferentemente desses cenários de maior CA, A2T6 apresentou a maior redução devido à não padronização dos afastamentos laterais, ou seja, uma das maiores fachadas está próxima à edificação vizinha enquanto a outra fica mais exposta à radiação, podendo a orientação definir nesse tempo de sombreamento (Figura 15).

Figura 15 – Cenários A2T6, B2T6 e C2T6 com edificação principal demarcada



Fonte: a autora (2021).

Ainda nesse sentido, a orientação contribuiu em maiores proporções nos cenários de menor CA – caracterizados por edificações mais baixas e menor proporção de cânion urbano –, como em A1T6 (2,09 kWh/m².ano) e B1T6 (1,36 kWh/m².ano), seguidos de C1T6 com 0,68 kWh/m².ano. Os cenários A1T6 e C1T6 beneficiaram-se com a fachada principal no sentido Leste-Oeste, estando as fachadas maiores protegidas pelas edificações paralelas, e, em contrapartida, no B1T6, o sentido principal foi à Norte-Sul, visto que tal cenário possui maior densidade (Figura 16).

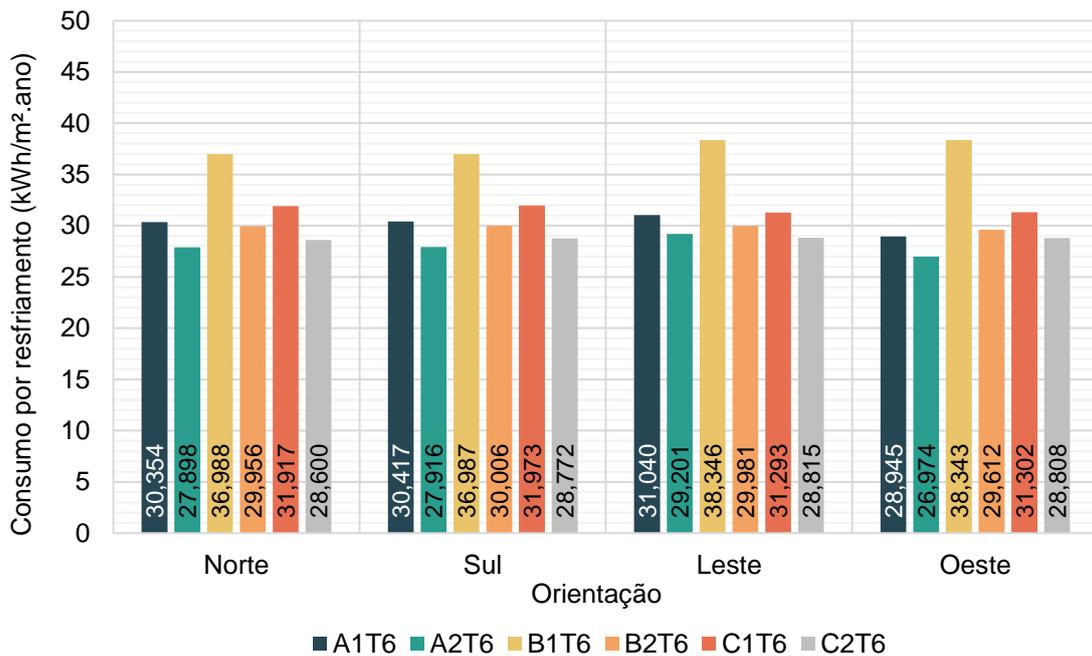
Figura 16 – Cenários A1T6, B1T6 e C1T6 com edificação principal demarcada



Fonte: a autora (2021).

De modo geral, a menor variação no consumo energético encontrada na forma urbana C, composta por espaçamento entre os volumes construídos, sugere a pouca proteção à radiação solar direta nas quatro fachadas. O Gráfico 17 apresenta os consumos nos cenários para cada orientação, dentre os quais a seleção do menor valor o intitula como um dos parâmetros do cenário-base, a ser classificado, posteriormente, pela pavimentação.

Gráfico 17 – Consumo de resfriamento (kWh/m².ano) por orientação



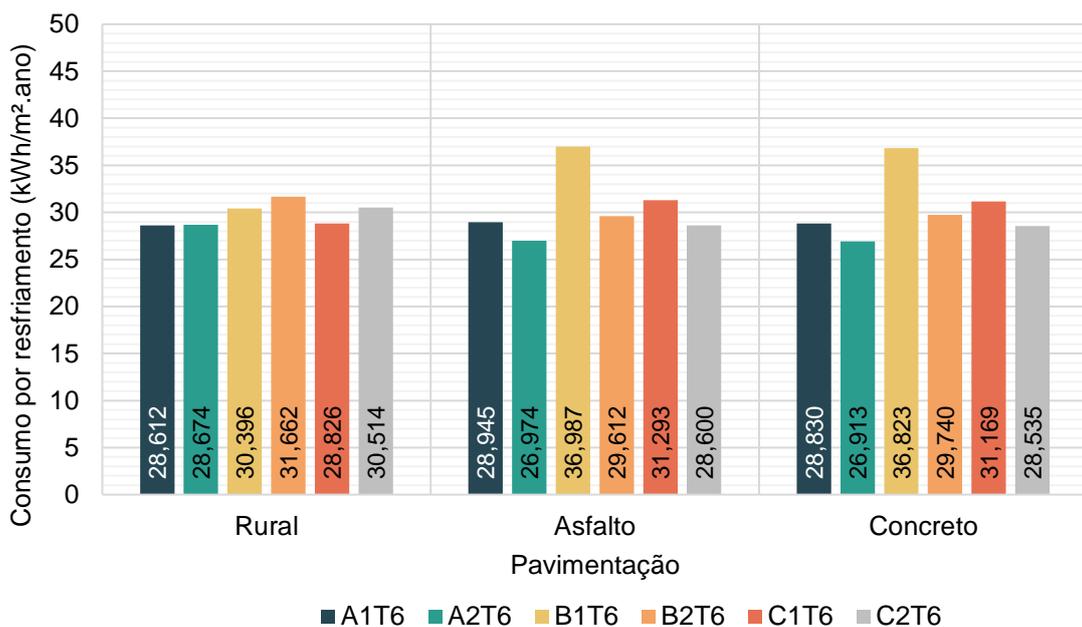
Fonte: a autora (2021).

A orientação possibilitou uma redução do consumo energético de 1,32% a 8,27%, destacando-se como um parâmetro influente ao ser escolhido junto às formas urbanas. Dentre elas, o cenário A obteve o melhor aproveitamento do sombreamento de edificações circundantes, assim como aqueles com menor coeficiente de aproveitamento.

b) Pavimentação

Depois de selecionada a orientação indicada para cada cenário, o pavimento asfalto foi modificado para o concreto, um material de maior albedo que favorece a reflexão de radiação solar, diminuindo o calor retido no cânion urbano (KRUGER; GONZALEZ, 2016). Porém, como se observa no Gráfico 18, o cenário B2T6 foi finalizado com o pavimento em asfalto devido ao aumento excepcional no consumo após a substituição pelo concreto. Manter o pavimento anterior garantiu à B2T6 uma redução de 0,13 kWh/m².ano, superior às encontradas nos outros cenários de CA 2,8 – A2T6 (0,06 kWh/m².ano) e C2T6 (0,07 kWh/m².ano) – que tiveram os resultados mais baixos. Já os cenários de CA 1,2 apresentaram os melhores resultados, sendo na ordem da forma urbana B (0,16 kWh/m².ano), C (0,12 kWh/m².ano) e A (0,12 kWh/m².ano).

Gráfico 18 – Consumo de resfriamento (kWh/m².ano) no cenário rural e urbano por pavimento



Fonte: a autora (2021).

Os melhores resultados em B podem ser explicados pela densa configuração urbana do cenário. Nesse caso, a pavimentação de maior albedo foi favorável quando as edificações eram mais baixas, permitindo que pouco calor fosse armazenado na superfície durante o dia. Com as edificações mais altas, o material de menor albedo diminuiu as trocas de radiação dentro do cânion urbano, ou seja, o pavimento absorvia o calor e diminuía o aquecimento por reflexões das superfícies de envoltória dos

edifícios. Embora haja benefícios ao analisar as trocas de radiação, a pavimentação modificou menos que 1% no consumo anual.

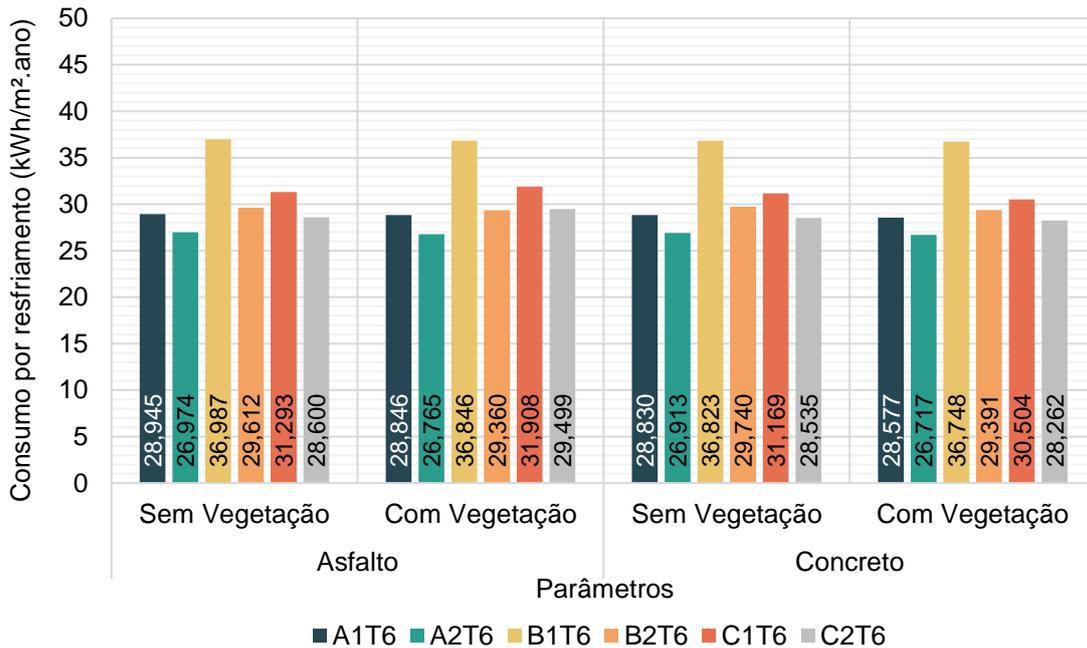
Assim, foi possível observar que a orientação foi mais influente na redução do consumo e a pavimentação de maior albedo foi relativamente melhor nos cenários de menor CA. Xu *et al.* (2020) já confirmava a dependência do albedo de pavimento à morfologia urbana, de forma que a variação de valor poderia gerar desde benefícios a prejuízos, a depender das proporções construtivas. Em seu estudo, também foi notável que a alteração do albedo era mais significativa para edificações com índices de formas urbanas mais baixas.

c) Vegetação

Posterior à análise do albedo, foram simuladas as combinações dos dois tipos de pavimentos com a inclusão de vegetação. Como observado no tópico 4.1, a vegetação associada ao asfalto (menor albedo) diminuiu a intensidade de calor em maiores proporções em B2T6, porém, o consumo energético reduziu em 0,35 kWh/m².ano com a inserção do concreto (1,18%), atingindo uma diferença de 0,33% entre os tipos de pavimentos. De maneira oposta, a combinação de vegetação e concreto (maior albedo) só foi favorável para os dados de temperatura no cenário B1T6, sendo que a redução no consumo de 0,14 kWh/m².ano foi ligeiramente maior do que o pavimento asfalto.

As duas combinações apresentaram pouca variação na intensidade de ilha de calor nos cenários A, nos quais o A1T6 obteve maior redução com o concreto e, em A2T6, os resultados de consumo foram aproximadamente 0,20 kWh/m².ano para ambos os pavimentos. Com notoriedade do cenário C na amenização da intensidade de ilha de calor, no Gráfico 19 foi verificada uma contribuição da vegetação com pavimento asfalto para o aumento do consumo em até 0,90 kWh/m².ano (3,14%) no cenário C2T6. A redução foi obtida pela combinação ao concreto, chegando à 0,67 kWh/m².ano (2,13%) em C1T6. Além disso, na medida em que aumenta a proporção de área verde nos cenários, percebe-se um consumo mais tênue, como em C1T6 que, com aumento da área de grama para 50%, o reduziu em 1,56 kWh/m².ano.

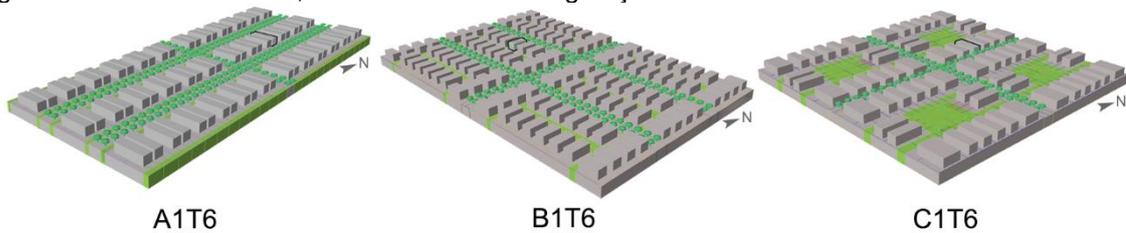
Gráfico 19 – Consumo em kWh/m².ano por combinação de pavimentação e vegetação



Fonte: a autora (2021).

Notou-se que a combinação do elemento vegetação à pavimentação afetou as alterações iniciais provenientes unicamente do albedo, isto é, a modificação do asfalto para o concreto resultou em maior redução do que com a inserção de áreas verdes nos cenários A1T6, B1T6 e C1T6 (Figura 17).

Figura 17 – Cenários A1T6, B1T6 e C1T6 com vegetação



LEGENDA
 A: Jardim da Penha B: Mata da Praia C: Praia do Canto
 1: Coeficiente de aproveitamento 1,2 T6: Taxa de ocupação 60%

Fonte: a autora (2021).

Por configurarem áreas urbanas com mais espaços abertos e edificações baixas, esses cenários possuem a tendência de reflexão de ondas curtas pelas superfícies. Porém, somado a baixa dissipação do calor pela pavimentação, as árvores são interpretadas pelo programa como objeto de sombreamento, no qual a copa cria um bloqueio da reflexão para o céu. Nesse sentido, foi possível observar que a modelagem do elemento árvore, mesmo com contribuição no equilíbrio de calor latente e sensível no cânion urbano, interferiu negativamente na influência esperada pelo parâmetro vegetação.

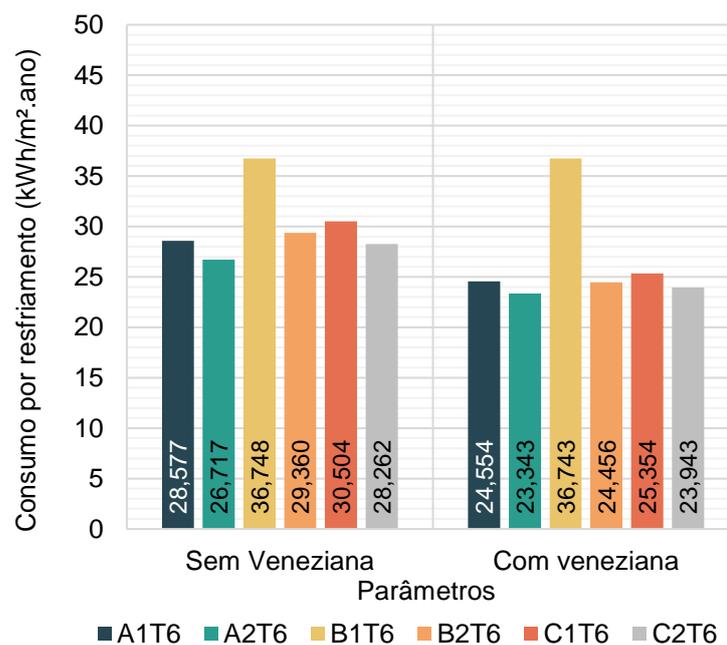
d) Dispositivo de sombreamento

Após a análise do albedo de pavimento e vegetação, foram incluídos dispositivos de sombreamento nas janelas do edifício principal. Dentre os parâmetros analisados, este é um dos que mais resguarda os ambientes internos das radiações solares externas, colaborando para a manutenção do conforto térmico e redução do uso de condicionamento artificial.

Comparando os diferentes cenários, a incorporação de veneziana nas simulações demonstrou ser uma estratégia relevante para as edificações situadas naqueles de menor gabarito, com pouca influência do sombreamento de edificações vizinhas. O consumo para resfriamento por área condicionada diminuiu 16,88% do valor anual no cenário C1T6 e 14,08% em A1T6. Entretanto, o dispositivo praticamente não mudou as condições de consumo em B1T6.

Nos cenários de CA 2,8, a redução foi considerável em B2T6 e C2T6, chegando à 16,70% e, assim como na forma urbana C, em A2T6 o consumo foi inferior à A1T6, com 12,63%. A diferença média de redução encontrada entre os coeficientes de aproveitamento foi de 0,65 kWh/m².ano (cenário A) e a 0,83 kWh/m².ano (cenário C). No Gráfico 20 é possível perceber a contribuição da veneziana nos cenários, com a maior redução sendo de 5,15 kWh/m².ano em C1T6.

Gráfico 20 – Consumo por resfriamento (kWh/m².ano) no edifício sem e com veneziana



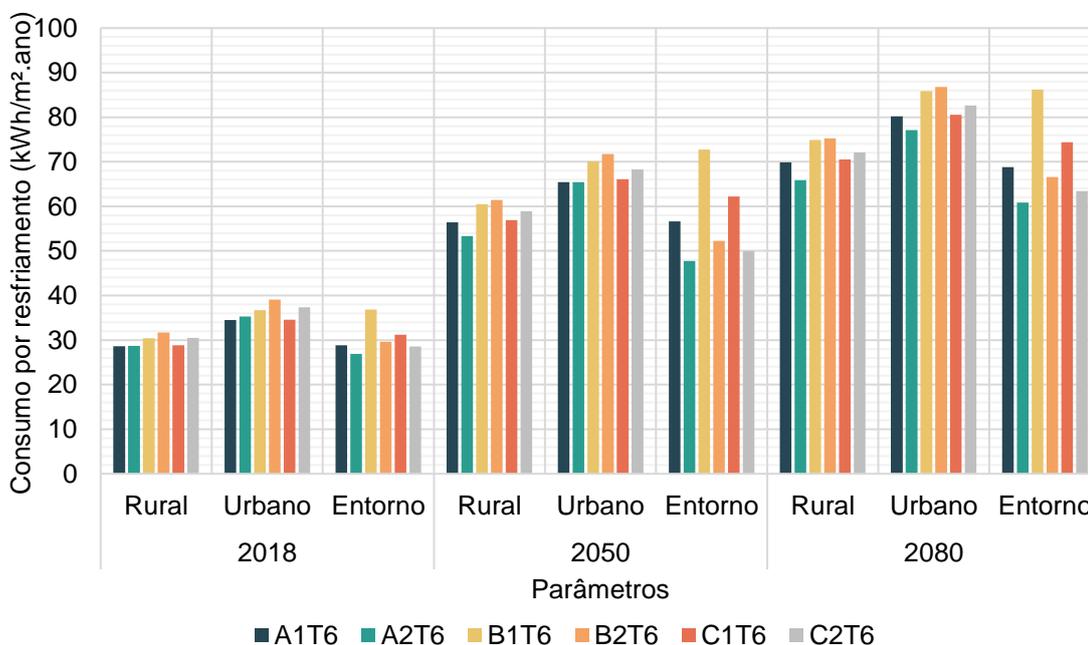
Fonte: a autora (2021).

Embora a inclusão do dispositivo de sombreamento tenha reduzido o consumo em valores significativos no cenário atual, as estratégias adotadas devem garantir o desempenho mínimo também em cenários futuros. Diante das mudanças no clima urbano, os parâmetros de entorno, vegetação e veneziana foram analisados em cenários modificados para projeções de 2050 e 2080.

e) Projeções climáticas

A simulação foi realizada com e sem o efeito do sombreamento do entorno na edificação, visando compreender as alterações diretas do clima urbano no consumo energético. No Gráfico 21, é possível verificar um aumento considerável diante da modificação do arquivo com a inserção do efeito de ilha de calor. Entretanto, a volumetria do entorno pode compensar essa alteridade, principalmente nos cenários de CA 2,8, dentre os quais o B2T6 apresentou o maior aumento no consumo, em 7,41 kWh/m².ano, posteriormente reduzida em 9,46 kWh/m².ano no ano 2018.

Gráfico 21 – Consumo por resfriamento com clima rural, clima urbano e entorno em cenário atual e futuro



Fonte: a autora (2021).

Assim como B2T6, os outros cenários de CA 2,8 apresentaram uma compensação do “Entorno” em relação ao “Urbano”. A ilha de calor colaborou para um aumento de 6,58 kWh/m².ano e uma diminuição, causada pelo sombreamento, de 8,35 kWh/m² no

cenário A2T6 em 2018. De modo similar, C2T6 aumentou em 6,82 kWh/m².ano e reduziu em 8,80 kWh/m².ano. Assim sendo, esses valores de redução conferiram um consumo inferior à simulação de “Rural”.

Ao analisar os cenários de 2018 à 2080 foi constatado que os valores de consumo cresciam com o “Urbano” e diminuía com o “Entorno” de maneira gradual, excetuando-se o cenário A2T6. Entretanto, essas variações foram menores em 2080 do que em 2050, confirmando que a temperatura elevada esperada para os anos seguintes pode diminuir a influência da ilha de calor no clima urbano e desempenho da edificação. Para exemplificar, o cenário B2T6, de maior contribuição no consumo pelo entorno em 27,16% no ano de 2050, teve a influência reduzida para 23,30% em 2080.

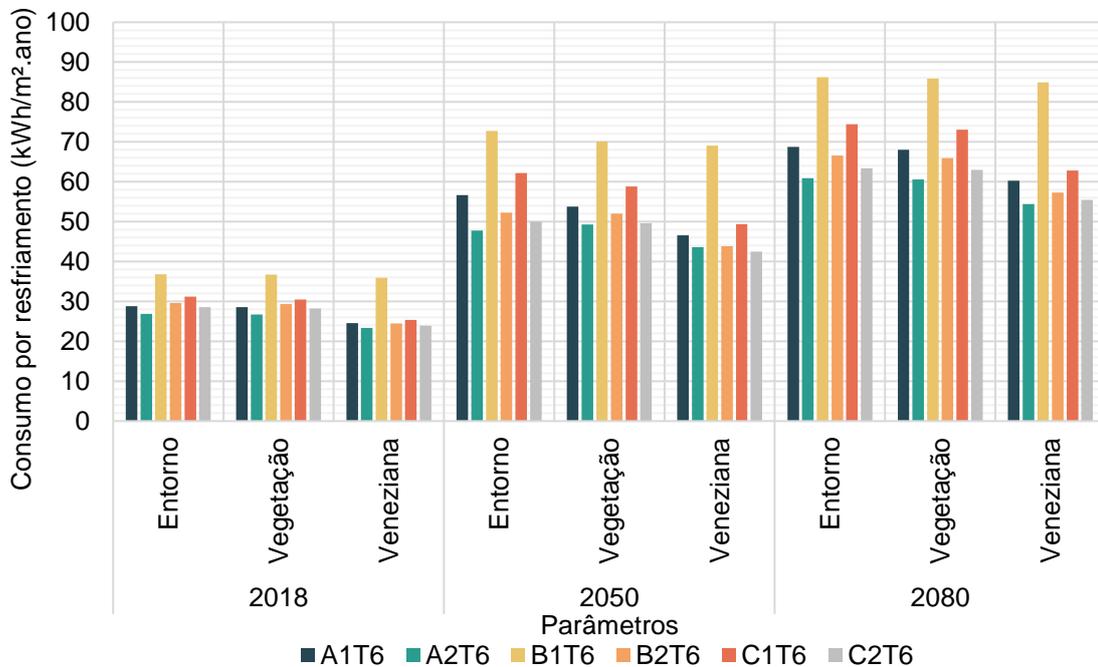
Diferentemente do comportamento dos cenários supracitados, os cenários de CA 1,2 demonstraram menor redução com o elemento “Entorno”, permanecendo com dados de consumo superiores aos de “Rural”. Em A1T6, houve uma compensação satisfatória com o entorno, tendo uma diferença com o rural de apenas 0,22 kWh/m².ano. Porém, não permanecendo linear ao longo dos anos, este cenário apresentou um pequeno aumento na diferença em 2050 e o sombreamento demonstrou sua maior contribuição em 2080, com uma redução de 1,14 kWh/m².ano em relação ao consumo rural.

Concomitante à maior redução média de intensidade de ilha de calor entre 2050 e 2080 no mês de março, a forma urbana de A1T6 contribuiu para reduções significativas de consumo quando comparado aos cenários de CA 1,2. Ainda nesse sentido, devido à configuração de C1T6, o elemento do entorno não foi suficiente para a aproximação dos dados em relação ao consumo do “Rural”, permanecendo um incremento de 2,34 kWh/m².ano em 2018, dobrando o valor em 2050 (5,30 kWh/m².ano) e sendo em menores proporções em 2080 (3,88 kWh/m².ano).

Destaca-se que o cenário B1T6 exibiu um aumento contínuo no consumo desde o “Rural” ao “Entorno”, sendo uma variação positiva de 6,43 kWh/m².ano em 2018, 12,28 kWh/m².ano em 2050 e 11,29 kWh/m².ano em 2080. Sob o ponto de vista dos outros parâmetros, esse cenário foi o que menos se beneficiou com a inclusão de

vegetação e veneziana, com ressalva à redução de 2,64 kWh/m².ano pelo primeiro parâmetro em 2050 (Gráfico 22).

Gráfico 22 – Variação no consumo por resfriamento pela vegetação e veneziana em 2018, 2050 e 2080



Fonte: a autora (2021).

Em proporções condizentes com as características de cada cenário, os resultados de consumo tanto para os parâmetros vegetação como veneziana apresentaram uma padronização de comportamento nos cenários futuros, no qual houve uma redução maior de 2018 a 2050 do que de 2050 a 2080.

O parâmetro vegetação contribuiu em até 3,54 kWh/m².ano na redução do consumo em 2050. Porém, essa influência diminuiu consideravelmente em 2080, com valores equivalentes aos de 2018 em praticamente todos os cenários. Aqueles que procederam de maneira particular foram o cenário C2T6 que, mesmo com a baixa redução, o maior valor se deu em 2018; e A2T6, no qual, em vez de decréscimo, houve aumento de 1,56 kWh/m².ano no consumo em 2050.

O perfil de redução foi mais significativo em C1T6, um cenário com a maior proporção de áreas gramadas por área total, que contribuiu para consumos atenuados em 2,13% em 2018, chegando a 5,39% em 2050 e 1,82% em 2080. À exceção deste cenário e da contribuição de 1,09% em A1T6, os demais cenários apresentaram uma influência da vegetação em variações abaixo de 1% em 2080.

De maneira similar ao parâmetro vegetação, o dispositivo de sombreamento mostrou-se mais eficiente no cenário C1T6. O perfil de redução do consumo foi progressivo ao longo dos anos, com valores expressivos em todos os cenários. Porém, diante de consumos cada vez maiores, a proporção de redução não acompanhou o aumento esperado, induzindo a uma influência decrescente.

Assim, o cenário C1T6 teve o consumo mais beneficiado pelo dispositivo, com uma diminuição de 5,15 kWh/m².ano em 2018, correspondente à 16,88%. Apesar de a redução expandir para 9,48 kWh/m².ano no ano de 2050, o valor continuou representando uma influência similar de 16,11% e, em 2080, a redução de 10,23 kWh/m².ano equivaleu-se à apenas 14%. Seguido deste cenário, B2T6 apresentou valores aproximados de redução, com uma influência de 13,14% na última projeção.

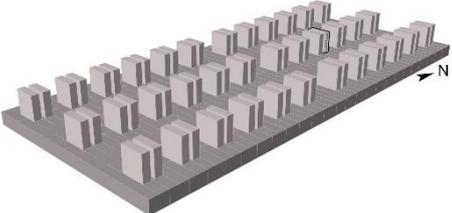
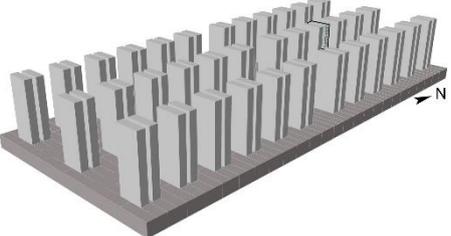
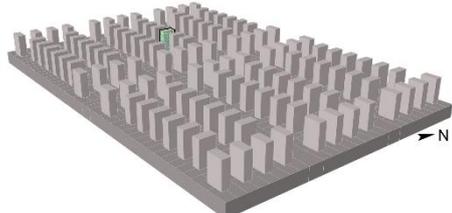
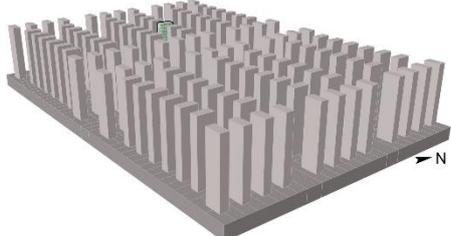
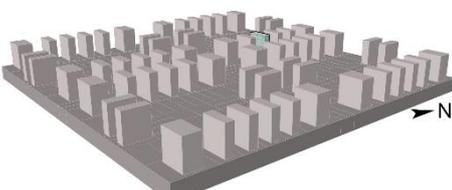
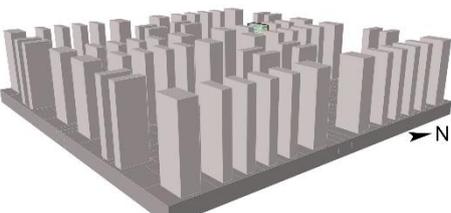
Cabe ressaltar que, além do bom desempenho em B2T6, ambos os cenários de forma urbana C demonstraram reduções significativas, tendo influência acima de 11,92% em todos os cenários futuros. Já a combinação de fator urbano em B1T6 não foi favorecida pelo dispositivo, os resultados foram praticamente nulos para este cenário. Em contrapartida, a forma urbana A, mesmo com valores abaixo de C, exibiu influência acima de 10,13% (2080) tanto em A1T6 como em A2T6.

Partindo do comparativo evolutivo dos parâmetros citados: clima urbano, entorno, vegetação e dispositivo de sombreamento, observou-se que o consumo pode sofrer alterações positivas ou negativas, a depender tanto do elemento inserido como da forma urbana dos cenários com taxa de 60% de ocupação. Essa influência variou desde uma redução de 27,16% a um aumento de 23,40% no consumo por resfriamento, sendo todos os valores descritos no Apêndice F.

f) Taxa de ocupação

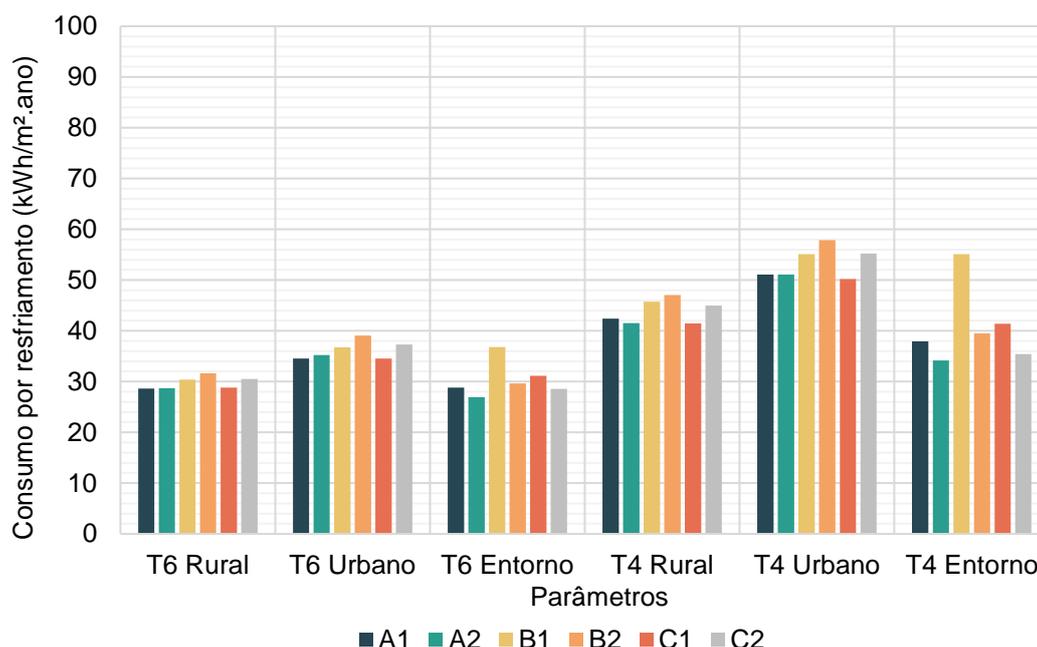
Os cenários-base em T6 foram adaptados para o índice urbanístico de menor taxa de ocupação (T4) e, por conseguinte, apresentam edificações mais altas para os coeficientes de 1,2 e 2,8 (Quadro 9). Essa configuração urbana caracteriza-se por maiores áreas de fachada com cânions mais estreitos, oferecendo mais sombreamento, porém, dificultando a saída das ondas longas de radiação.

Quadro 9 – Conformação urbana com menor taxa de ocupação (T4)

Cenários T4	CA 1,2	CA 2,8
A		
B		
C		

Fonte: a autora (2021).

Conforme demonstra o Gráfico 23, os edifícios em cenários de menor TO apresentaram consumos maiores, tanto com arquivo climático rural como urbano. A partir da consideração da ilha de calor, os consumos em T4 aumentaram em porcentagens similares às encontradas nos cenários T6, ressalvando-se o C1, que obteve 1,30% na diferença entre o rural e urbano. Dessa forma, assim como na análise de cenários futuros, foram comparados os dados de consumo das edificações com maior e menor taxa de ocupação para verificar a influência particular do arquivo climático “Rural” e “Urbano”, além da volumetria do “Entorno”.

Gráfico 23 – Consumo por resfriamento (kWh/m².ano) em diferentes taxas de ocupação

Fonte: a autora (2021).

O cenário-base, simulado com o arquivo rural e urbano, indicou B2 como de maior consumo por resfriamento e a diferença entre eles foi de aproximadamente 23% em T4 e T6. Contudo, percebem-se valores de consumo superior em T4, no qual a porcentagem indica um acréscimo de 10,84 kWh/m².ano, sendo que, para as mesmas circunstâncias, foi de 7,41 kWh/m².ano em T6. Ainda neste sentido, o menor consumo encontrada em T4 no cenário urbano (C1T4) refere-se à 11,13 kWh/m².ano a mais no maior consumo de T6 (B2T6).

Ao incluir o contexto urbano, houve amenização do consumo em ambas as taxas de ocupação, sucedendo em maiores proporções em T4. Com edificações mais altas, os cenários mais favorecidos pelo sombreamento foram os com alto coeficiente de aproveitamento (A2, B2 e C2), chegando a uma redução de 19,78kWh/m².ano em C2T4. Os cenários de menor coeficiente apresentaram menores reduções em relação aos de CA 2,8, com valores consideráveis em A1T4 e praticamente nula em B1T4. Isso fez com que este cenário apresentasse um incremento de 49,72% em relação à B1T6.

Embora as reduções tenham se apresentado como prósperas, todas as edificações de “T4 Entorno” seguiram com os consumos superiores às encontradas em “T6 Entorno”, de acordo com os dados apresentados no APÊNDICE F. Os cenários T4

possuem a particularidade de, ao ocuparem uma área menor no lote, estipularem zonas menos profundas e, conseqüentemente, mais suscetíveis às radiações diretas e propagação de calor em grande parte do ambiente.

g) Parâmetros alternativos de otimização

As superfícies externas são influenciadas pelas reflexões e trocas de calor no cânion urbano, ocasionadas, também, pelo albedo dos materiais. Assim sendo, com o albedo da pavimentação definido, as alterações no consumo por resfriamento foram verificadas a partir da materialidade nas paredes e coberturas aplicada nos cenários T6.

Sendo praticamente indiferente nos cenários de menor coeficiente, o baixo albedo na cobertura e parede contribuiu de maneira desigual nos cenários. A variação foi próxima à 0,1 kWh/m².ano, mas contribuindo na redução do consumo em B1T6 e aumentando nos cenários A1T6 e C1T6, ambos caracterizados pelo menor proporção de cânion e a forma urbana com mais áreas de superfícies expostas à radiação direta. De outro lado, os valores aplicados condizem com o comportamento de materiais que absorvem o calor e o dissipam lentamente durante o dia, contribuindo para temperaturas noturnas mais quentes e, assim, a tendência ao uso de condicionamento artificial.

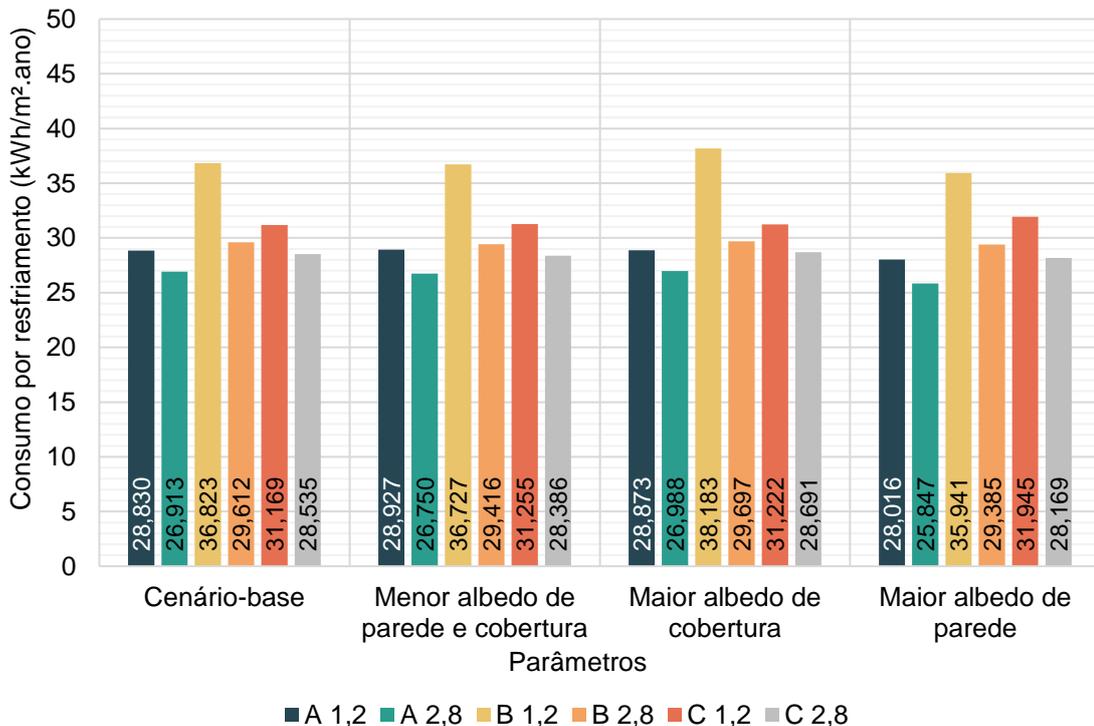
A interferência quase nula do menor albedo em cenário CA 1,2 vai de encontro aos resultados destes mesmos cenários ao obter uma maior redução com o pavimento de concreto e maior albedo aplicado nas paredes. Porém, quando o maior albedo foi aplicado apenas na cobertura, houve aumento no consumo de 1,36 kWh/m².ano em B1T6. Embora tenha o maior coeficiente de aproveitamento, o A2T6 apresentou um comportamento similar a esses para os parâmetros de maior albedo na parede e orientação.

Ao contrário dos cenários de menor coeficiente – com superfícies expostas à radiação direta –, os outros cenários apresentam grandes áreas de superfícies protegidas pela própria volumetria, seja pelo gabarito como pelos cânions estreitos. Apesar dos dados de temperatura serem superiores em cenários mais adensados, a intensidade com os materiais de menor albedo foi inferior ao de maior albedo durante o dia em B2T6.

Assim, diante de um contexto bem sombreado, os materiais recebem menos radiação e absorvem menos calor durante o dia, proporcionando um aquecimento inferior aos cenários de CA 1,2.

Nos cenários de CA 2,8, o menor albedo alcançou uma redução de até 0,20 kWh/m².ano em B2T6, confirmando a divergência encontrada na escolha da pavimentação, visto que tal cenário demonstrou melhor desempenho com o asfalto. O pavimento de concreto praticamente não contribuiu no consumo em A2T6 e C2T6, tendo o menor albedo nas paredes e cobertura melhores contribuições para a redução (Gráfico 24). Nestes cenários, observou-se, também, o aumento de até 0,16 kWh/m².ano (C2T6) com o maior albedo de cobertura.

Gráfico 24 – Consumo por resfriamento (kWh/m².ano) com diferentes valores de albedo



Fonte: a autora (2021).

A forma urbana A foi a que obteve os melhores resultados de redução no consumo com os parâmetros de orientação e maior albedo, sendo o primeiro importante em ambos os coeficientes de aproveitamento e, o segundo, apresentou-se como de baixa influência ao ser incorporado na cobertura e, em contrapartida, na parede atuou como fator de contribuição para a redução de 1,07 kWh/m².ano em A2T6 e 0,81 kWh/m².ano em A1T6. Estes cenários divergiram em outros parâmetros, uma vez que o pavimento

foi relevante na redução de 0,12 kWh/m².ano em A1T6 e o menor albedo de parede e cobertura reduziu 0,16 kWh/m². ano em A2T6.

Os cenários B apresentaram as melhores contribuições para o consumo provenientes das orientações, com divergências entre os CA. Em B1T6, a redução ocorreu com notoriedade à orientação, pavimento de concreto e maior albedo na parede, porém, um aumento de 1,36 kWh/m².ano pelo parâmetro de maior albedo na cobertura. Já o B2T6, em comparação aos outros cenários, teve uma redução considerável pelo menor albedo nas superfícies, equiparando-se à redução pelo maior albedo nas paredes.

Dentre todos os cenários, aqueles de forma urbana C apresentaram as menores variações de consumo com as mudanças nos parâmetros e um comportamento particular para as maiores reduções, que ocorreram com o maior albedo na parede em proporções superiores às da orientação. Assim como em A, os cenários procederam de maneira similar, tais como o menor albedo proporcionar maior redução em CA 2,8 e aumento no consumo em CA 1,2, sendo este favorecido pela pavimentação.

Em C1T6, a orientação reduziu em 0,68 kWh/m².ano, o pavimento de concreto em 0,12 kWh/m².ano e o maior albedo de parede em 0,78 kWh/m².ano. Os parâmetros de menor albedo geral e maior albedo de cobertura aumentou o consumo em até 0,09 kWh/m².ano. Este último parâmetro foi o único a gerar acréscimos em C2T6, um cenário com as menores variações de consumo, dentre as quais a maior redução foi de 0,37 kWh/m².ano com o maior albedo aplicado nas paredes.

Analisando individualmente os parâmetros, a orientação ajudou a reduzir o consumo em todos os cenários, sendo mais relevante nos cenários A e B1T6. O pavimento de concreto foi favorável nos cenários de menor coeficiente B1T6, C1T6 e A1T6, com o efeito positivo do asfalto apenas no cenário B2T6. Já o menor albedo nas superfícies demonstrou ter benefícios para os cenários de maior coeficiente, com redução no consumo em A2T6, B2T6 e C2T6. O maior albedo na cobertura aumentou o consumo nos cenários B1T6 e C2T6, porém, quando aplicada apenas na parede, contribuiu na redução em maiores proporções em A1T6, A2T6, B1T6 e C1T6.

De acordo com Evola *et al.* (2020), o acabamento externo das edificações em cores claras, isto é, com alto albedo, evita o aquecimento excedente da superfície. Esse controle da temperatura de superfície influencia tanto no ar externo como no conforto térmico do ambiente interno e, conseqüentemente, na energia necessária para o resfriamento. Assim, a fim de identificar o desempenho da edificação frente aos parâmetros construtivos e de uso, simulações foram realizadas com modificações externas ou da envoltória, sendo eles, o percentual de abertura da fachada (PAF) e o uso misto no contexto urbano; e o fator solar do vidro (FS) e o índice de transmitância térmica (U) na alvenaria do edifício principal.

Uma vez que o padrão de ocupação e a energia consumida variam entre os diferentes usos de edificações, o calor proveniente das atividades humanas e dos sistemas internos de resfriamento são liberados para a atmosfera e influenciam no balanço térmico do meio urbano (Oke *et al.*, 2017). Neste sentido, a mudança do uso residencial para uso comercial na média de 40% das edificações do entorno – uma proporção variável de acordo com os cenários –, promoveu uma variação de -3,0% a +2,6% no consumo por área do edifício analisado. Contudo, não houve uma padronização de comportamento entre os cenários.

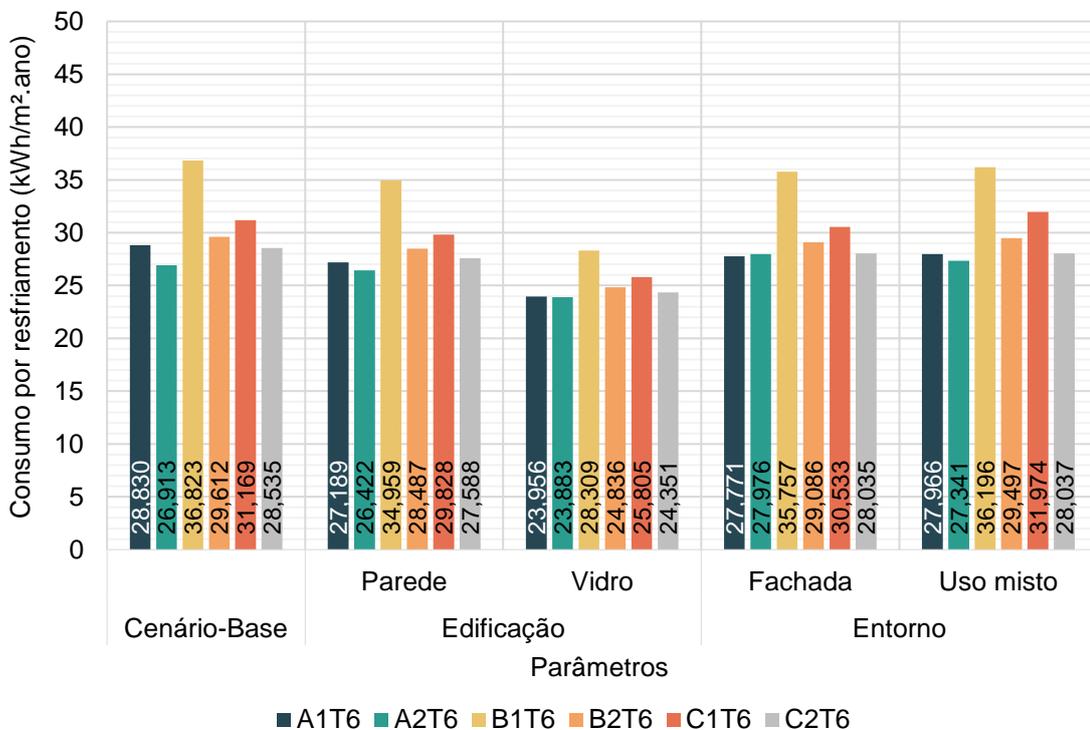
Tendo em comum a relação de área ocupada pela área total, A2T6 e C1T6 apresentaram incremento no consumo em 0,43 kWh/m².ano (1,59%) e 0,81 kWh/m².ano (2,58%), respectivamente. De modo oposto, no restante dos cenários, o uso misto contribuiu para a redução do consumo, principalmente naqueles formados por baixa forma urbana. Essa atenuação se deu em maiores proporções em A1T6, com 0,86 kWh/m².ano (3,00%) e menor redução em B2T6 (0,39%). Já os cenários B1T6 e C2T6 tiveram amenização do consumo em aproximadamente 1,72%, correspondente à 0,63 kWh/m².ano no primeiro e 0,50 kWh/m².ano no segundo.

A análise conjunta com a porcentagem de uso misto aplicada em cada cenário, permitiu estabelecer a sensibilidade para tal parâmetro. Sabendo-se que A, B e C possuem, respectivamente, 50%, 41% e 21% de uso misto, foi verificado que esta última forma urbana C, mesmo com a menor porcentagem, apresentou variações maiores às demais. Em ordem decrescente, o cenário A obteve tanto a relação de uso misto por área total como a variabilidade de consumo em proporções superiores às de B.

Outros fatores de interferência são as propriedades das paredes e janelas de envoltórias, que modificam os ganhos internos de calor e as trocas de radiação nos cânions urbanos (NAZARIAN *et al.*, 2019). O percentual de abertura nas fachadas dos edifícios circundantes contribuiu para uma variação entre -2,90% à 3,95% no consumo por resfriamento. Dentre os cenários, esse parâmetro influenciou negativamente na disposição construtiva de A. No cenário A1T6 ocorreu a menor variação de redução, com uma interferência praticamente nula de 0,2%, e, em A2T6, a PAF contribuiu para o aumento do consumo.

Já os cenários B e C procederam de maneira similar (Gráfico 25). Com a maior redução para o menor coeficiente de aproveitamento, B1T6 diminuiu em 1,07 kWh/m².ano (2,90%), seguido de C1T6 com 0,64 kWh/m².ano (2,04%). Em B2T6 e C2T6, foram encontrados valores aproximados de 0,51 kWh/m².ano, correspondentes à redução de 1,76%. Esses cenários mostraram proporcionalidade similar entre a baixa proporção de cânion urbano e os valores mais altos de redução do consumo para o parâmetro PAF.

Gráfico 25 – Consumo por resfriamento (kWh/m².ano) com parâmetros alternativos



Fonte: a autora (2021).

A modificação da transmitância térmica (U) das paredes e o fator solar (FS) dos vidros permitiu uma redução em até 5,69% (A1T6) e 36,82% (B1T6), respectivamente. Para

o novo valor de U, os cenários de CA 1,2 apresentaram reduções superiores em comparação aos de CA 2,8. De outro ponto de vista, a variação entre os coeficientes no cenário A foi 2,88% superior à encontrada em C.

Os maiores valores de redução ocorreram no cenário B, chegando à 8,51 kWh/m².ano em B1T6, porém, corresponde a uma proporção inferior à de A1T6. Já o cenário A2T6 apresentou a menor variação, com 3,03 kWh/m².ano, sendo um valor inferior à média dos outros cenários de menor coeficiente. Diante disso, constatou-se que a melhoria na transmitância térmica da parede pode contribuir ainda mais em cenários suscetíveis à radiação solar direta.

O fator solar (FS) do vidro foi o parâmetro de maiores reduções – sem aplicação do dispositivo de sombreamento –, sendo mais significativas também nos cenários de menor proporção de cânion urbano. As alterações no consumo em A1T6, B1T6 e C1T6 foram de 16,91%, 36,82% e 17,21%, respectivamente. Assim como ocorreu com os cenários de CA 1,2, a ordem crescente de contribuição no consumo de CA 2,8 foi A, C e B, demonstrando que o baixo fator solar é muito indicado para edifícios situados em configuração urbana semelhante à de B.

Os resultados indicaram que as modificações dos parâmetros contribuíram em proporções variadas para a redução do consumo energético. Entretanto, diferentemente dos elementos construtivos do entorno, os componentes da envoltória, com propriedades mais eficientes para a zona bioclimática, se mostraram como a melhor estratégia para diminuir as interferências externas. No Apêndice G é retratada a influência de todos os parâmetros em cada cenário, com a porcentagem positiva indicando incremento e a negativa para redução no consumo de energia.

4.2.1.2 Pavimentos

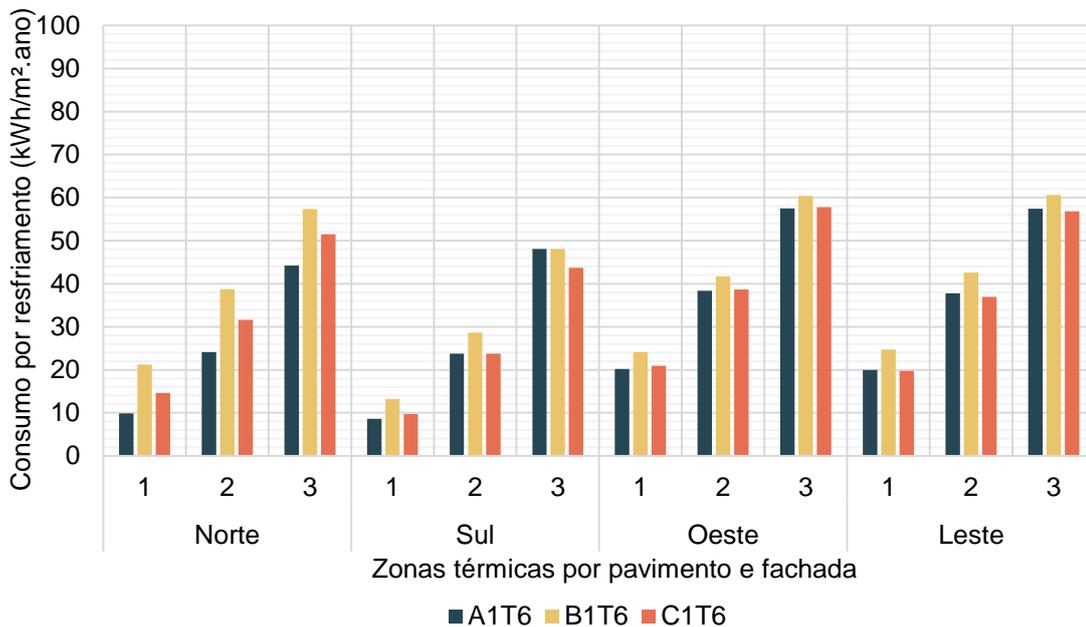
O consumo por resfriamento de acordo com as zonas térmicas é apresentado nos Gráficos 26 e 27. De modo geral, ocorre um acréscimo gradual do primeiro para o último pavimento. Enquanto as zonas intermediárias mantêm um padrão de aumento, as extremidades destoam ao apresentar proporções particulares de dados inferiores ou superiores em relação aos demais. Além disso, em todos os cenários, as zonas térmicas situadas nas fachadas oeste e leste apresentaram os maiores consumos

gerais por conta das fachadas norte e sul serem beneficiadas pelo sombreamento de edifícios vizinhos.

No Gráfico 26 são apresentados os dados dos cenários de CA 1,2 e T6, que possuem o total de 3 pavimentos. O cenário B demonstrou o maior consumo tanto por pavimentos como fachadas, podendo alternar a posição entre A e C. Além da diferença por cenários, as zonas da edificação em A obtiveram uma variação de até 48,93 kWh/m².ano.

Nessa perspectiva, a fachada sul obteve os menores consumos ao ser comparada com os mesmos pavimentos das outras fachadas, com valores variando de 8,59 kWh/m² (primeiro pavimento) até 48,09 kWh/m² (terceiro pavimento), ambos no cenário A1T6. Já os maiores consumos foram encontrados na fachada leste, com o valor mais alto de 60,65 kWh/m² no terceiro pavimento em B1T6.

Gráfico 26 – Consumo por resfriamento em kWh/m².ano em cada zona térmica do cenário CA 1,2



Fonte: a autora (2021).

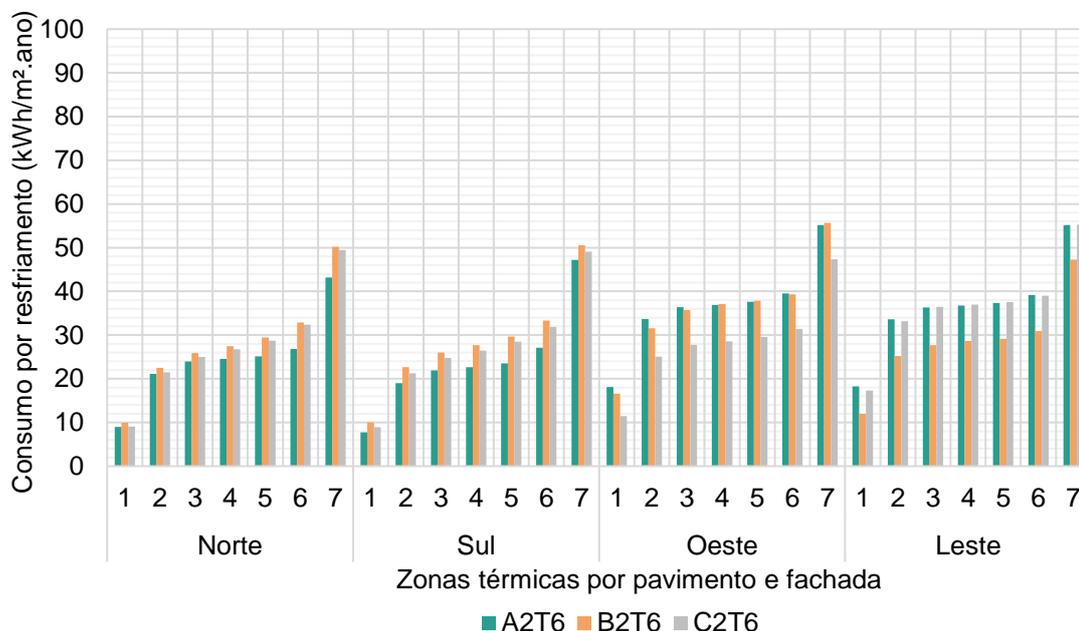
Nos cenários de CA 2,8, o consumo teve um comportamento padrão nas zonas das fachadas norte e sul, nos quais a ordem do menor para o maior consumo foi A, C e B em todos os pavimentos. No cenário A2T6, as fachadas norte e sul apresentaram menores consumos devido à proteção das edificações paralelas e o C2T6 obteve consumos similares nas fachadas norte e sul, aumentando pouco em oeste e apresentando valores mais altos à leste. De modo oposto, o B2T6 teve os menores

consumos na fachada leste em relação aos outros cenários e valores aproximados ao cenário A2T6 à oeste.

A análise das outras fachadas indicou uma inversão na ordem dos consumos e alternância de valores superiores entre pavimentos de diferentes cenários. Dessa maneira, juntamente à maior influência do sombreamento do entorno, a variabilidade encontrada em CA 2,8 para a edificação A foi de 47,42 kWh/m².ano, sendo inferior à de CA 1,2.

No primeiro pavimento, foram encontrados consumos de 7,73 kWh/m² (fachada sul) à 18,24 kWh/m² (fachada leste) em A2T6 e, no último, os maiores valores entre 43,17 kWh/m² (fachada norte de A2T6) à 55,66 kWh/m² (fachada oeste de B2T6). Já nos pavimentos intermediários (segundo a sexto), essa variação ocorreu com um intervalo menor de valores para a quantidade de pavimentos, sendo de 19,01 kWh/m² à 32,33 kWh/m² nas fachadas norte e sul e de 25,05 kWh/m² à 39,50 kWh/m² nas fachadas oeste e leste, indicando um aumento gradativo entre eles (Gráfico 27).

Gráfico 27 – Consumo por resfriamento em kWh/m².ano em cada zona térmica do cenário CA 2,8



Fonte: a autora (2021).

Comparando pela forma urbana, notou-se uma padronização de ordem crescente de consumo em A, C e B nas fachadas norte e sul. Porém, devido à proximidade dos edifícios vizinhos nas outras fachadas, em oeste, o cenário C2T6 teve uma redução significativa, assim como B2T6 em leste. As zonas térmicas de B apresentaram, em

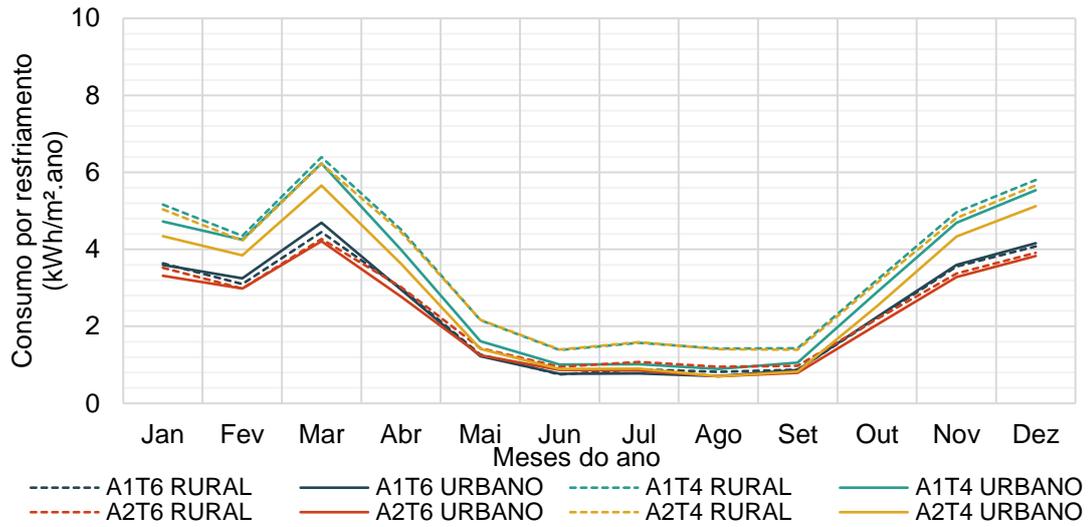
sua maioria, os valores superiores de consumo para resfriamento. Isso demonstra que o sombreamento contribuiu majoritariamente para a redução dos consumos entre pavimentos, contudo, a alta intensidade de ilha de calor verificada nesse cenário, de caráter mais adensado, o manteve com os maiores consumos em relação aos demais.

4.2.2 Dados mensais

De outro ponto de vista, o consumo anual por área condicionada foi subdividido para se verificar as variações entre os meses (Apêndice H). Nos Gráficos 28, 29 e 30 são demonstrados, respectivamente, os consumos mensais nas formas urbanas A, B e C dos cenários-base em suas variantes de coeficiente de aproveitamento e taxa de ocupação. O perfil de consumo foi similar nos três gráficos, nos quais há um consumo mais baixo de maio a setembro e aumenta de outubro à abril, com pico no mês de março. Além disso, de modo geral, os cenários T6 apresentaram menores valores do que T4 no decorrer do ano.

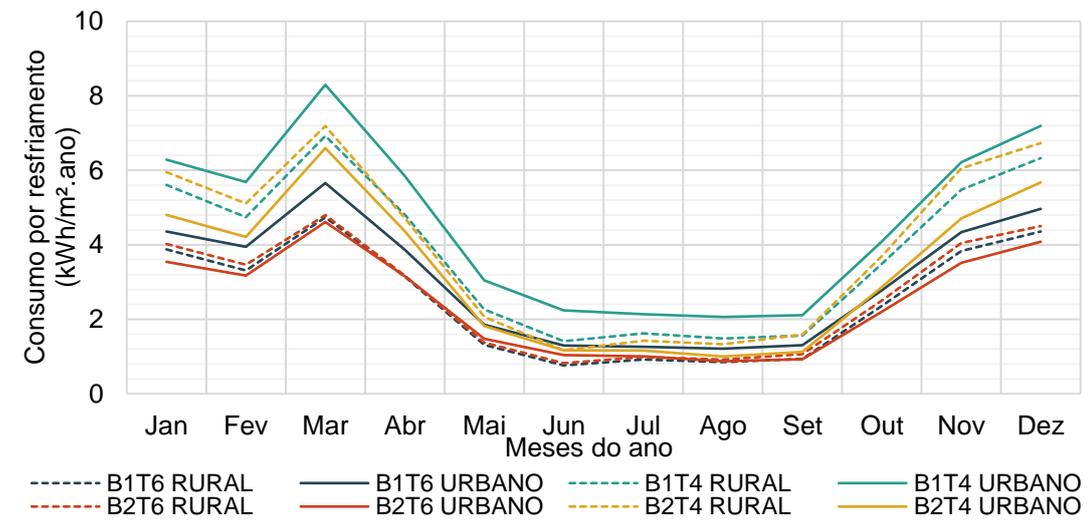
Devido aos benefícios do sombreamento de edifícios adjacentes, o consumo do cenário rural foi superior ao urbano em alguns cenários, principalmente na forma urbana A e na taxa de ocupação T4. Com essa taxa, esse efeito ocorreu em C com mais ênfase de julho a fevereiro e destacou-se a constância de altos consumos em todo o ano de B1T4. Já em relação aos cenários T6, aqueles com menor coeficiente de aproveitamento demonstraram um maior consumo no cenário urbano na maioria dos meses.

Gráfico 28 – Consumo por resfriamento mensal em A (kWh/m².ano)



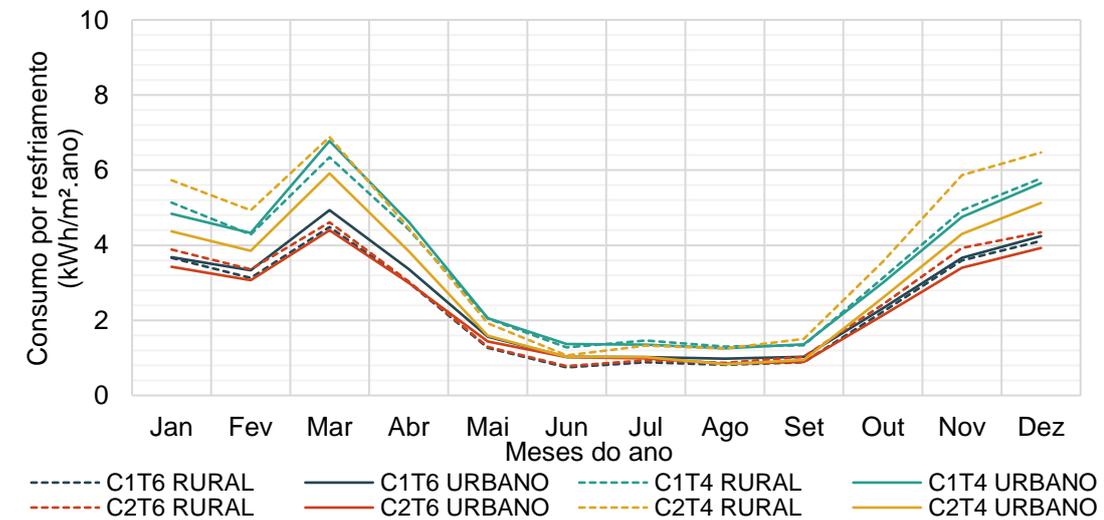
Fonte: a autora (2021).

Gráfico 29 – Consumo por resfriamento mensal em B (kWh/m².ano)



Fonte: a autora (2021).

Gráfico 30 – Consumo por resfriamento mensal em C (kWh/m².ano)



Fonte: a autora (2021).

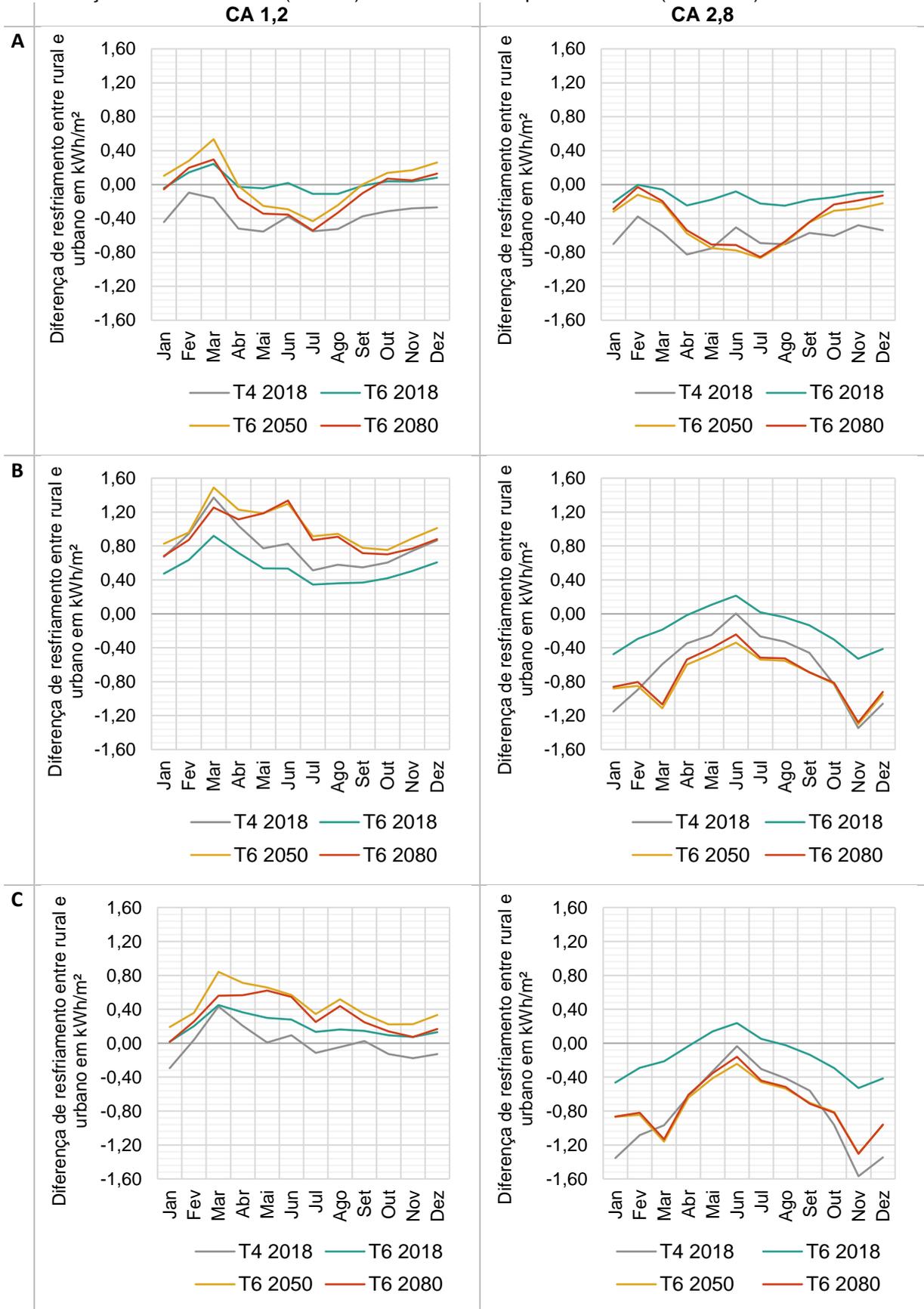
Observou-se um consumo mensal variando de 0,70 kWh/m² em agosto à 5,66 kWh/m² no mês de março em T6, chegando à 8,30 kWh/m² em T4. Os valores citados corresponderam aos cenários urbanos, evidenciando uma maior amplitude de consumo entre os meses. Sob o ponto de vista das formas urbanas, o cenário A registrou os menores consumos e, B, os maiores valores. Com a modificação do arquivo climático rural para o urbano, este último cenário apresentou um aumento de até 1,37 kWh/m² em março (B1T4) e, de modo oposto, o cenário C2T4 destacou-se pela redução de 1,57 kWh/m² em novembro.

Neste sentido, ao contrário do que ocorreu em B1, o consumo em T4 obteve reduções maiores ao ser transformado para o urbano do que T6. Em um cenário T4, foi possível encontrar variações no consumo entre -50% a 58,48%, enquanto em T6 variou de -26,12% a 69,94%. No entanto, pode-se observar que alguns parâmetros construtivos se sobressaem mais em uma forma urbana do que em outra, como os dados de cenários rurais superiores aos urbanos em A1T4 e A2T4; o B1T4 urbano apresentar o maior consumo; e, B2T4 e C2T4 se destacar pela redução de novembro a março.

Ao analisar as variações entre rural e urbano por mês, foi verificado um comportamento particular no cenário A. Este apresentou acréscimos de consumo apenas em março de A1T6 (5,49%), tendo baixas reduções em fevereiro e altas em agosto (-50% a -13,48%). Com exceção de C2T4, o mês de junho apresentou crescimento no consumo tanto em B como em C, variando, respectivamente, de 0,37% a 69,94% e de 3,30% a 30,38%. Já os valores mínimos de redução alternaram entre os meses setembro, novembro, janeiro e julho, com a maior diminuição de consumo em 28,95%, e foi encontrada variação de aumento em janeiro.

O Gráfico 31 apresenta as variações de consumo entre as formas urbanas e seus parâmetros construtivos, no cenário atual e de projeções futuras, dentre os quais as combinações favoreceram uma variação de -1,57 kWh/m² em C2T4 a 1,49 kWh/m² em 2050 de B1T6. O cenário B1 foi o único a apresentar aumento em todos os consumos mensais, assim como em A2 ocorreu uma redução generalizada.

Gráfico 31 – Variação, do rural para o urbano, de consumo (kWh/m²) por mês em cada cenário com combinação de forma urbana (vertical) e coeficiente de aproveitamento (horizontal)



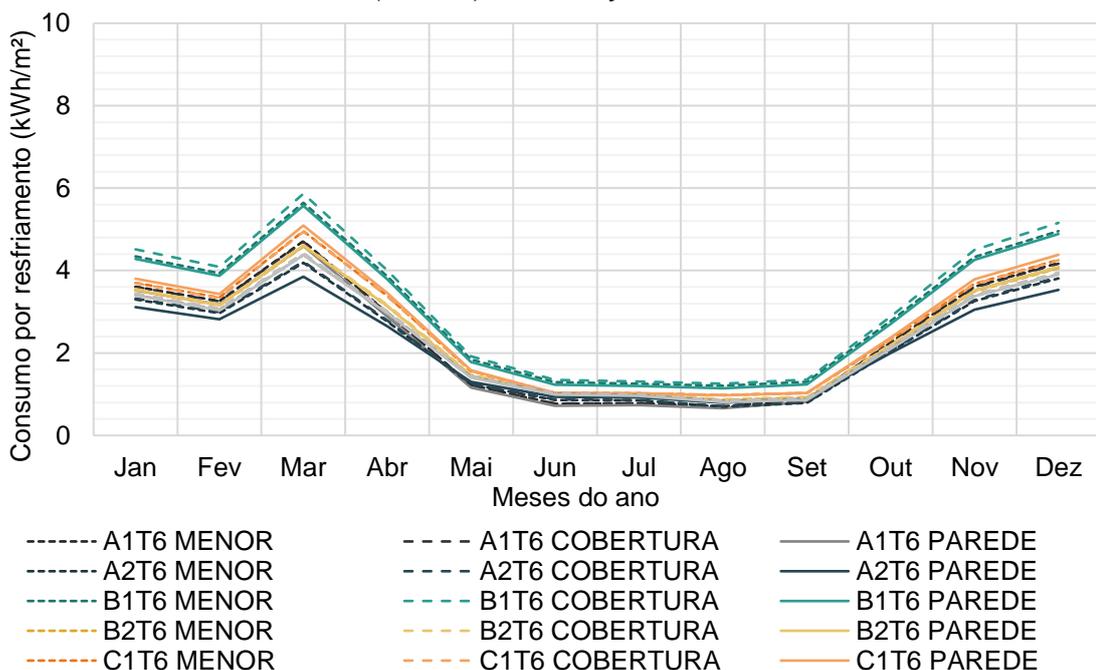
Fonte: a autora (2021).

Enquanto B e C apresentaram um comportamento singular entre os diferentes coeficientes – redução com CA 2,8 e aumento com CA 1,2 –, a forma urbana A demonstrou melhor tendência à redução de consumo em ambas as combinações. No ponto de vista do índice de forma, a taxa de ocupação T4 confirmou novamente os benefícios do sombreamento do entorno ao exibir reduções inferiores às das projeções climáticas na estação verão com T6.

Os valores de redução evidenciaram a influência individual nos cenários, a depender dos parâmetros construtivos da forma urbana. Partindo do consumo geral, essa diminuição pode ser mais significativa em um do que em outro e, apesar das grandes variações percebidas em outros meses, o mês de março continuou como o de maior consumo ao longo dos anos, sendo o maior valor encontrado em B1T6, com 9,86 kWh/m² no ano 2080.

Assim como os resultados para arquivo climático urbano, os cenários B1T6 e C1T6 continuaram com os maiores consumos ao modificar os valores de albedo do entorno, principalmente nos meses de março e dezembro. Porém, o parâmetro albedo interferiu de maneira diferente nestes cenários, de forma que, em B1T6, o consumo foi maior com a mudança na cobertura e, em C1T6, nas paredes. O Gráfico 32 representa essas variações de consumo mensal pelo parâmetro albedo em cada cenário.

Gráfico 32 – Consumo mensal (kWh/m²) com variação de albedo



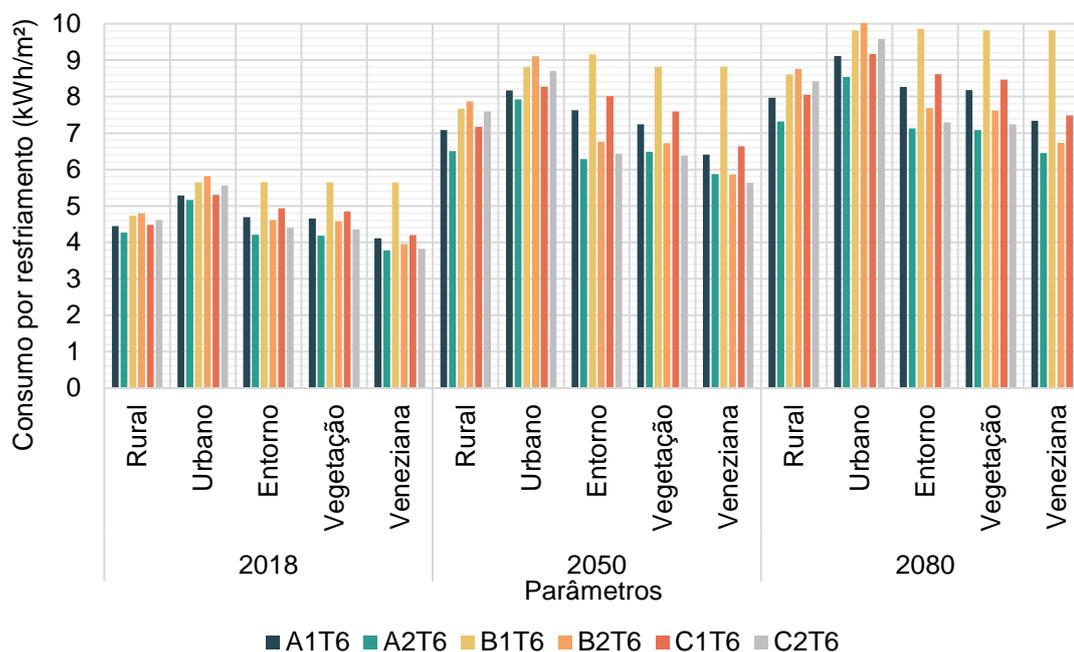
Fonte: a autora (2021).

O maior albedo nas paredes contribuiu para a redução do consumo energético em até 0,36 kWh/m² (8,51%) no mês de março em A2T6. Diferentemente dos outros cenários, esse mesmo parâmetro em C1T6, resultou no aumento de 0,16 kWh/m² (3,21%) para o mesmo mês. O aumento no consumo foi comumente encontrado ao inserir maior albedo na cobertura, atingindo a diferença de 0,21 kWh/m² (3,65%) em março de B1T6. Em contrapartida, nos cenários A1T6, B2T6 e C2T6, as variações para esse parâmetro foram abaixo de 0,1 kWh/m².

O consumo por resfriamento no mês de março segue o mesmo sentido do consumo anual, no qual há um aumento do cenário rural para o urbano e, posteriormente, esse valor pode ser reduzido por conta da inserção do entorno. Nessa transformação, o aumento do consumo é maior nos cenários de características adensadas e, diferentemente de A2T6 e C1T6, continua crescendo ao longo dos anos. Porém, esse crescimento não ocorre linearmente, de forma que a porcentagem de aumento em relação ao dado rural decaiu em 6,89% no cenário B2T6 até 2080.

Essa inconstância foi observada ao comparar a diferença de consumo do mês de março entre rural e urbano nos anos futuros, em que há uma inversão na ordem dos maiores aumentos entre os cenários (Gráfico 33). Em 2050, o maior incremento de consumo com 1,42 kWh/m² na média mensal ocorreu no cenário A2T6, enquanto nos outros anos foi em B2T6. A segunda maior variação de consumo se deu nos três cenários mais adensados (CA 2,8) e, o terceiro, permaneceu em B1T6 ao longo dos anos. Além disso, os cenários A1T6, C1T6 e C2T6 apresentaram uma variação similar nas projeções futuras.

Gráfico 33 – Consumo por resfriamento (kWh/m²) na média mensal de março a partir dos arquivos climáticos e parâmetros selecionados



Fonte: a autora (2021).

A inserção do entorno urbano reduziu os valores nos cenários de CA 2,8 e aumentou em CA 1,2, sendo essa variação entre -4,62% (C2T6) à +19,42% (B1T6). Em sua maioria, os cenários demonstraram um perfil de variação padrão nas projeções, com a redução ou aumento em 2050 superior às de 2080.

Assim como no consumo anual, a vegetação não foi suficiente para diminuir o consumo em proporções consideráveis quando comparada aos outros parâmetros. A vegetação contribuiu na redução do consumo de 0,19% (B1T6) à 1,78% (C1T6). Ao longo dos anos, o cenário C1T6 continuou com as melhores reduções, os quais chegaram à máxima de 5,21% (0,42 kWh/m²) em 2050 e reduziram em 2080 para 1,74%. Em 2018 e 2080, o cenário B procedeu diferente de A e C, exibindo uma redução maior em CA 2,8. De maneira atípica, a vegetação proporcionou um acréscimo de 3,10% (0,20 kWh/m²) no consumo de A2T6 em 2050.

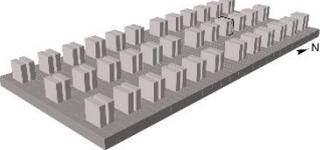
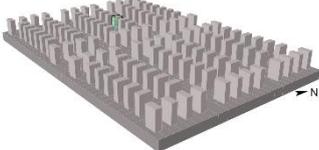
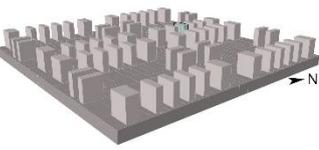
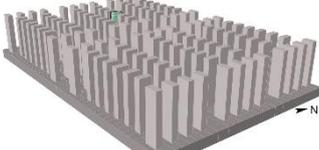
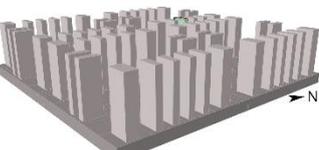
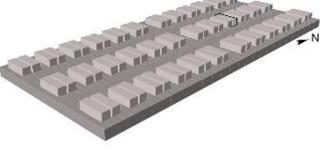
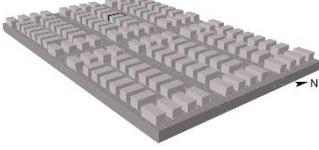
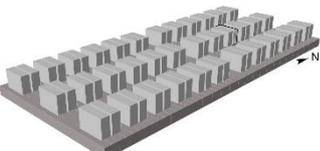
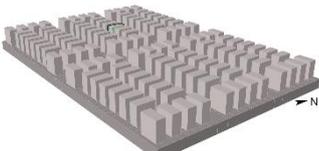
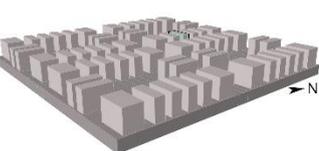
O parâmetro com maior benefício para a amenização do consumo foi o dispositivo de sombreamento, proporcionando valores abaixo do nível no cenário rural, com redução em até 13,54% em B2T6. Apesar do maior aumento acontecer na forma urbana B, em B1T6 quase não houve amenização no consumo e, nos outros cenários, a redução foi maior em C do que em A. Essa proporção foi diminuindo nos anos futuros em aproximadamente 1% tanto em 2050 como em 2080, indicando a necessidade de

adotar estratégias concomitantes ao dispositivo para manter sua capacidade de equilibrar o desempenho do edifício.

4.3 PROPOSIÇÕES AO AMBIENTE CONSTRUÍDO

A ambiência urbana foi embasada em três diferentes formas construtivas (A, B e C) e pela combinação dos índices de aproveitamento (CA) e taxa de ocupação (TO). Estes dados configuraram o código da edificação simulada em cada cenário urbano, representados em sequência pela letra da forma urbana, índice aplicado – número 1 para o CA 1,2 ou 2 para o CA 2,8 – e o símbolo da maior (T6) ou menor (T4) ocupação, conforme apresenta o Quadro 10.

Quadro 10 – Cenários-base em relação à forma urbana, taxa de ocupação e coeficiente de aproveitamento

TO	CA	A	B	C
T4	1,2	 A1T4	 B1T4	 C1T4
	2,8	 A2T4	 B2T4	 C2T4
T6	1,2	 A1T6	 B1T6	 C1T6
	2,8	 A2T6	 B2T6	 C2T6

Fonte: a autora (2021).

Considerando a modelagem dos cenários urbanos citados, o efeito de ilha de calor urbano favoreceu o aumento de temperatura nas áreas urbanas, principalmente nas regiões caracterizadas pela alta densidade. Desse modo, a simulação da edificação

principal com o arquivo climático modificado para esse efeito permitiu verificar um aumento no consumo por resfriamento em todos os cenários, que chega à 23,40% no ano. Essa porcentagem pode reduzir gradualmente em cenários futuros, visto que a tendência é de temperaturas mais elevadas tanto em áreas rurais como urbanas.

Na maior parte do ano, foi verificado um aumento na radiação global horizontal – que determina a radiação solar em uma superfície horizontal – concomitantemente à uma menor fração de cobertura do céu. Isso evidenciou a maior exposição à radiação solar direta, contribuindo para o aumento da temperatura tanto na superfície como do ar. A materialidade aplicada nas fachadas determinou a reflexão ou absorção dessas radiações no dia, sendo verificada a contribuição do maior albedo, concomitante, nas paredes e coberturas para evitar o excesso de calor noturno. Assim sendo, apesar das maiores intensidades de temperatura ocorrerem em cenários de CA 2,8, os edifícios mais baixos demonstraram maior sensibilidade aos parâmetros para alteração no consumo de energia por resfriamento devido às fachadas estarem mais expostas à radiação.

Os resultados demonstraram um efeito inesperado para o albedo, visto que, apesar do benefício do alto albedo nos materiais urbanos, o valor de 0,65 aplicado na cobertura contribuiu para o aumento do consumo. Corroborando com Enteria, Santamouris e Eicker (2021), a influência do alto albedo está relacionada ao aumento da temperatura durante o dia – um calor absorvido pela edificação – e indica que o valor não pode ser analisado, simplesmente, como baixo, médio ou alto. Sendo um dado acima do recomendado em cidades tropicais da América Latina, esse resultado reafirma a necessidade de avaliação do alto albedo às outras condicionantes urbanas, como a proporção do cânion urbano e fator de visão do céu.

Em contrapartida, quando é inserido o próprio entorno urbano, além da modificação do arquivo climático, observa-se uma redução na demanda que pode ser ainda maior do que com o aumento da temperatura. Essa compensação ocorre, principalmente, em cenários com edificações altas, que bloqueiam a radiação solar direta tanto nas superfícies de fachadas das adjacências quanto na pavimentação. O único cenário divergente foi B1T6, que continuou apresentando valores superiores de consumo com todos os parâmetros.

Diferentemente do comportamento com o arquivo climático – de variação energética gradual ao longo dos anos –, nos outros parâmetros foi possível observar um aumento na diferença de consumo em 2050 e, posteriormente, em 2080, houve uma redução aproximando-o aos níveis de 2018. Como exemplo, a inserção do entorno proporcionou esse perfil de consumo em cenários de CA 2,8, dentre os quais o B2T6 foi o que teve a maior redução em 2018, com um valor de 24,21%, que foi incrementado para 27,16% em 2050 e sofreu redução em 2080 para 23,30%.

Com o parâmetro de vegetação, os cenários CA 1,2 apresentaram uma redução maior em 2050 e menor em 2080. Entretanto, houve uma distinção de padrão entre os cenários de CA 2,8, ou seja, C2 continuou reduzindo; B2 reduziu e depois aumentou; e, A2 demonstrou um aumento na demanda, que foi reduzida posteriormente. O cenário mais beneficiado por esse parâmetro foi o de forma urbana C1, com edificações mais esparsadas, em que as árvores também contribuíam como barreira à radiação solar direta.

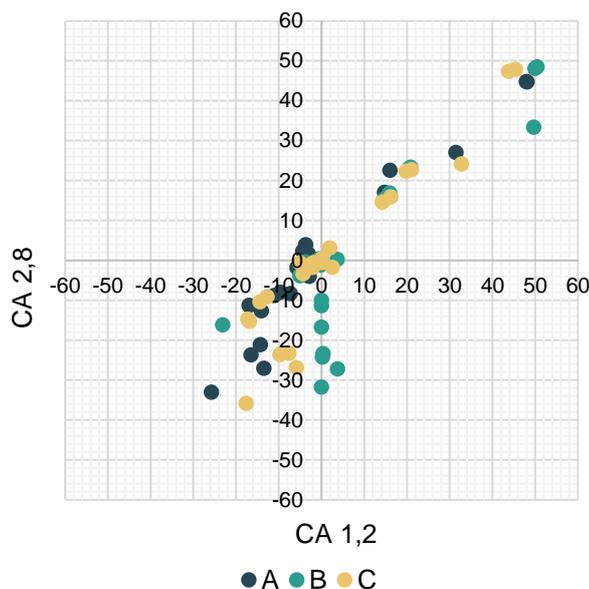
No geral, os parâmetros relacionados diretamente à edificação apresentaram grandes contribuições à redução do consumo, com especial destaque às reduções ocasionadas pelo dispositivo de sombreamento e fator solar dos vidros. Este primeiro elemento foi um dos que mais favoreceram as diminuições de consumo, porém, a influência regrediu ao longo dos anos.

De maneira excepcional, os parâmetros de envoltória – transmitância térmica da parede e o fator solar do vidro – contribuíram pouco para a redução da demanda em A2T6, assim como o aumento a partir das mudanças no uso e porcentagem de abertura nas edificações do entorno. De outro lado, esses mesmos parâmetros mostraram-se relevantes para os cenários de CA 1,2, apenas divergindo em C1T6 com um aumento pelo uso misto do entorno. Vale ressaltar que, nos cenários T4, a profundidade da zona é menor e recebe mais radiação direta, assim como possui uma rápida propagação de calor, sendo fundamental uma envoltória que reduza a troca de calor com o meio externo.

A fim de se analisar o comportamento geral das simulações, no Gráfico 34 foi apresentado o comparativo percentual das modificações realizadas a partir da simulação com o arquivo rural, comumente utilizada simulações de edifícios

residenciais. Os conjuntos de valores representam a relação de cada parâmetro aplicado nas formas A, B e C com os diferentes coeficientes de aproveitamento, incluindo as projeções climáticas e menor taxa de ocupação. Observou-se que, para a mesma edificação, pode ocorrer uma variação de consumo em torno de -40% a 50%, com acréscimos equivalentes em ambos os coeficientes e maior redução em CA 2,8.

Gráfico 34 – Variação de consumo em porcentagem dos parâmetros por combinação construtiva



Fonte: a autora (2021).

De modo geral, devido à configuração do modelo de referência, a edificação principal isolada com arquivo climático rural em cada cenário demonstrou bom desempenho energético, com ressalvas nos anos futuros. Para o intervalo de consumo proposto pelo Centro Brasileiro de Eficiência Energética de Edificações (2018), dos 186 cenários, 88,71% corresponderam a um consumo entre 12,54 kWh/m² e 69,13 kWh/m². Aqueles com consumo superior foram verificados em 2050 e 2080, sendo que, em B1T6, apenas o cenário rural apresentou-se dentro do intervalo de dados citado.

A redução da eficiência em cenários futuros pode ser verificada, também, na classificação dos cenários de acordo com os níveis de eficiência do Programa Nacional de Conservação de Energia Elétrica (2013), apresentada na Tabela 9. Além das projeções climáticas, os cenários foram influenciados negativamente ao serem adaptados à menor taxa de ocupação. Entretanto, apesar das modificações pelos parâmetros selecionados, 47,31% dos cenários permaneceram com a eficiência A.

O cenário B1 se apresentou como de baixo desempenho na maioria dos cenários, possuindo 10 cenários de eficiência C e 4 sendo D em 2080. Neste mesmo ano, foi constatado que todos os cenários se apresentaram com a mesma eficiência D ao serem simulados com o arquivo climático urbano sem a interferência de sombreamento externo, chegando ao consumo de 85,86 kWh/m² em B1T6.

Tabela 9 – Classificação dos cenários por níveis de eficiência energética

Eficiência	Quantidade de cenários	Porcentagem (%)
A	88	47,31
B	44	23,66
C	44	23,66
D	10	5,38
E	0	0

Fonte: a autora (2021).

Foi possível observar que o desempenho energético da edificação pode sofrer alteração a partir de elementos externos, como o clima e contexto urbano. Dentre estes, destacaram-se os benefícios gerados pelo sombreamento do entorno e os efeitos adversos ocasionados pelas alterações no clima urbano, nos quais a ilha de calor se soma às mudanças climáticas.

Assim sendo, diante das possibilidades de incremento no consumo por resfriamento da edificação, no Quadro 11 foram estruturadas proposições para o ambiente construído de acordo com as características físicas e climáticas selecionadas para o estudo. Alguns parâmetros demonstraram que as intensidades das influências estão correlacionadas à forma urbana, densidade construtiva e combinação com outros elementos urbanos.

Quadro 11 – Proposições à eficiência energética em áreas intraurbanas

(continua)

Características físicas	Proposições ao ambiente construído
A: Construções centralizadas no lote com afastamento lateral irregular	<ul style="list-style-type: none"> • Buscar orientação de proteção às maiores áreas de fachadas; • Priorizar a pavimentação de concreto; • Considerar a pavimentação de asfalto com vegetação urbana no cenário adensado; • Aplicar médio a maior albedo nas paredes; • Evitar altos albedos na cobertura em cenário adensado; • Evitar alternância de edifícios com diferentes usos no cenário adensado, prezando, neste caso, por afastamentos laterais maiores; • Ampliar a porcentagem de áreas verdes pela área total; • Otimizar a envoltória da construção a partir da transmitância térmica da parede, fator solar do vidro e uso de veneziana.

Quadro 11 – Proposições à eficiência energética em áreas intraurbanas

(conclusão)

B: Loteamentos e afastamentos frontais regulares	<ul style="list-style-type: none"> • Considerar a pavimentação de asfalto com vegetação urbana no cenário menos adensado; • Aplicar médio a maior albedo nas paredes; • Evitar altos albedos na cobertura; • Facilitar o sombreamento externo no cenário menos adensado; • Ampliar a porcentagem de áreas verdes pela área total; • Otimizar a envoltória da construção a partir da transmitância térmica da parede, fator solar do vidro e uso de veneziana.
C: Pátio central e lotes irregulares	<ul style="list-style-type: none"> • Evitar o uso do pavimento asfalto; • Combinar o pavimento concreto com vegetação urbana; • Aplicar médio a maior albedo nas paredes; • Evitar altos albedos na cobertura em cenário adensado; • Evitar alternância de edifícios com diferentes usos no cenário adensado, prezando, neste caso, por afastamentos laterais maiores; • Ampliar a porcentagem de áreas verdes pela área total; • Otimizar a envoltória da construção a partir da transmitância térmica da parede, fator solar do vidro e uso de veneziana.

Fonte: a autora (2021).

A aplicação das proposições nas ações de planejamento urbano local deve ocorrer, além do direcionamento estratégico de áreas urbanas de expansão, em melhorias no desenho urbano existente. Fundamentadas em estudos consolidados sobre a temática e as proposições supracitadas, destacam-se algumas diretrizes urbanas voltadas à amenização do desconforto externo a fim de reduzir o consumo energético por resfriamento, sendo elas:

- Quando situada em áreas predominantemente residenciais, a inserção de edificações de uso comercial deve considerar afastamentos laterais maiores. Recomenda-se, para estes espaços – de usos residencial e comercial –, o acesso público e áreas permeáveis como medidas passíveis de compensação fiscal;
- As edificações devem prezar por maiores valores de albedo nas paredes junto aos valores médios na cobertura e, de preferência, o uso de materiais com propriedades de alta reflexão da radiação infravermelha, conhecidos como materiais frios;
- A pavimentação de alto albedo é indicada para áreas com baixas proporções de cânion urbano e para as vias locais de baixa circulação de veículos. Além do potencial de irradiação em cânions mais estreitos, esse material pode inferir no desempenho dos motoristas e conforto de pedestres devido ao potencial efeito refletivo nas superfícies e ofuscamento visual.

- Sugere-se o aumento de área permeável nos terrenos e a sua aplicação ao meio urbano, em vias públicas e espaços livres, por meio de uma proporção mínima de áreas verdes relacionada às áreas dos lotes. É preferível a adoção de vegetação nativa, visto a baixa necessidade de manutenção e a tendência de adaptação às condições ambientais locais.
- A inserção de vegetação em locais de pavimentação de asfalto e paredes de alto albedo, principalmente em cenário adensado, é indicada para garantir a amenização do desconforto ao pedestre ao mesmo tempo em que amplia a eficiência do edifício.

Cabe ressaltar que as estratégias edilícias apresentaram resultados mais satisfatórios para a amenização do consumo e, quando alinhadas às melhorias tanto das áreas públicas quanto das envoltórias de edificações circunvizinhas, favoreceram o equilíbrio do balanço energético local. Portanto, sendo as cidades compostas por áreas intraurbanas com propriedades particulares, são definidos padrões de consumo de energia a serem analisados individualmente e, assim, buscar soluções para atenuar a demanda energética de toda uma região.

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

As cidades situadas em regiões de clima quente e úmido são mais propensas às consequências do aumento da temperatura advindas de fenômenos do clima. Já se sabe que, impulsionada pelo crescimento da economia, a eletricidade voltada para o resfriamento de ambientes internos continuará crescendo e poderá contribuir para picos de demanda energética no período do verão. O estudo visou a compreensão do desempenho energético da edificação de uso residencial, tendo como estudo de caso a cidade de Vitória (ES, Brasil), frente aos parâmetros do contexto urbano, com destaque para o clima modificado pela ilha de calor e as mudanças climáticas.

A metodologia utilizada no estudo demonstrou-se satisfatória para avaliação desde uma única edificação à escala da cidade, visto que a alteração de um conjunto de parâmetros construtivos pode acarretar em locais intraurbanos com maiores consumos de energia. Ademais, mesmo com a simplificação do contexto urbano na mesoescala, a consideração de fenômenos climáticos revelou-se notável em simulações de desempenho termoenergético, reforçando ainda mais a necessidade de se adotar estratégias projetuais em conformidade com as condicionantes externas a longo prazo.

As estratégias a serem adotadas devem ponderar a eficiência da edificação com o conforto térmico externo ao nível do pedestre. Ressalta-se que, a princípio, devem ser realizadas melhorias construtivas na área privada dos lotes, sendo as áreas urbanas privilegiadas pelo caráter coletivo. Para amenizar os impactos nas cidades, sugere-se a compensação de índices construtivos pelas áreas de afastamento utilizáveis, ampliação de vegetação urbana e materialidade adequada da envoltória.

Atualmente, frente a um cenário de pandemia e de ascensão à alternativa de trabalho remoto, os moradores foram incentivados a permanecerem por mais tempo em suas residências e, na ausência de estratégias passivas de conforto nas edificações, tiveram que buscar meios alternativos de manter o ambiente termicamente agradável, especialmente em horários do dia em que não estavam acostumados a permanecer. Para esse fim, o dispositivo de sombreamento é um elemento diferencial nas edificações brasileiras por controlar a radiação incidente no ambiente, contribuindo na regulação da temperatura interna. Porém, os resultados indicaram uma redução da

sua eficiência até 2080, fazendo-se necessária a adoção de outras estratégias concomitantemente.

Já em andamento, a demanda energética total se encontra propensa ao maior consumo de energia direcionado ao resfriamento do ar interno, principalmente em edificações situadas em regiões de clima tropical. A modificação do arquivo climático evidenciou meses mais quentes em todo o ano, com destaque para as temperaturas alcançadas nos meses do verão, como era de se esperar. Essas variações nos dados de clima, com o efeito de ilha de calor e mudanças climáticas, além de contribuírem para as intensidades de calor, impulsionaram o consumo energético, em maior quantidade no último pavimento da edificação, influenciados pela ação da cobertura.

Dentre os parâmetros analisados, o sombreamento ocasionado pelo entorno foi o que ofereceu mais retorno de atenuação do consumo à edificação, chegando a superar os acréscimos advindos do clima. Neste sentido, presume-se que áreas urbanas adensadas são favoráveis ao desempenho energético, desde que a conformação construtiva e materialidade estejam alinhadas à mitigação da ilha de calor. Por outro lado, considerando a maior suscetibilidade de locais pouco adensados às altas temperaturas e a falta de sombreamento, as edificações comumente implantadas na condição isolada em grandes terrenos, como, por exemplo, as de uso institucional, reiteram a necessidade de se condicionar a edificação aos fenômenos climáticos em simulações energéticas computacionais.

Naturalmente, a modelagem energética de edifícios urbanos demanda um processamento computacional excedente devido à inclusão de outros parâmetros no sistema de simulação para o edifício individual. Por conseguinte, visando simulações mais rápidas com bom desempenho, a modelagem deve ser simplificada e validada com diferentes recursos, como o uso de zonas perimetrais. O manuseio dessas zonas foi um dos limitantes da pesquisa, em virtude de, paralelamente à possibilidade de modelagem em maior escala, a avaliação do desempenho termoenergético do edifício principal não ser pautada em níveis de eficiência nacionais compatíveis à metodologia adotada.

Por sua vez, o fluxo de trabalho no *Grasshopper* proporcionou uma sucessão de avaliações térmicas e energéticas, conectadas facilmente pelos diferentes

componentes da interface. Em constante atualização, a nova versão do *Urban Weather Generator* permite um estudo ainda mais preciso da influência de ilha de calor ao incluírem parâmetros com detalhes construtivos e dos sistemas de condicionamento artificial. Além disso, algumas funções podem ser associadas ao *Envi-met*, uma ferramenta de análises microclimáticas e, quanto aos elementos de vegetação e solo, sugere-se uma modelagem mais apurada, visto que o *EnergyPlus* não capta todas as possibilidades de trocas de calor.

Os resultados foram satisfatórios para um contexto urbano amplo. Entretanto, não foram observados outros fatores importantes no balanço energético urbano, tais como os dados de radiação solar nas fachadas; a proximidade ao mar; e a análise fluidodinâmica. Esta última avaliação considera as mudanças de direção e velocidades do vento pelas massas construtivas do entorno, que demandaria a integração com outros componentes e maiores recursos computacionais. Ademais, vale ressaltar que os resultados com elementos arbóreos apontaram limitações na modelagem, uma vez que ajudaram a reter o calor do cânion urbano abaixo da copa e, assim, aumentar a temperatura do ar nesses espaços.

Além de tudo, a ferramenta permitiu a parametrização das zonas urbanas a partir de diferentes índices de forma urbana. A diversidade de cenários criados proporcionou análises individuais de eficiência e o comparativo de consumo entre eles, reforçando que as cidades são caracterizadas por subáreas, com demandas energéticas e premissas estratégicas particulares. Portanto, os dados de cada cenário podem ser tomados como médias de recortes territoriais com mesmas relações construtivas, taxas de áreas permeáveis e, principalmente, clima local.

Para pesquisas futuras, sugere-se a:

- Aplicação de modelos climáticos globais atualizados pelos novos relatórios do IPCC e comparação das variáveis climáticas modificadas ao contexto urbano;
- Integração das análises fluidodinâmicas e microclimáticas à configuração do sistema de simulação para a geração de relatórios completos sobre as mudanças no clima e seus efeitos sob o desempenho energético da edificação;

- Adoção dos procedimentos metodológicos com edificações principais de uso institucional, em especial os de caráter público, com parametrização das formas construtivas e configuração de áreas externas;
- Ampliação do horário de permanência dos residentes nas edificações e, conseqüentemente, tendência ao maior uso diário de condicionamento artificial;
- Verificação do desempenho termoenergético das edificações com diferentes tecnologias construtivas, incluindo materiais frios e superfícies (parede e cobertura) verdes;
- Avaliação de demanda energética de todo o recorte territorial e geração de energia alternativa, visando o diagnóstico abrangente de uma vizinhança ou bairro para aplicação de estratégias intraurbanas adequadas.

REFERÊNCIAS

- ABOULNAGA, M. M.; ELWAN, A. F.; ELSHAROUNY, M. R. **Urban Climate Change Adaptation in Developing Countries: Policies, Projects and Scenarios**. Springer Nature Switzerland AG. 2019. 265p.
- ACCIOLY, S. M. de L.; MACHADO, F. L. V.; VASCONCELOS, F. C. W.; BRITO, L. L. A. de. Análise comparativa de programas municipais de IPTU verde. *In: XI CONGRESSO BRASILEIRO DE GESTÃO AMBIENTAL – INSTITUTO BRASILEIRO DE ESTUDOS AMBIENTAIS*, Vitória, 2020. **Anais [...]**. Vitória. 2020. Disponível em: <http://www.ibeas.org.br/congresso/Trabalhos2020/XI-027.pdf>. Acesso em: 28 jun. 2021.
- ALCHAPAR, N. L.; PEZZUTO, C. C.; CORREA, E. N.; SALVATI, A. Thermal Performance of The Urban Weather Generator Model as a Tool for Planning Sustainable Urban Development. **Geographica Pannonica**, v. 23, n. 3, p. 374-384. 2019. Disponível em: <https://aseestant.ceon.rs/index.php/geopan/article/view/24254/8744>. Acesso em: 08 jun. 2020.
- ALLEGRI, J.; OREHOUNING, K.; MAVROMATIDIS, G.; RUESCH, F.; DORER, V.; EVINS, R. A review of modelling approaches and tools for the simulation of district-scale energy systems. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 52, p. 1391-1404. 2015. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364032115007704>. Acesso em: 03 jul. 2021.
- ALVAREZ, C. E. de; BRAGANÇA, L. **Comunidades urbanas energeticamente eficientes: formação de recursos humanos para a promoção de bairros urbanos energeticamente sustentáveis**. Vitória: EDUFES, 2016. 275p.
- _____. Medidas para o Enfrentamento dos Impactos das Mudanças Climáticas no Ambiente Construído. *In: SUSTENTABILIDADE URBANA – 14ª JORNADA URBENERE E 2ª JORNADA CIRES*, 1., Vila Velha, 2018. **Anais [...]**. Vila Velha. 2018. p. 3-12. Disponível em: http://repositorium.sdum.uminho.pt/bitstream/1822/59308/1/6-URBENERE__CIRES_2018_paper_372.pdf. Acesso em: 18 dez. 2020.
- AMERICAN SOCIETY OF HEATING, REFRIGERATING AND AIR-CONDITIONING ENGINEERS (ASHRAE). **Standard 140-2001**: Standard Method of Test for the Evaluation of Building Energy Analysis Computer Programs. 2004.
- _____. **Standard 90.1**: Energy Standard for Buildings Except Low-Rise Residential Buildings. 2013.
- _____. **2017 ASHRAE Handbook – Fundamentals** (SI). Atlanta. 2017.
- _____. **Standard 90.1**: Energy Standard for Buildings Except Low-Rise Residential Buildings (I-P Edition). 2019.

AMORIM, M.C.C.T. Ilhas de calor urbanas: métodos e técnicas de análise. **Revista Brasileira de Climatologia**, ano 15, p. 22-46. 2019. Disponível em: <https://revistas.ufpr.br/revistaabclima/article/view/65136/38759>. Acesso em: 19 dez. 2019.

ASSIS, E. S. de. A abordagem do clima urbano e aplicações no planejamento da cidade: reflexões sobre uma trajetória. *In*: ENCONTRO NACIONAL E IV ENCONTRO LATINO-AMERICANO SOBRE CONFORTO NO AMBIENTE CONSTRUÍDO, Maceió, 2005. **Anais [...]**. Maceió. 2005. p. 92-101.

ASSIS, E. S. de; RAMOS, J. G. L.; SOUZA, R. V. G. de; CORNACCHIA, G. M. M. Aplicação de dados do clima urbano no desenvolvimento de planos diretores de cidades mineiras. *In*: IX Encontro Nacional e V Latino Americano de Conforto no Ambiente Construído, Ouro Preto, 2007. **Anais [...]**. Ouro Preto. 2007. p. 152-161.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **Desempenho térmico de edificações – Parte 2**: Métodos de cálculo da transmitância térmica, da capacidade térmica, do atraso térmico e do fator solar de elementos e componentes de edificações. Rio de Janeiro. 2003a. 21p.

_____. **Desempenho térmico de edificações – Parte 3**: Zoneamento bioclimático brasileiro e diretrizes construtivas para habitações unifamiliares de interesse social. Rio de Janeiro, 2003b. 23p.

_____. **NBR 15.575**: Edificações Habitacionais – Desempenho. Rio de Janeiro, 2013.

_____. **Edificações habitacionais – Desempenho Parte 1**: Requisitos Gerais. Emenda ABNT NBR 15575-1:2013. 2021a. Disponível em: https://labeee.ufsc.br/sites/default/files/documents/P_ABNTNBR15575_1_2020CNG_PR_PosCN_SiteLabEEE.pdf. Acesso em: 04 mai. 2021.

_____. **Edificações habitacionais – Desempenho Parte 4**: Requisitos Gerais. Emenda ABNT NBR 15575-4:2013. 2021b. Disponível em: https://labeee.ufsc.br/sites/default/files/documents/P_ABNTNBR15575_4_2020CNG_PR_PosCN_SiteLabEEE.pdf. Acesso em: 04 mai. 2021.

AKKOSE, A.; AKGUL, C. M.; DINO, I. G. Educational Building retrofit under climate change and urban heat island effect. **Journal of Building Engineering**, v. 40, p. 102294. 2021. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2352710221001509>. Acesso em: 14 abr. 2021.

AYDIN, E.E.; JAKUBIEC, J.A. Sensitivity Analysis of Sustainable Urban Design Parameters: Thermal Comfort, Urban Heat Island, Energy, Daylight and Ventilation in Singapore. *In*: PROCEEDINGS OF THE BUILDING SIMULATION AND OPTIMIZATION 2018 CONFERENCE, Cambridge, 2018. **Proceedings [...]**. 2018. p. 11-12. Disponível em: <http://www.ibpsa.org/proceedings/BSO2018/2A-4.pdf>. Acesso em: 05 mai. 2020.

AYLAS, Y.G.R.; CORREA, W.de S.C.; SANTIAGO, A.M.; JUNIOR, N.C.R.; ALBUQUERQUE, T.T.de A.; SANTOS, J.M.; MOREIRA, D.M. Influence of land use on the performance of the WRF model in a humid tropical climate. **Theoretical and Applied Climatology**, v. 141, p. 201-214. 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s00704-020-03187-3>. Acesso em: 04 mai. 2021.

BANDE, L.; AFSHARI, A.; MASRI, D. A.; JHA, M.; NORFORD, L.; TSOUPOS, A.; MARPU, P.; PASHA, Y.; ARMSTRONG. Validation of UWG and ENVI-Met Models in an Abu Dhabi District, Based on Site Measurements. **Sustainability**, v. 11, p. 4378.2019. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2071-1050/11/16/4378/pdf>. Acesso em: 28 ago. 2020.

BARANDIER, H.; ALMEIDA, M.C.T.S.de; MORAES, R. **Planejamento e controle ambiental-urbano e a eficiência energética**. Rio de Janeiro: IBAM/DUMA; ELETROBRAS/PROCEL. 2013. 220p.

BARBIRATO, G. M.; TORRES, S. C.; SOUZA, L. C. L. de. **Clima urbano e eficiência energética nas edificações**. Rio de Janeiro: PROCEL Edifica, Eletrobrás. 2011. 118p.

BELCHER, S.E.; HACKER, J. N.; POWELL, D. S. Constructing design weather data for future climates. **Building Services Engineering Research and Technology**, v. 26, p. 49-61. 2005. Disponível em: <https://doi.org/10.1191/0143624405bt112oa>. Acesso em: 05 mai. 2021.

BEZERRA, P.; SILVA, F. da; CRUZ, T.; MISTRY, M.; VASQUEZ-ARROYO, E.; MAGALAR, L.; DE CIAN, E.; LUCENA, A. F. P.; SCHAEFFER, R. Impacts of a warmer world on space cooling demand in Brazilian households. **Energy & Buildings**, v. 234, p. 110696. 2021. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0378778820334824>. Acesso em: 05 ago. 2021.

BOCCALATTE, A.; FOSSA, M.; MÉNÉZO, C. Best arrangement of BIPV surfaces for future NZEB districts while considering urban heat island effects and the reduction of reflected radiation from solar façades. **Renewable Energy**, v. 160, p. 686-697. 2020. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0960148120311332>. Acesso em: 28 ago. 2020.

BRASIL. **Constituição da República Federativa do Brasil de 1988**. Brasília. 1988.

_____. **Lei nº 10.257/2001**. Brasília. 2001.

_____. **Política Nacional sobre Mudança do Clima – PNMC**. Brasília. 2009.

_____. **Conheça o Ministério do Desenvolvimento Regional (MDR)**. 2019. Disponível em: <https://www.mdr.gov.br/ultimas-noticias/6635-conheca-o-ministerio-do-desenvolvimento-regional-mdr>. Acesso em: 28 fev. 2020.

BUENO, B.; PIGEON, G.; NORFORD, L.K.; ZIBOUCHE, K.; MARCHADIER, C. Development and evaluation of a Building energy model integrated in the TEB scheme. **Geoscientific Model Development**, v. 5, p. 433-448. 2012. Disponível em: www.geosci-model-dev.net/5/433/2012/. Acesso em: 08 jun. 2020.

BUENO, B.; NORFORD, L.; HIDALGO, J.; PIGEON, G. The urban weather generator. **Journal of Building Performance Simulation**, v. 6, n.4, p. 269-281. 2013. DOI: 10.1080/19401493.2012.718797. Acesso em: 11 dez. 2020.

BUENO, B.; MATTHIAS, R.; NORFORD, L.; LI, R. Computationally efficient prediction of canopy level urban air temperature at the neighbourhood scale. **Urban Climate**, v. 9, p. 35-53. 2014. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S221209551400039X>. Acesso em: 18 set. 2019.

CALLEJAS, I. J. A.; APOLONIO, R. M.; GUARDA, E. L. A. D.; DURANTE, L. C.; de ANDRADE CARVALHO ROSSETI, K.; ROSETA, F.; AMARANTE, L. M. D. Bermed Earth-Sheltered Wall for Low-Income House: Thermal and Energy Measure to Face Climate Change in Tropical Region. **Applied Sciences**, v. 11, p. 420. 2021. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2076-3417/11/1/420/pdf>. Acesso em: 17 mai. 2021.

CASAGRANDE, B. G.; ALVAREZ, C. E. de. Preparação de arquivos climáticos futuros para avaliação dos impactos das mudanças climáticas no desempenho termoenergético de edificações. **Ambiente Construído**. Porto Alegre, v. 13, n. 4, p. 173-187. 2013.

CCWORLDWEATHERGEN. **Climate change world weather file generator software**. Versão 1.9. 2017.

CENTRO BRASIL NO CLIMA (CBC). **Governadores pelo Clima**. 2020. Disponível em: <https://www.centrobrasilnoclima.org/acoes/-Governadores-pelo-Clima->. Acesso em: 05 ago. 2021.

CENTRO BRASILEIRO DE EFICIÊNCIA ENERGÉTICA EM EDIFICAÇÕES (CB3E). **Proposta de Instrução Normativa Inmetro para a Classe de Eficiência Energética de Edificações Residenciais – Núcleo Residencial**. 2018. Disponível em: <https://cb3e.ufsc.br/sites/default/files/2018-09-25-INI-R%20-%20Vers%C3%A3o02.pdf>. Acesso em: 28 dez. 2020.

CHEN, Y.; HONG, T. Impacts of Building geometry modeling methods on the simulation results of urban energy models. **Applied Energy**, v. 215, p. 717-735. 2018. Disponível em: <https://www.osti.gov/servlets/purl/1436674>. Acesso em: 16 jan. 2021.

CHOKHACHIAN, A.; PERINI, K.; GIULINI, S.; AUER, T. Urban performance and density: Generative study on interdependencies of urban form and environmental measures. **Sustainable Cities and Society**, v. 53, p. 101952. 2020. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2210670719309850>. Acesso em: 05 mai. 2020.

DAVILA, C. C.; REINHART, C. F.; BEMIS, J. L. Modeling Boston: A workflow for Generation of complete urban Building energy demand models from existing urban geospatial datasets. **Energy**, v. 117, p. 237-250. 2016. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0360544216314918>. Acesso em: 21 out. 2019.

DUAN, S.; LUO, Z.; YANG, X.; LI, Y. The impact of Building operations on urban heat/cool islands under urban densification: A comparison between naturally-ventilated and air-conditioned buildings. **Applied Energy**, v. 235, p. 129-138. 2019. Disponível em: http://centaur.reading.ac.uk/80227/1/VincentLuo%20UrbanHlbuildmodel_revision_clean.pdf. Acesso em: 03 mai. 2021.

ELETROBRAS. **Relatório de resultados do Procel 2019**: ano base 2018. Rio de Janeiro: PROCEL, 2019. 65 p. Disponível em: <http://www.procelinfo.com.br/main.asp?View=%7B5A08CAF0-06D1-4FFE-B335-95D83F8DFB98%7D&Team=¶ms=itemID=%7B675604FD-860E-4405-813E-8BD9D5BB54FB%7D;&UIPartUID=%7B05734935-6950-4E3F-A182-629352E9EB18%7D>. Acesso em: 21 dez. 2019.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA (EPE). **Considerações sobre o Comportamento do Consumidor** – Documento de Apoio ao PNE 2050. Rio de Janeiro, 2018a. Disponível em: <http://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-227/topico-457/Comportamento%20do%20Consumidor.pdf>. Acesso em: 21 nov. 2019.

_____. **Mudanças Climáticas e Desdobramentos sobre os Estudos do Planejamento Energético**: Considerações Iniciais – Documento de Apoio ao PNE 2050. Rio de Janeiro, 2018b. Disponível em: <http://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-227/topico-457/Mudancas%20Climaticas%20e%20Planejamento%20Energetico.pdf>. Acesso em: 21 nov. 2019.

_____. **Anuário estatístico de energia elétrica 2021** – Ano base 2020. 2021. Disponível em: <https://www.epe.gov.br/pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/anuario-estatistico-de-energia-eletrica>. Acesso em: 20 jun. 2021.

ENERGY AND CLIMATE CHANGE DIVISION. **Climate Change World Weather File Generator for World-Wide Weather Data** – CCWorldWeatherGen. University of Southampton. 2021. Disponível em: <https://energy.soton.ac.uk/ccworldweathergen/>.

ENERGYPLUS. **Programa de Simulação de Energia do Edifício**. 2019. Disponível em: <https://www.energy.gov/eere/buildings/downloads/energyplus-0>. Acesso em: 15 jan. 2019.

ENTERIA, N.; SANTAMOURIS, M.; EICKER, U. **Urban Heat Island (UHI) Mitigation**: Hot and Humid Regions. Advances in 21st Century Human Settlements (ACHS). Singapore: Springer. 2021. 307p.

EVOLA, G.; COSTANZO, V.; MAGRÌ, C.; MARGANI, G.; MARLETTA, L.; NABONI, E. A novel comprehensive workflow for modelling outdoor thermal comfort and energy demand in urban canyons: Results and critical issues. **Energy & Buildings**, v. 2016, p. 109946. 2020. Disponível em:

<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0378778820300773>. Acesso em: 15 mai. 2020.

FERRANDO, M.; CAUSONE, F.; HONG, T.; CHEN, Y. Urban Building energy modeling (UBEM) tools: A state-of-the-art review of bottom-up physics-based approaches. **Sustainable Cities and Society**, v. 62, p. 102408. 2020. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2210670720306296>. Acesso em: 08 dez. 2020.

FERREIRA, M. J.; DE OLIVEIRA, A. P.; SOARES, J. Anthropogenic heat in the city of São Paulo, Brazil. **Theoretical and Applied Climatology**, v. 104, p. 43–56. 2011. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s00704-010-0322-7>. Acesso em: 17 mai. 2021.

FERREIRA, G. A. C.; FERREIRA, G. L.; RODRIGUES, P. M. Planos diretores municipais e o estudo integrado de uso e ocupação do solo e circulação urbana da Região Metropolitana da Grande Vitória. *In*: LYRA, A. P. R. *et al.* **Cidade e Metrópole**: Coleção Arquitetura e Cidade. Vol. 1. Rio de Janeiro: Observatório das Metrópoles, 2019. 287p.

FIALHO, E. S.; FERNANDES, L. A.; CORREA, W. de S. C. Climatologia urbana: Conceitos, metodologias e técnicas. **Revista Brasileira de Climatologia**, ano 15. 2019. Disponível em: <https://revistas.ufpr.br/revistaabclima/article/view/65748/38760>. Acesso em: 28 jun. 2021.

GARTLAND, L. **Heat Islands**: Understanding and mitigating heat in urban areas. Earthscan. 2008. 192p.

GIROTTI, C.; MARINS, K. R. de C.; LARA, A. H. Análise da morfologia urbana para maximização de geração de energia fotovoltaica no Belenzinho, em São Paulo. **Ambiente Construído**, Porto Alegre, v. 19, n. 4, p. 7-22. 2019. Disponível em: <https://www.scielo.br/pdf/ac/v19n4/1678-8621-ac-19-04-0007.pdf>. Acesso em: 28 abr. 2021.

GITHUB. **UWG**. Ladybug-tools. 2021. Disponível em: <https://github.com/ladybug-tools/uwg>.

_____. **Trees in Outdoor Thermal Comfort**. 2016. Disponível em: <https://hydrashare.github.io/hydra/index.html>.

GOMES, P.S.; LAMBERTS, R. O estudo do clima urbano e a legislação urbanística: considerações a partir do caso Montes Claros, MG. **Ambiente Construído**. Porto Alegre, v.9, n. 1, p 73-91. 2009. Disponível em: <https://seer.ufrgs.br/ambienteconstruido/article/view/6916/5041>. Acesso em: 15 jan. 2020.

GONÇALVES, J. C. S.; BODE, K. **Edifício ambiental**. São Paulo: Oficina de Textos. 2015.

GOOGLE EARTH. Versão Pro. 2019. **Vitória no Espírito Santo**. 2019.

GRASSHOPPER3D. **Grasshopper**. 2021. Disponível em: <https://www.grasshopper3d.com/>.

HAO, S.; HONG, T. The Application of Urban Building Energy Modeling in Urban Planning. In: ANDREUCCI, M. B.; MARVUGLIA, A.; BALTOV, M.; HANSEN, P. **Rethinking Sustainability Towards a Regenerative Economy**. Future City (FUCI), v. 15. 2021. 418p.

HIGUERAS, E. **Urbanismo bioclimático**: Criterios medioambientales em la ordenación de asentamientos. Cuadernos de Investigación Urbanística. 1998. 80p.

HONG, T.; CHEN, Y.; LUO, X.; LUO, N.; LEE, S. H. Ten questions on urban building energy modeling. **Building and Environment**, v. 168, n. August 2019, p. 106508, 2020. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0360132319307206>. Acesso em: 12 nov. 2019.

INSTITUTO ESTADUAL DE MEIO AMBIENTE E RECURSOS HÍDRICOS (IEMA). **Relatório da Qualidade do Ar Grande Vitória 2018**. 2019. Disponível em: https://iema.es.gov.br/Media/iema/CQAI/Relatorios_anuais/Relat%C3%B3rio_Anuual_da_Qualidade_do_Ar_2018_1.pdf. Acesso em: 08 jan. 2019.

INSTITUTO NACIONAL DE METEOROLOGIA (INMET). **Normais climatológicas do Brasil: Período 1981-2010**. Disponível em: <https://portal.inmet.gov.br/normais>. Acesso em: 05 mai. 2021.

INSTITUTO NACIONAL DE METROLOGIA, QUALIDADE E TECNOLOGIA (INMETRO). **Regulamento Técnico da Qualidade para o Nível de Eficiência Energética de Edificações Residenciais (RTQ-R)**. 2012. Disponível em: <http://www.pbeedifica.com.br/sites/default/files/projetos/etiquetagem/residencial/downloads/RTQR.pdf>. Acesso em: 28 nov. 2019.

_____. **Anexo Geral V – Catálogo de propriedades térmicas de paredes, coberturas e vidros**. Anexo da portaria INMETRO n. 50. 2013. Disponível em: <http://www.inmetro.gov.br/consumidor/produtosPBE/regulamentos/AnexoV.pdf>. Acesso em: 17 jan. 2020.

_____. **Proposta de alteração da Instrução Normativa Inmetro para a Classificação de Eficiência Energética de Edificações Residenciais**. Consulta Pública nº 18, de 12 de julho de 2021. 2021. Disponível em: <http://www.inmetro.gov.br/legislacao/rtac/pdf/RTAC002807.pdf>. Acesso em: 06 out. 2021.

INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE (IPCC). **Climate Change 2007: The Physical Science Basis**. Contribution of Working Group I to the Fourth

Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. 996 p. 2007. Disponível em: https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/05/ar4_wg1_full_report-1.pdf. Acesso em: 08 nov. 2019.

INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE (IPCC). **Climate Change 2014**: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. 151 p. 2014. Disponível em: https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/05/SYR_AR5_FINAL_full_wcover.pdf. Acesso em: 21 jan. 2020.

_____. **Data Distribution Centre (DDC)**. Disponível em: <https://www.ipcc-data.org/>. 2019. Acesso em: 07 jun. 2020.

INTERNATIONAL ENERGY AGENCY (IEA). **Space cooling**: more access, more comfort, less energy. Energy Efficiency Insights Brief. 2017. Disponível em: <https://webstore.iea.org/insights-brief-space-cooling>. Acesso em: 08 nov. 2019.

_____. **Climate Resilience**: Electricity Security. 2021. Disponível em: <https://www.iea.org/reports/climate-resilience>. Acesso em: 15 jun. 2021.

JAVANROODI, K.; MOHAMMADJAVAD, M.; NIK, V. M. Impacts of urban morphology on reducing cooling load and increasing ventilation potential in hot-arid climate. **Applied Energy**, v. 231, p. 714-746. 2018. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0306261918314260>. Acesso em: 13 mai. 2020.

JENTSCH, M.F.; JAMES, P.A.B.; BOURIKAS, L.; BAHAJ, A.S. Transforming existing weather data for worldwide locations to enable energy and building performance simulation under future climates. **Renewable Energy**, v. 55, p. 514-524. 2013. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0960148113000232>. Acesso em: 05 fev. 2021.

JENTSCH, M. F.; BAHAJ, A. S.; JAMES, P. A. B. **Manual: Climate change world Weather file generator – CCWorldWeatherGen**. Version 1.9. University of Southampton: Faculty of Engineering and the Environment Sustainable Energy Research Group. 2017.

JOHARI, F.; PERONATO, G.; SADEGHIAN, P.; ZHAO, X.; WIDÉN, J. Urban Building energy modeling: State of the art and future prospects. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 128, p. 109902. 2020. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364032120301933>. Acesso em: 13 jul. 2020.

JIA, G.; SHEVLIAKOVA, E.; ARTAXO P.; NOBLET-DUCOUDRÉ N. DE; HOUGHTON R.; HOUSE J.; KITAJIMA K.; LENNARD C.; POPP A.; SIRIN A.; SUKUMAR R.; VERCHOT L. Land-climate interactions. *In*: **Climate Change and Land**: An IPCC Special Report on Climate Change, Desertification, Land

Degradation, Sustainable Land Management, Food Security, And Greenhouse Gas Fluxes in Terrestrial Ecosystems. 2019. 247p.

KRAYENHOFF, E. S.; BROADBENT, A. M.; ZHAO, L.; GEORGESCU, M.; MIDDEL, A.; VOOGT, J. A.; MARTILLI, A.; SAILOR, D. J.; ERELL, E. Cooling hot cities: a systematic and critical review of the numerical modelling literature. **Environmental Research Letters**, v. 16, n. 5, p. 053007. 2021. Disponível em: <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1748-9326/abdcd1/pdf>. Acesso em: 20 abr. 2021.

KRUGER, E. L.; GONZALEZ, D. E. G. Impactos da alteração no albedo das superfícies no microclima e nos níveis de conforto térmico de pedestres em cânions urbanos. **Ambiente Construído**, Porto Alegre, v. 16, n. 3, p. 89-106. 2016. Disponível em: <https://www.scielo.br/pdf/ac/v16n3/1678-8621-ac-16-03-0089.pdf>. Acesso em: 13 jul. 2020.

LABORATÓRIO DE EFICIÊNCIA ENERGÉTICA EM EDIFICAÇÕES (LABEEE). **Arquivos climáticos INMET 2018**. Disponível em: http://www.labeee.ufsc.br/sites/default/files/arquivos_climaticos/2018.zip. Acesso em: 28 jul. 2020.

LADYBUG TOOLS. **Ladybug Tools**. 2021a. Disponível em: <https://www.ladybug.tools/>.

_____. **Dragonfly**. 2021b. Disponível em: <https://www.ladybug.tools/dragonfly.html>.

LAMBERTS, R.; DUTRA, L.; PEREIRA, F. O. R. **Eficiência Energética na Arquitetura**. 3ª Ed. Rio de Janeiro: Eletrobrás/Procel. 2014. 361p.

LAUZET, N.; RODLER, A.; MUSY, M.; AZAM, M.; GUERNOUTI, S.; MAUREE, D.; COLINART. How Building energy models take the local climate into account in an urban context – A review. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 116, p. 109390. 2019. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364032119305982>. Acesso em: 12 nov. 2019.

LI, W.; ZHOU, Y.; CETIN, K.; EOM, J.; WANG, Y.; CHEN, G.; ZHANG, X. Modeling urban building energy use: A review of modeling approaches and procedures. **Energy**, v. 141, p. 2445-2457. 2017. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0360544217319291>. Acesso em: 17 set. 2019.

LI, Z.; ZHENG, S.; LIU, Y.; WANG, Z.; DAI, J. A review of operational energy consumption calculation method for urban buildings. **Building Simulation**, v. 13, p. 739-751. 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s12273-020-0619-0>. Acesso em: 08 dez. 2020.

LIMA, I.; SCALCO, V.; LAMBERTS, R. Estimating the impact of urban densification on high-rise office building cooling loads in a hot and humid climate. **Energy & Buildings**, v. 182, p. 30-44. 2019. Disponível em:

<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0378778818326276>. Acesso em: 28 jan. 2021.

LITARDO, J.; PALME, M.; BORBOR-CORDOVA, M.; CAIZA, R.; MACIAS, J.; HIDALGO-LEON, R.; SORIANO, G. Urban Heat Island intensity and buildings' energy needs in Duran, Ecuador: Simulation studies and proposal of mitigation strategies. **Sustainable Cities and Society**, v. 62, p. 102387. 2020. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2210670720306089>. Acesso em: 28 ago. 2020.

LIU, Y.; LI, Q.; YANG, L.; UM, K.; ZHANG, M.; LIU, J. Urban heat island. effects of various urban morphologies under regional climate conditions. **Science of the Total Environment**, v. 743, p. 140589. 2020. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0048969720341115>. Acesso em: 07 jul. 2020.

MA, R.; REN, B.; ZHAO, D.; CHEN, J.; LU, Y. Modeling urban energy dynamics under clustered urban heat island. effect with local-weather extended distributed adjacency blocks. **Sustainable Cities and Society**, v. 56, p. 102099. 2020. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S221067072030086X>. Acesso em: 07 jul. 2020.

MACHADO, J. de M. Avaliação de desempenho térmico em edificações multifamiliares considerando as mudanças climáticas futuras. 2019. **Dissertação** (Mestrado em Arquitetura e Urbanismo). Programa de Pós-Graduação em Arquitetura e Urbanismo. Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória, 2019a.

MACHADO, R.M.S. Modelagem do impacto da ilha de calor sobre desempenho energético de escritórios condicionados artificialmente. 2019. **Dissertação** (Mestrado em Engenharia Civil). Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil. Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2019b.

MAO, J.; YANG, J.H.; AFSHARI, A.; NORFORD, L. Global sensitivity analysis of an urban microclimate system under uncertainty: Design and case study. **Building and Environment**, v. 124, p. 153-170. 2017. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0360132317303578>. Acesso em: 08 jun. 2020.

MARTINS, T.A.L., FARAUT, S., ADOLPHE, L. Influence of context-sensitive urban and architectural design factors on the energy demand of buildings in Toulouse, France. **Energy & Buildings**. 190, p. 262-278. 2019. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0378778818328081>. Acesso em: 15 nov. 2019.

MARTINS, T. A. de L.; BONHOMME, M.; ADOLPHE, L. Análise do impacto da morfologia urbana na demanda estimada de energia das edificações: um estudo de caso na cidade de Maceió, AL. **Ambiente Construído**, v. 13, n. 4, p. 213-233. 2013. Disponível em: <https://www.scielo.br/pdf/ac/v13n4/v13n4a15.pdf>. Acesso em: 27 nov. 2019.

MASSACHUSETTS INSTITUTE OF TECHNOLOGY (MIT). **Urban Weather Generator**. Urban Microclimate – Building Technology Program. 2014. Disponível em: <https://urbanmicroclimate.scripts.mit.edu/uwg.php>.

MASSON, V. A physically-based scheme for the urban energy budget in atmospheric models. **Boundary-Layer Meteorology**, v. 94, p. 357-397. 2000. Disponível em: https://www.cnrm-game.fr/IMG/pdf/masson_2000_blm.pdf. Acesso em: 17 jun. 2021.

MAUREE, D.; NABONI, E.; COCCOLO, S.; PERERA, A. T. D.; Nik, V. M.; SCARTEZZINI, J. A review of assessment methods for the urban environmental and its energy sustainability to guarantee climate adaptation of future cities. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 112, p. 733-746. 2019. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364032119303909>. Acesso em: 19 mar. 2020.

MCNEEL & ASSOCIATES. **Rhinoceros**. Disponível em: <https://www.rhino3d.com/>. Acesso em: 7 mai. 2021.

MI, Z.; GUAN, D.; LIU, Z.; LIU, J.; VIGUIÉ, V.; FROMER, N.; WANG, Y. Cities: The core of climate change mitigation. **Journal of Cleaner Production**, v. 207, p. 582-589. 2019. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0959652618330488>. Acesso em: 12 nov. 2019.

MILLS, G. Urban climatology: History, status and prospects. **Urban Climate**, v.10, Part 3, p. 479-489. 2014. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2212095514000443>. Acesso em: 17 jun. 2021.

MOAZAMI, A.; CARLUCCI, S.; GEVING, S. Critical Analysis of Software Tools Aimed at Generating Future Weather Files with a view to their use in Building Performance Simulation. **Energy Procedia**, v. 132, p. 640-645. 2017. Disponível em: https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S187661021734849X/pdf?md5=923e2d937f6f08e14f710159fce5e927&pid=1-s2.0-S187661021734849X-main.pdf&_valck=1. Acesso em: 20 abr. 2021.

NABONI, E.; NATANIAN, J.; BRIZZI, G.; FLORIO, P.; CHOKHACHIAN, A.; GALANOS, T.; RASTOGI, P. A digital workflow to quantify regenerative urban design in the context of a changing climate. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 113, p. 109255. 2019. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364032119304551>. Acesso em: 07 mai. 2021.

NAKANO, A.; BUENO, B.; NORFORD, L.; REINHART, C. F. Urban Weather Generator – A novel workflow for integrating urban heat island effect within urban design process. *In*: 14TH INTERNATIONAL BUILDING PERFORMANCE SIMULATION ASSOCIATION, 2015. **Proceedings [...]**. 2015. p. 1901-1908. Disponível em:

https://dspace.mit.edu/bitstream/handle/1721.1/108779/Norford_Urban%20weather.pdf?sequence=1&isAllowed=y. Acesso em: 25 out. 2020.

NAKATA-OSAKI, C. M.; SOUZA, L. C. L. de; RODRIGUES, D. S. Impacto da geometria do cânion urbano na intensidade de ilha de calor noturna: análise através de um modelo simplificado adaptado a um SIG. **Ambiente Construído**. Porto Alegre, v. 16, n. 3, p. 73-87, jul./set. 2016. Disponível em: <https://seer.ufrgs.br/ambienteconstruido/article/download/60272/37474>. Acesso em: 04 fev. 2020.

NATANIAN, J; ALEKSANDROWICZ, O.; AUER, T. A parametric approach to optimizing urban form, energy balance and environmental quality: The case of Mediterranean districts. **Applied Energy**, v. 254, p. 113637. 2019. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0306261919313248>. Acesso em: 12 nov. 2019.

NATANIAN, J.; AUER, T. Beyond nearly zero energy urban design: A holistic microclimatic energy and environmental quality evaluation workflow. **Sustainable Cities and Society**, v. 56, p. 102094. 2020. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2210670720300810>. Acesso em: 01 out. 2020.

NAZARIAN, N.; DUMAS, N.; KLEISSEL, J.; NORFORD, L. Effectiveness of cool walls on cooling load and urban temperature in a tropical climate. **Energy and Buildings**, v 187, p. 144-162. 2019. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0378778818317390>. Acesso em: 03 mai. 2021.

NICO-RODRIGUES, E. A.; ALVAREZ, C. E. de; SANTO, A. D.; PIDERIT, M. B. Quando a janela define a condição de desempenho térmico em ambientes ventilados naturalmente: caso específico das edificações multifamiliares em Vitória, ES. **Ambiente Construído**. Porto Alegre, v. 15, n. 2, p. 7-23. 2015. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/ac/a/8TCXN3VMP6YFjhNqBSRRvSg/?lang=pt&format=pdf>. Acesso em: 17 mai. 2021.

NOGUCHI, M. **ZEMCH: Toward the Delivery of Zero Energy Mass Custom Homes**. Springer T ed. Melbourne, Austrália: Springer International Publishing Switzerland, 2016. 364p.

OBSERVATÓRIO DO CLIMA. **Diretrizes para formulação de políticas públicas em mudanças climáticas no Brasil**. 2009. 94p.

_____. **Proposta do Observatório do Clima para a 2ª Contribuição Nacionalmente Determinada do Brasil no âmbito do Acordo de Paris**. 2020. 5p.

ONU-HABITAT. **Nueva Agenda Urbana**. Quito: 2017. Disponível em: <http://habitat3.org/wp-content/uploads/NUA-Spanish.pdf>. Acesso em: 23 ago. 2018.

OKE, T.R. The urban energy balance. **Progress in Physical Geography**, v. 12, n. 4, p. 471-508. 1988. Disponível em:

<https://journals.sagepub.com/doi/10.1177/030913338801200401>. Acesso em: 30 jan. 2020.

OKE, T. R.; MILLS, G.; CHRISTEN, A.; VOOGT, J.A. **Urban Climates**. University of British Columbia: Cambridge University Press. 2017. 542p.

PAINEL BRASILEIRO DE MUDANÇAS CLIMÁTICAS (PBMC). **Mudanças Climáticas e Cidades**. Relatório Especial do Painel Brasileiro de Mudanças Climáticas. PBMC, COPPE – UFRJ. Rio de Janeiro, Brasil. 2016. 116p.

PALME, M.; LOBATO, A.; CARRASCO. Quantitative analysis of factors contributing to Urban Heat Island Effect in cities of Latin-American Pacific Coast. **Procedia Engineering**, v. 169, p. 199-206. 2016. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S187770581633226X>. Acesso em: 28 ago. 2020.

PALME, M.; INOSTROZA, L.; VILLACRESES, G.; LOBATO-CORDERO, A.; CARRASCO, C. Urban Climate in the South American Coastal Cities of Guayaquil, Lima, Antofagasta, and Valparaíso, and Its Impacts on the Energy Efficiency of Buildings. In: HENRÍQUEZ, C.; ROMERO, H. **Urban climates in Latin America**. 2019. 409p.

PALME, M. Urban Heat Island Studies in Hot and Humid Climates: A Review of the State of Art in Latin-America. In: ENTERIA, N.; SANTAMOURIS, M.; EICKER, U (ed.). **Urban Heat Island (UHI) Mitigation: Hot and Humid Regions**. 2021. 312p.

PASICHNYI, O.; WALLIN, J.; KORDAS, O. Data-driven building archetypes for urban building energy modelling. **Energy**, v. 181, p. 360–377, 2019. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0360544219308370>. Acesso em: 17 set. 2019.

PEREIRA, E.B.; MARTINS, F.R; GONÇALVES, A. R.; COSTA, R. S.; LIMA, F. J. L. de; RUTHER, R.; ABREU, S. L. de; TIÉPOLO, G. M.; PEREIRA, S. V.; SOUZA, J. G. de. **Atlas brasileiro de energia solar**. 2. ed. São José dos Campos: INPE. 2017. 80p. Disponível em: <http://doi.org/10.34024/978851700089>. Acesso em: 18 mai. 2021.

PREFEITURA MUNICIPAL DE VITÓRIA (PMV). **Lei N° 4821/1998: Código de Edificações do Município de Vitória**. 1998. Disponível em: <http://sistemas.vitoria.es.gov.br/webleis/Arquivos/1998/L4821.PDF>. Acesso em: 29 fev 2020.

_____. **Lei N° 9.271/2018: Plano Diretor Urbano do Município de Vitória**. 2018. Disponível em: <http://sistemas.vitoria.es.gov.br/webleis/Arquivos/2018/L9271.PDF>. Acesso em: 04 dez 2019.

_____. **Vitória em Dados**. Disponível em: <http://legado.vitoria.es.gov.br/regionais/geral/geograficos.asp>. Acesso em: 04 jan 2019.

PREFEITURA MUNICIPAL DE VITÓRIA (PMV). **Decreto N° 17.699/2019**: Plano Diretor de Arborização e Áreas Verdes do Município de Vitória (ES). 2019. 223p.

PROGRAMA NACIONAL DE CONSERVAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA (PROCEL). **Etiquetagem de edifícios**: Tabelas de classificação dos níveis de eficiência energética da envoltória. 2013. Disponível em: www.procelinfo.com.br/etiquetagem_edificios. Acesso em: 28 nov. 2019.

PROGRAMA NACIONAL DE CONSERVAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA (PROCEL). **Etiquetagem em Edificações**. Disponível em: <http://www.procelinfo.com.br/main.asp?View={89E211C6-61C2-499A-A791-DACD33A348F3}>. Acesso em 21 dez. 2019.

PROJETANDO EDIFICAÇÕES ENERGETICAMENTE EFICIENTES – PROJETEEE. **Dados bioclimáticos**. 2016. Disponível em: <http://projeteee.mma.gov.br/>.

PROTOCOLO DE MONTREAL. **Emenda de Kigali**. 2017. Disponível em: <http://www.protocolodemontreal.org.br/site/quem-somos/emenda-de-kigali>. Acesso em: 13 fev. 2020

QUAN, S.J. Energy efficient neighbourhood design under residential zoning regulations in Shanghai. **Energy Procedia**, v. 143, p. 865-872. 2017. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1876610217365396/pdf?md5=60166e4556d598d843e7fbd41356a53d&pid=1-s2.0-S1876610217365396-main.pdf>. Acesso em: 03 mai. 2021.

REINHART, C. F.; DAVILA, C. C. Urban building energy modeling – A review of a nascent field. **Building and Environment**. V. 97, p. 196-202. 2016. Disponível em: <https://hdl.handle.net/1721.1/122031>. Acesso em: 12 nov. 2019.

_____. Urban Building energy modeling. In: HENSEN, J. L.; LAMBERTS, R. **Building Performance Simulation for Design and Operation**. 2nd Edition. 2019. 793p.

REN21. **Renewables in cities**: 2019 Global Status Report. REN21 Secretariat, Paris, France. Disponível em: https://www.ren21.net/wp-content/uploads/2019/05/REC-2019-GSR_Full_Report_web.pdf. Acesso em: 30 dez. 2019

ROMERO, M. A. B. **Princípios bioclimáticos para o desenho urbano**. 2013. 128p.

ROMERO, M. A. B.; BAPTISTA, G. M. de M.; LIMA, E. A. de; WERNECK, D. R.; VIANNA, E. O.; SALES, G. de L. **Mudanças climáticas e ilhas de calor urbanas**. Brasília: Universidade de Brasília, Faculdade de Arquitetura e Urbanismo. ETB, 2019. 151p.

RORIZ, M. **Arquivos climáticos de Municípios Brasileiros**. ANTAC: Associação Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído. São Paulo. 2012. Disponível em: http://roriz.dominiotemporario.com/doc/Sobre_os_arquivos_EPW.pdf. Acesso em: 21 abr. 2021.

RORIZ, M. **Classificação de climas do Brasil** – Versão 3.0. ANTAC: Associação Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído. São Carlos. 2014. Disponível em: http://www.labee.ufsc.br/sites/default/files/Climas_v3.pdf. Acesso em: 05 nov. 2019.

SAILOR, D.J. GEORGESCU, M.; MILNE, J.M.; HART, M.A. Development of a national anthropogenic heating database with an extrapolation for international cities. **Atmospheric Environment**, v. 118, p. 7-18. 2015. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1352231015302156>. Acesso em: 10 dez. 2020.

SALVATI, A.; COCH ROURA, H.; CECERE, C. Assessing the urban heat island. and its energy impact on residential buildings in Mediterranean climate: Barcelona case study. **Energy and Buildings**, v. 146, p. 38-54. 2017. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0378778817312914>. Acesso em: 28 ago. 2020.

SALVATI, A.; MONTI, P.; ROURA, H. C.; CECERE, C. Climatic performance of urban textures: Analysis tools for a Mediterranean urban context. **Energy & Buildings**, v. 185, p. 162-179. 2019. Disponível em: <https://upcommons.upc.edu/bitstream/handle/2117/130026/Climaticperformanceofurbantextures-SalvatiMontiCochCecere2019.pdf?sequence=1>. Acesso em: 28 ago. 2020.

SALVATI, A.; PALME, M.; CHIESA, G.; KOLOKOTRONI. Built form, urban climate and Building energy modelling: case-studies in Rome and Antofagasta. **Journal of Building Performance Simulation**, v. 13, n. 2, p. 209-225. 2020. Disponível em: <https://www.tandfonline.com/doi/pdf/10.1080/19401493.2019.1707876?needAccess=true>. Acesso em: 08 jun. 2020.

SAMPAIO, M. de M.A. A Lei de Uso e Ocupação do Solo de Cuiabá-MT e Suas Consequências Ambientais. **Engineering and Science**. V. 2, Edição 4. 2015. Disponível em: <https://periodicoscientificos.ufmt.br/ojs/index.php/eng/article/view/3175/2231>. Acesso em: 28 jan. 2020.

SAMUELSON, H.; CLAUSSNITZER, S.; GOYAL, A.; CHEN, Y.; ROMO-CASTILLO, A. Parametric energy simulation in Early design: High-rise residential buildings in urban contexts. **Building and Environment**, v. 101, p. 19-31. 2016. Disponível em: https://dash.harvard.edu/bitstream/handle/1/27754128/Parametric_Energy_Simulation-Samuelson-final.pdf?sequence=1. Acesso em: 27 abr. 2021.

SANTAMOURIS, M. Recent progress on urban overheating and heat island research. Integrated assessment of the energy, environmental, vulnerability and health impact. Synergies with the global climate change. **Energy & Buildings**, v. 207, p. 109482. 2020. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0378778819326696>. Acesso em: 20 abr. 2021.

SANTOS, L.G.R.; NEVAT, I.; PIGNATTA, G.; NORFORD, L.K. Climate-informed decision-making for urban design: Assessing the impact of urban morphology on urban heat island. **Urban Climate**, v. 36, p.100776. 2021. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2212095521000079>. Acesso em: 03 mai. 2021.

SORGATO, M. J.; LAMBERTS, R. **Relatório Técnico da base de simulações para o RTQ-R**. ELETROBRAS/PROCEL. 55 p. 2011. Disponível em: http://www.labee.ufsc.br/sites/default/files/projetos/etiquetagem/SORGATO_2011_Relatorio%20Tecnico%20da%20Base%20de%20Simulacoes%20para%20o%20RTQ-R.pdf. Acesso em: 21 dez. 2019.

SORGATO, M. J.; MARINOSKI, D. L.; MELO, A. P.; LAMBERTS, R. Nota técnica referente à avaliação para a norma de desempenho NBR 15575 em consulta pública. **Nota Técnica**. 23 p. 2012. Disponível em: http://www.labee.ufsc.br/sites/default/files/publicacoes/notas_tecnicas/NT_15575_FINAL.pdf. Acesso em: 21 dez. 2019.

STENSJO, I. P.; FERREIRA, C. C.; LOURA, R. M. Classificação e agrupamento das cidades brasileiras em graus-dia de aquecimento e resfriamento: 1960 a 2013. **Revista Brasileira de Gestão Urbana**, v. 9, p. 286-300. 2017. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/urbe/a/Jxzgv6DyMpHrqXY4NrpYWqw/abstract/?lang=pt>. Acesso em: 13 nov. 2019.

STEWART, I.D.; OKE, T.R. Local climate zones for urban temperature studies. *Bulletin of the American Meteorological Society*, v. 93, n. 12, p. 1879-1900. 2012. Disponível em: <https://journals.ametsoc.org/downloadpdf/journals/bams/93/12/bams-d-11-00019.1.xml>. Acesso em: 10 mar. 2021.

STREET, M.; REINHART, C. F.; NORFORD, L.; OCHSENDORF. Urban heat island in Boston – An evaluation of urban air-temperature models for predicting building energy use. *In: 13TH CONFERENCE OF INTERNATIONAL BUILDING PERFORMANCE SIMULATION ASSOCIATION*, França, 2013. **Proceedings [...]**. França. 2013. p. 1022-1029. Disponível em: http://www.ibpsa.org/proceedings/BS2013/p_1492.pdf. Acesso em: 08 jun. 2020.

SWAN, L. G.; UGURSAL, V. I. Modeling of end-use energy consumption in the residential sector: A review of modeling techniques. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 13, p. 1819–1835. 2009. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364032108001949>. Acesso em: 05 jul. 2021.

TALANOA. **A política nacional de mudança do clima em 2020**: Estado das metas, mercados e governança assumidos na Lei 12.187/2009. Rio de Janeiro. 2020. Disponível em: <https://www.oc.eco.br/wp-content/uploads/2020/12/Politica-Nacional-de-Mudanc%CC%A7a-de-Clima.pdf>. Acesso em: 28 jun. 2021.

TÃO, N.G.R.; SILVA, R.S. Contribuições dos instrumentos urbanísticos brasileiros para o desenvolvimento de projetos urbanos de impacto ambiental reduzido. *In*: 7^o CONGRESSO LUSO BRASILEIRO PARA O PLANEJAMENTO URBANO, REGIONAL, INTEGRADO E SUSTENTÁVEL (PLURIS): CONTRASTES, CONTRADIES E COMPLEXIDADES, Maceió, 2016. **Anais [...]**. Maceió. 2016. Disponível em: <http://www.fau.ufal.br/evento/pluris2016/files/Tema%204%20-%20Planejamento%20Regional%20e%20Urbano/Paper1355.pdf>. Acesso em: 27 jan. 2020.

TEIXEIRA, C.A.; INVIDIATA, A.; SORGATO, M. J.; MELO, A. P.; FOSSATI, M.; LAMBERTS, R. Levantamento das características de edifícios residenciais brasileiros. Florianópolis: Universidade Federal de Santa Catarina – Centro Brasileiro de Eficiência Energética em Edificações (CB3E). 2015. **Relatório Técnico**. Disponível em: http://cb3e.ufsc.br/sites/default/files/Relatorio_TipologiasResidenciais.pdf. Acesso em: 23 dez. 2019.

TOOTKABONI M. P.; BALLARINI I.; ZINZI M.; CORRADO V. A Comparative Analysis of Different Future Weather Data for Building Energy Performance Simulation. **Climate**, v. 9, n. 2, p. 37. 2021. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2225-1154/9/2/37/pdf>. Acesso em: 17 mai. 2021.

TOPARLAR, Y., BLOCKEN, B., MAIHEU, B.; HEIJST, G. J. F, van. Impact of urban microclimate on summertime building cooling demand: a parametric analysis for Antwerp, Belgium. **Applied Energy**, v. 228, p. 852-872. 2018. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0306261918309814>. Acesso em: 27 nov. 2019.

TORRES, S.C.; FREITAS, R. M. de; BARBIRATO, G. M.; BARBOSA, R. V. R. Bioclimatologia e sustentabilidade urbana: suas interfaces conceituais e as implicações no processo de planejamento urbano. *In*: XV ENCONTRO NACIONAL DA ASSOCIA NACIONAL DE PS-GRADUA E PESQUISA EM PLANEJAMENTO URBANO E REGIONAL ANAIS (ENANPUR), v. 15, n.1. 2013. **Anais [...]**. 2013. Disponível em: <http://anais.anpur.org.br/index.php/anaisenanpur/article/view/253/245>. Acesso em: 27 jan. 2020.

TORRES, S. C. Forma e conforto: Estratégias para (re)pensar o adensamento construtivo urbano a partir dos parâmetros urbanísticos integrado à abordagem bioclimática. **Tese** (Doutorado em Desenvolvimento Urbano). Recife: Universidade Federal de Pernambuco. 2017. 395p.

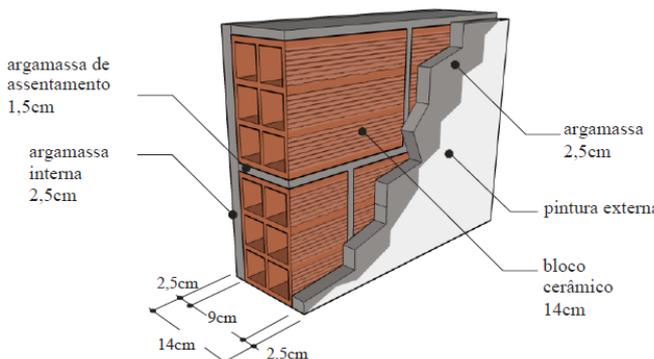
U.S. ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY (EPA). Urban Heat Island Basics. *In*: **Reducing Urban Heat Islands: Compendium of Strategies**. 2008. Disponível em: <https://www.epa.gov/heat-islands/heat-island-compendium>. Acesso em: 18 jun. 2021.

WORLD METEOROLOGICAL ORGANIZATION (WMO). **State of the Global Climate 2020**. 2021. Disponível em: https://library.wmo.int/doc_num.php?explnum_id=10618. Acesso em: 30 mai. 2021.

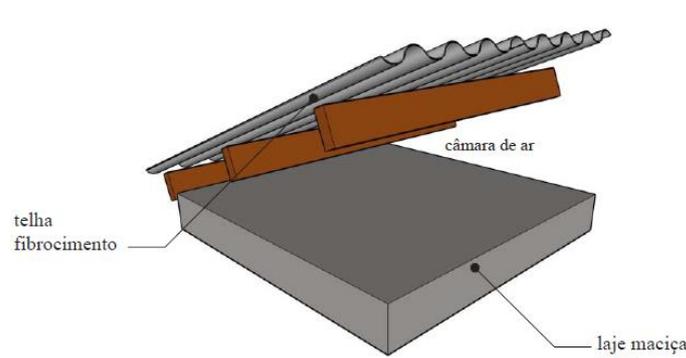
- XU, X.; AZARIJAFARI, H.; GREGORY, J.; NORFORD, L.; KIRCHAIN, R. An integrated model for quantifying the impacts of pavement albedo and urban morphology on building energy demand. **Energy & Buildings**, v. 211, p. 109759. 2020. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0378778819332785>. Acesso em: 19 mar. 2020.
- YANG, X.; ZHAO, L.; BRUSE, M.; MENG, Q. An integrated simulation method for building energy performance assessment in urban environments. **Energy and Buildings**, v. 54, p. 243–251, 2012. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0378778812003970>. Acesso em: 24 out. 2019.
- YANG, J.H. **The Curious Case of Urban Heat Island: A Systems Analysis**. University of Toronto: Master of Science in Engineering at the Massachusetts Institute of Technology. 2016. Disponível em: <http://hdl.handle.net/1721.1/107347>. Acesso em: 17 jan. 2020.
- ZHAI, Z. J.; HELMAN, J. M. Implications of climate changes to building energy and design. **Sustainable Cities and Society**, v. 44, p. 511–519, 2019. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S2210670718312319>. Acesso em: 25 jul. 2019.
- ZHANG, M.; GAO, Z. Effect of urban form on microclimate and energy loads: Case study of generic residential district prototypes in Nanjing, China. **Sustainable Cities and Society**, v. 70, p. 102930. 2021. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S221067072100216X>. Acesso em: 03 mai. 2021.

APÊNDICES

APÊNDICE A – Propriedades térmicas dos materiais de envoltória do edifício

Parede externa (U=2,46) Argamassa externa + Bloco Cerâmico com camada de ar + Argamassa interna							
	Descrição: Argamassa interna (2,5cm) Bloco cerâmico (9,0 x 14,0 x 24,0 cm) Argamassa externa (2,5cm) Pintura externa (α)						
	<table border="1"> <thead> <tr> <th>U</th> <th>C_T</th> </tr> <tr> <th>[W/(m²K)]</th> <th>[kJ/m²K]</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>2,46</td> <td>150</td> </tr> </tbody> </table>	U	C _T	[W/(m ² K)]	[kJ/m ² K]	2,46	150
U	C _T						
[W/(m ² K)]	[kJ/m ² K]						
2,46	150						
Materiais Opacos:	Argamassa¹	Tijolo¹					
Espessura (m)	0,025	0,013*					
Condutividade (W/m.K)	1,15	0,9					
Densidade (kg/m ³)	2000	1600					
Calor Específico (J/kJ.K)	1000	920					
Absortância Solar	0,4	-					
Materiais gasosos:	Camada de ar¹						
Resistência (m ² .K/W)	0,16						

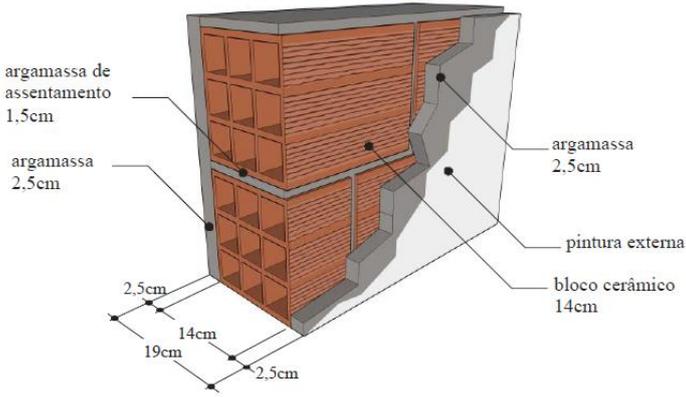
* Média das paredes de um bloco cerâmico (1,5+1+1,5/3=1,3mm)

Cobertura (U=2,06) Fibrocimento + Camada de ar + Concreto							
	Descrição: Laje maciça (10,0cm) Câmara de ar (> 5,0 cm) Telha fibrocimento						
	<table border="1"> <thead> <tr> <th>U</th> <th>C_T</th> </tr> <tr> <th>[W/(m²K)]</th> <th>[kJ/m²K]</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>2,06</td> <td>233</td> </tr> </tbody> </table>	U	C _T	[W/(m ² K)]	[kJ/m ² K]	2,06	233
U	C _T						
[W/(m ² K)]	[kJ/m ² K]						
2,06	233						
Materiais Opacos:	Fibrocimento¹	Concreto¹					
Espessura (m)	0,008	0,10					
Condutividade (W/m.K)	0,95	1,75					
Densidade (kg/m ³)	1800	2200					
Calor Específico (J/kJ.K)	840	1000					
Materiais sem massa:	Camada de ar (>5cm)¹						
Resistência (m ² .K/W)	0,21						

¹ (ABNT Projeto 02:135.07-001/2:2003 – Desempenho térmico de edificações Parte 2: Métodos de cálculo da transmitância térmica, da capacidade térmica, do atraso térmico e componentes de edificações)

Material	Espessura equivalente	λ [W/m.K]	ρ [kg/m ³]	c [KJ/kg.K]	R [m ² .K/W]
Laje mista (12 cm)	9,5 cm	1,05	1087	0,92	0,090

Fonte: adaptado de Sorgato e Lamberts (2011).

Otimização: Parede externa (U=1,85) Argamassa externa + Bloco Cerâmico com camada de ar + Gesso							
	<p>Descrição:</p> <p>Argamassa interna (2,5cm) Bloco cerâmico (14,0 x 19,0 x 29,0cm) Argamassa externa (2,5cm) Pintura externa (α)</p>						
	<table border="1"> <thead> <tr> <th>U</th> <th>C_T</th> </tr> <tr> <th>[W/(m²K)]</th> <th>[kJ/m²K]</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>1,85</td> <td>161</td> </tr> </tbody> </table>		U	C_T	[W/(m ² K)]	[kJ/m ² K]	1,85
U	C_T						
[W/(m ² K)]	[kJ/m ² K]						
1,85	161						
Materiais Opacos:	Argamassa¹	Tijolo¹					
Espessura (m)	0,025	0,013*					
Condutividade (W/m.K)	1,15	0,9					
Densidade (kg/m ³)	2000	1600					
Calor Específico (J/kJ.K)	1000	920					
Absortância Solar	0,4	-					
Materiais gasosos:	Camada de ar¹						
Resistência (m ² .K/W)	0,146						

* Média das paredes de um bloco cerâmico (1,5+1+1,5/3=1,3mm)

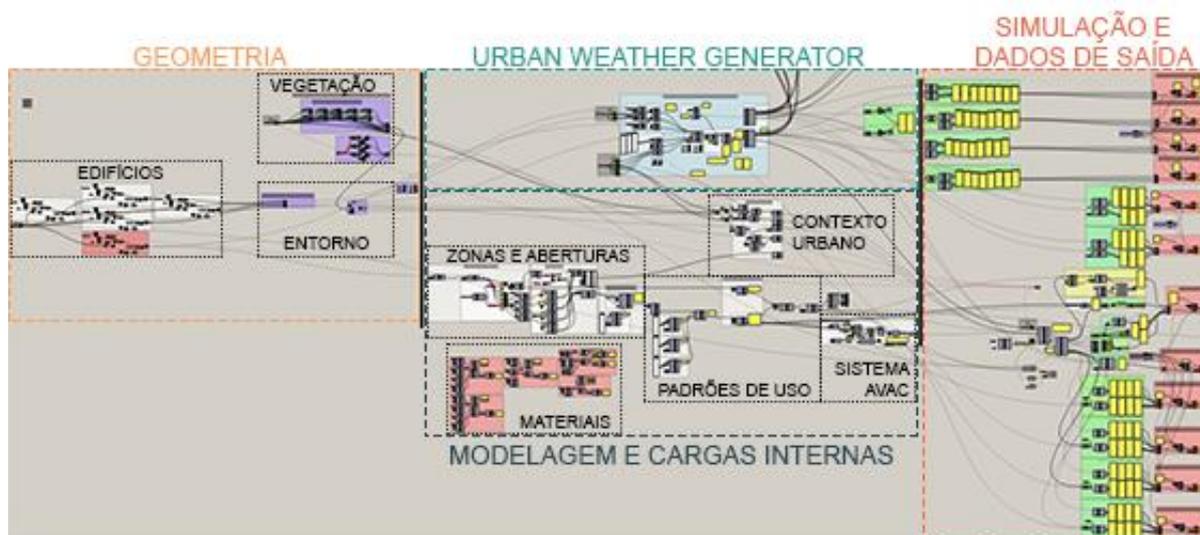
¹ (ABNT Projeto 02:135.07-001/2:2003 – Desempenho térmico de edificações Parte 2: Métodos de cálculo da transmitância térmica, da capacidade térmica, do atraso térmico e componentes de edificações)

Ilustrações do Catálogo de propriedades térmicas de paredes, coberturas e vidros (INMETRO, 2013).

APÊNDICE B – Dados de entrada do *Urban Weather Generator*

Contexto Urbano		
Parâmetro	Valor	
Tipologia da edificação		
Programa	<i>MidRiseApartment</i>	
Ano	1980 até a atualidade	
Pé direito	2,7 m	
Altura média	9 m / 18 m / 45 m	
Número de pavimentos	3 / 7 / 17	
Área construída	Variável por cenário	
Área de fachada	Variável por cenário	
Envelope das edificações		
Área envidraçada	20% (PREFEITURA MUNICIPAL DE VITÓRIA, 1998) 50% (NBR 15220/2003, 2003; LIMA; SCALCO; LAMBERTS, 2019)	
Coefficiente de ganho de calor solar	0,57 (INSTITUTO NACIONAL DE METROLOGIA, QUALIDADE E TECNOLOGIA, 2013)	
Albedo de parede	0,60 (PALME <i>et al.</i> , 2019) 0,45 (LIMA; SCALCO; LAMBERTS, 2019) 0,40 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2003a) 0,10 (NAKANO <i>et al.</i> , 2015)	
Albedo de cobertura	0,65 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2003a) 0,30 (LIMA; SCALCO; LAMBERTS, 2019) 0,07 (NAKANO <i>et al.</i> , 2015)	
Tráfego		
Calor antropogênico	15 W/m ²	
Padrão de ocupação da semana	0.2,0.2,0.2,0.2,0.2,0.4,0.7,0.9,0.9,0.6,0.6,0.6, 0.6,0.6,0.7,0.8,0.9,0.9,0.8,0.8,0.7,0.3,0.2,0.2 (Padrão)	
Padrão de ocupação do sábado	0.2,0.2,0.2,0.2,0.2,0.3,0.5,0.5,0.5,0.5,0.5,0.5, 0.5,0.5,0.6,0.7,0.7,0.7,0.7,0.5,0.4,0.3,0.2,0.2 (Padrão)	
Padrão de ocupação do domingo	0.2,0.2,0.2,0.2,0.2,0.3,0.4,0.4,0.4,0.4,0.4,0.4, 0.4,0.4,0.4,0.4,0.4,0.4,0.4,0.4,0.3,0.3,0.2,0.2 (Padrão)	
Vegetação		
Albedo	0,25 (Padrão)	
Início e Fim (Meses)	1 – 12 (Padrão)	
Calor latente da árvore	0,70 (Padrão)	
Calor latente da grama	0,60 (NAKANO <i>et al.</i> , 2015)	
Pavimento		
Tipos	Asfalto (BUENO <i>et al.</i> , 2014)	Concreto (BUENO <i>et al.</i> , 2014)
Condutividade térmica	1,00	1,25
Inércia térmica	1.600.000	2.000.000
Albedo	0,10	0,25
Espessura	1,25	1,25
Zona climática da ASHRAE	1A	
Camadas limites		
Altura durante o dia (m)	700 (BUENO <i>et al.</i> , 2014; YANG, 2016)	
Altura no período da noite (m)	80 (BUENO <i>et al.</i> , 2014; YANG, 2016)	
Altura de inversão	150 (Padrão)	
Coefficiente de circulação	1,2 (Padrão)	
Coefficiente de troca	0,3 (Padrão)	

APÊNDICE C – Ilustração do processo de simulação no *Grasshopper*

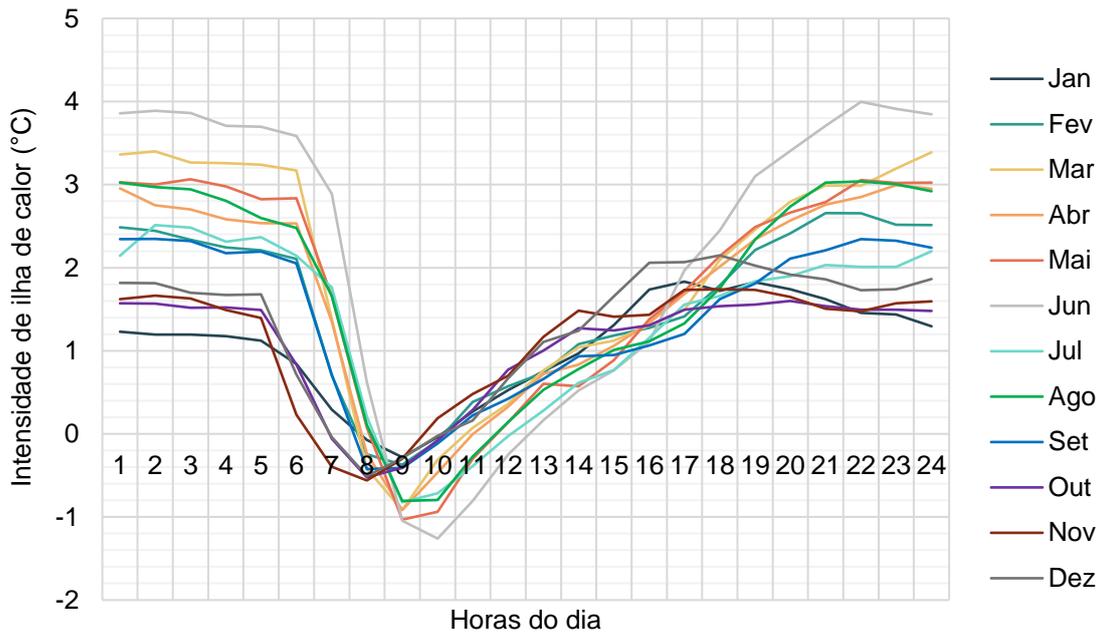


APÊNDICE D – Dados climáticos

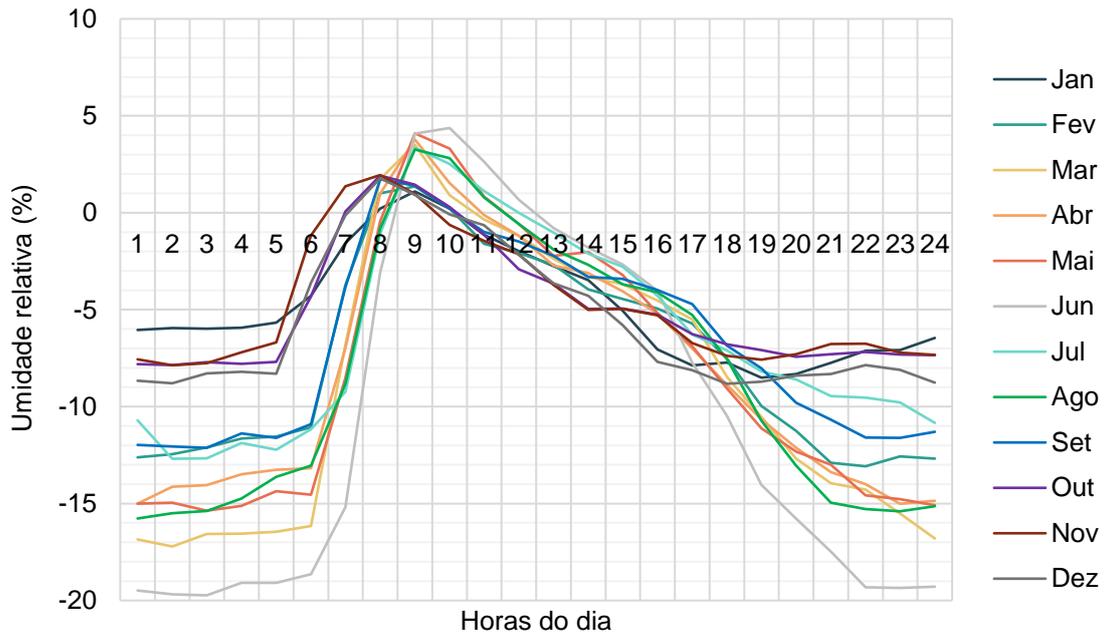
Intensidade mensal de temperatura

As variáveis de intensidade de ilha de calor e umidade relativa do ar apresentam-se com perfis diferentes ao longo dos meses, com destaque para a amplitude diária de junho.

Intensidade de ilha de calor (°C) horária típica de cada mês para o cenário B2T6



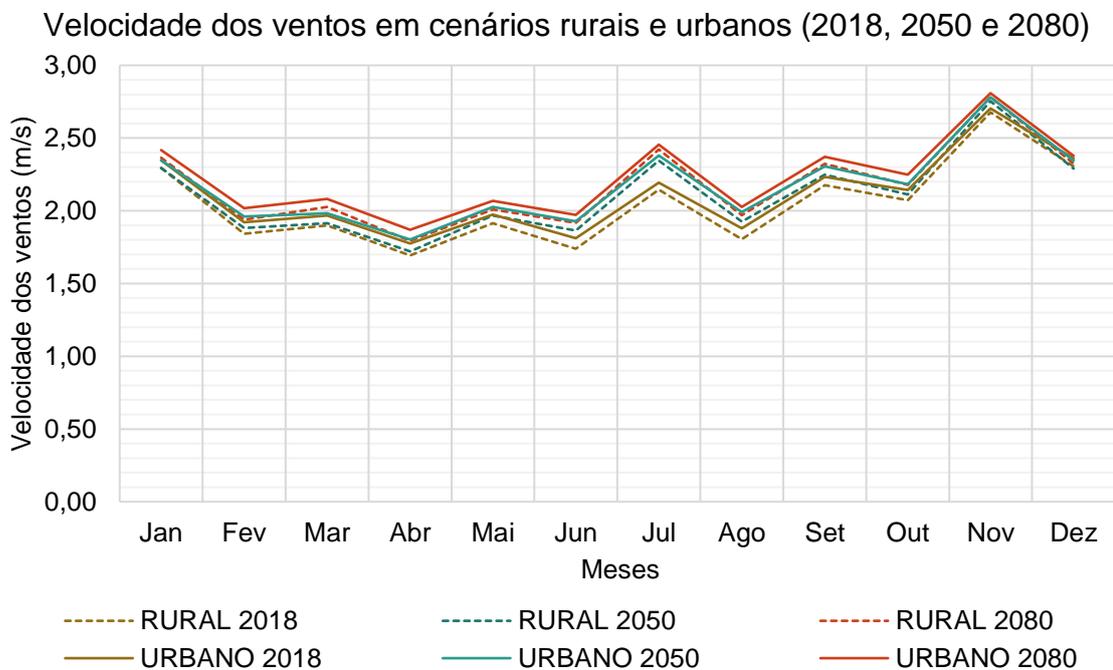
Varição de umidade relativa (%) horária típica de cada mês para o cenário B2T6



Velocidade dos ventos

Os programas de simulação não são configurados para análises fluidodinâmica, sendo necessária a inclusão de outros componentes no sistema. Apesar disso, o UWG reconhece que, ao inserir elementos volumétricos no entorno, o arquivo climático original é modificado, independente da variação dos outros parâmetros inclusos. Porém, ao observar os dados climáticos futuros, a velocidade do vento vai aumentando ao longo dos anos.

No gráfico é possível observar as transformações nos dados de velocidade dos ventos para cada arquivo climático, considerando os cenários atuais e futuros.

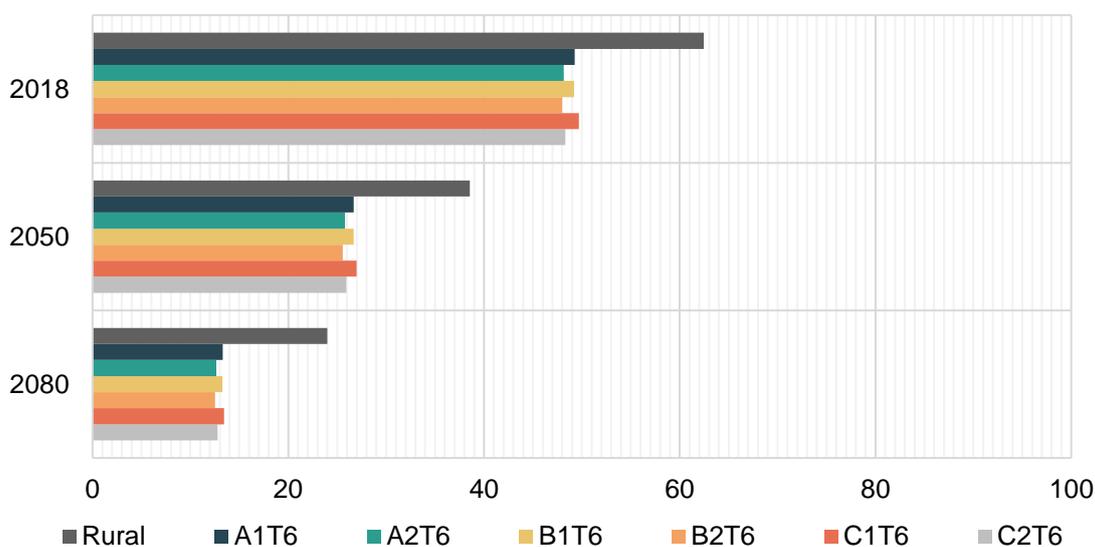


APÊNDICE E – Conforto Térmico Externo

Baseado nos dados de temperatura externa, o conforto térmico externo representa a porcentagem para os quais o UTCI indica condição confortáveis entre 9 a 26°C. Porém, como observado no tópico 4.1.1, a intensidade de calor variou os dados de temperatura do arquivo climático original.

A porcentagem de conforto para o cenário rural em 2018 foi de 62,44%, um valor, que ao ser transformado para cenários futuros, teve modificação para 38,55% em 2050 e 23,99% em 2080. Considerando a inserção do contexto urbano, os parâmetros contribuíram ainda mais com essa variação, de forma que os cenários mais adensados apresentaram os piores níveis de conforto térmico. Em B2T6, a maior redução do rural para urbano foi de 14,45% em 2018, 13,07% em 2050 e 11,51% em 2080. Já na variação entre anos, para o mesmo cenário, foi na ordem de 22,43% e 13,06% de 2018 a 2050 e de 2050 a 2080.

Porcentagem de conforto térmico externo nos cenários urbanos futuros



A redução foi menor nos cenários futuros por apresentar temperaturas do ar elevadas, já com baixo conforto em contexto rural. Após a transformação para o urbano, foi observado que, assim como nos anos futuros, entre os cenários de CA 1 e 2, houve uma variação de porcentagem de conforto em torno de 1%. O parâmetro de vegetação contribuiu para o conforto térmico, aumentando em até 0,43% (C1T6).

APÊNDICE F – Consumo anual por área condicionada

Dados de consumo por parâmetros: orientação, pavimentação e vegetação

Definição da orientação e pavimentação dos cenários T6 pelo kWh/m² anual

Cenários	Orientação com pavimento asfalto				Orientação Final	Pavimento Concreto	Pavimento Final
	Norte	Sul	Leste	Oeste			
A1T6	30,354	30,417	31,040	28,945	Oeste	28,830	Concreto
A2T6	27,898	27,916	29,201	26,974	Oeste	26,913	Concreto
B1T6	36,988	36,987	38,346	38,343	Sul	36,823	Concreto
B2T6	29,956	30,006	29,981	29,612	Oeste	29,740	Asfalto
C1T6	31,917	31,973	31,293	31,302	Leste	31,169	Concreto
C2T6	28,600	28,772	28,815	28,808	Norte	28,535	Concreto

Varição no consumo (kWh/m².ano) por orientação e pavimentação

Cenários	Orientação		Pavimentação	
	kWh/m ²	%	kWh/m ²	%
A1T6	-0,063 a -2,095	7,24	-0,115	0,40
A2T6	-0,018 a -2,227	8,26	-0,061	0,23
B1T6	-0,001 a -1,359	3,67	-0,164	0,45
B2T6	-0,025 a -0,394	1,33	-0,128	0,43
C1T6	-0,056 a -0,680	2,17	-0,124	0,40
C2T6	-0,007 a -0,215	0,75	-0,065	0,23

Varição no consumo (kWh/m².ano) pela adição de vegetação

Pavimento	Vegetação	A1T6	A2T6	B1T6	B2T6	C1T6	C2T6
Asfalto	Sem	28,945	26,974	36,987	29,612	31,293	28,600
	Com	28,846	26,765	36,846	29,360	31,908	29,499
	Varição	-0,099	-0,209	-0,141	-0,252	+0,615	+0,899
Concreto	Sem	28,830	26,913	36,823	29,740	31,169	28,535
	Com	28,577	26,717	36,748	29,391	30,504	28,262
	Varição	-0,253	-0,196	-0,075	-0,349	-0,665	-0,273

Dados de consumo por dispositivo de sombreamento

Varição no consumo em kWh/m².ano e porcentagem por dispositivo de sombreamento

Cenários	A1T6	A2T6	B1T6	B2T6	C1T6	C2T6
Cenário-Base	28,577	26,717	36,748	29,360	30,504	28,262
Com veneziana	24,554	23,343	36,743	24,456	25,354	23,943
Varição	4,023	3,374	0,005	4,904	5,150	4,319
Porcentagem (%)	-14,078	-12,629	-0,014	-16,703	-16,883	-15,282

Dados de consumo por parâmetros evolutivos em cenários futuros

Consumo para resfriamento (kWh/m².ano) em cenários futuros

Ano	Parâmetros	A1T6	A2T6	B1T6	B2T6	C1T6	C2T6
2018	Clima rural	28,612	28,674	30,396	31,662	28,826	30,514
	Clima urbano	34,524	35,260	36,743	39,072	34,535	37,337
	Entorno	28,830	26,913	36,823	29,612	31,169	28,535
	Vegetação	28,577	26,717	36,748	29,360	30,504	28,262
	Veneziana	24,554	23,343	35,905	24,456	25,354	23,943
2050	Clima rural	56,381	53,340	60,477	61,397	56,898	58,926
	Clima urbano	65,436	65,408	70,116	71,775	66,098	68,320
	Entorno	56,635	47,769	72,758	52,280	62,202	49,979
	Vegetação	53,769	49,328	70,116	51,992	58,849	49,584
	Veneziana	46,533	43,610	69,055	43,870	49,367	42,518
2080	Clima rural	69,911	65,877	74,886	75,244	70,527	72,095
	Clima urbano	80,227	77,136	85,858	86,812	80,538	82,621
	Entorno	68,774	60,884	86,176	66,583	74,404	63,396
	Vegetação	68,024	60,557	85,858	65,964	73,051	62,946
	Veneziana	60,295	54,423	84,934	57,295	62,822	55,442

Variação da consumo para resfriamento (kWh/m².ano) em cenários futuros

Ano	Parâmetros	A1T6	A2T6	B1T6	B2T6	C1T6	C2T6
2018	Clima urbano	+5,912	+6,586	+6,347	+7,410	+5,709	+6,823
	Entorno	-5,694	-8,347	+0,080	-9,460	-3,366	-8,802
	Vegetação	-0,253	-0,196	-0,075	-0,252	-0,665	-0,273
	Veneziana	-4,023	-3,374	-0,843	-4,904	-5,150	-4,319
2050	Clima urbano	+9,055	+12,068	+9,639	+10,378	+9,200	+9,394
	Entorno	-8,801	-17,639	+2,642	-19,495	-3,896	-18,341
	Vegetação	-2,866	+1,559	-2,642	-0,288	-3,353	-0,395
	Veneziana	-7,236	-5,718	-1,061	-8,122	-9,482	-7,066
2080	Clima urbano	+10,316	+11,259	+10,972	+11,568	+10,011	+10,526
	Entorno	-11,453	-16,252	+0,318	-20,229	-6,134	-19,225
	Vegetação	-0,750	-0,327	-0,318	-0,619	-1,353	-0,450
	Veneziana	-7,729	-6,134	-0,924	-8,669	-10,229	-7,504

Variação em porcentagem da consumo para resfriamento (kWh/m².ano) em cenários futuros

Ano	Parâmetros	A1T6	A2T6	B1T6	B2T6	C1T6	C2T6
2018	Clima urbano	20,663	22,969	20,881	23,403	19,805	22,360
	Entorno	-16,493	-23,673	0,218	-24,212	-9,747	-23,574
	Vegetação	-0,878	-0,728	-0,204	-0,851	-2,134	-0,957
	Veneziana	-14,078	-12,629	-0,014	-16,703	-16,883	-15,282
2050	Clima urbano	16,060	22,625	15,938	16,903	16,169	15,942
	Entorno	-13,450	-26,968	3,768	-27,161	-5,894	-26,846
	Vegetação	-5,060	3,264	-3,631	-0,551	-5,391	-0,790
	Veneziana	-13,458	-11,592	0,000	-15,622	-16,112	-14,251
2080	Clima urbano	14,756	17,091	14,652	15,374	14,195	14,600
	Entorno	-14,276	-21,069	0,370	-23,302	-7,616	-23,269
	Vegetação	-1,091	-0,537	-0,369	-0,930	-1,818	-0,710
	Veneziana	-11,362	-10,129	0,000	-13,142	-14,003	-11,921

Dados de consumo por taxa de ocupação

Varição do consumo do cenário-base com T6 e T4

Cenários	Orientação	Pavimento	T6	T4	Variação	
					kWh/m ² .ano	Porcentagem
A1	Oeste	Concreto	28,830	37,912	9,082	31,502%
A2	Oeste	Concreto	26,913	34,191	7,278	27,043%
B1	Leste	Concreto	36,823	55,131	18,308	49,719%
B2	Sul	Asfalto	29,612	39,506	9,894	33,412%
C1	Leste	Concreto	31,169	41,366	10,197	32,715%
C2	Norte	Concreto	28,535	35,429	6,894	24,160%

Diferença entre a consumo rural e urbana com T6 e T4 (kWh/m².ano)

Cenários	T6 Rural	T6 Urbano	Variação	T4 Rural	T4 Urbano	Variação
A1	28,612	34,524	5,912	42,374	51,070	8,696
A2	28,674	35,260	6,586	41,501	51,061	10,100
B1	30,396	36,743	6,347	45,717	55,123	9,406
B2	31,662	39,072	7,410	47,027	57,871	10,844
C1	28,826	34,535	5,709	41,455	50,203	8,748
C2	30,514	37,337	6,823	44,984	55,215	10,231

Diferença entre a consumo urbana com entorno em T6 e T4 (kWh/m².ano)

Cenários	T6 Urbano	T6 Entorno	Variação	T4 Urbano	T4 Entorno	Variação
A1	34,524	28,83	-5,694	51,07	37,912	-13,158
A2	35,26	26,913	-8,347	51,061	34,191	-16,870
B1	36,743	36,823	0,080	55,123	55,131	0,008
B2	39,072	29,612	-9,460	57,871	39,506	-18,365
C1	34,535	31,169	-3,366	50,203	41,366	-8,837
C2	37,337	28,535	-8,802	55,215	35,429	-19,786

Dados de consumo por albedo

Consumo e variação em kWh/m².ano por albedo

Albedo	A1T6	A2T6	B1T6	B2T6	C1T6	C2T6
Cenário-base	28,830	26,913	36,823	29,612	31,169	28,535
Menor albedo de parede e cobertura	28,927	26,750	36,727	29,416	31,255	28,386
Maior albedo de cobertura	28,873	26,988	38,183	29,697	31,222	28,691
Maior albedo de parede	28,016	25,847	35,941	29,385	31,945	28,169
Variação em kWh	+0,097	-0,163	-0,096	-0,196	+0,086	-0,149
	+0,043	+0,075	+1,360	+0,085	+0,053	+0,156
	-0,814	-1,066	-0,882	-0,227	-0,776	-0,366

Dados de consumo por parâmetros adicionais

Consumo em kWh/m².ano por parâmetros

Parâmetros	A1T6	A2T6	B1T6	B2T6	C1T6	C2T6	
Cenário-base	28,830	26,913	36,823	29,612	31,169	28,535	
Edificação	Envoltória	27,189	26,422	34,959	28,487	29,828	27,588
	FS do vidro	23,956	23,883	28,309	24,836	25,805	24,351
Entorno	PAF da fachada	27,771	27,976	35,757	29,086	30,533	28,035
	Uso misto	27,966	27,341	36,196	29,497	31,974	28,037

Diferença de consumo por parâmetro em kWh/m².ano

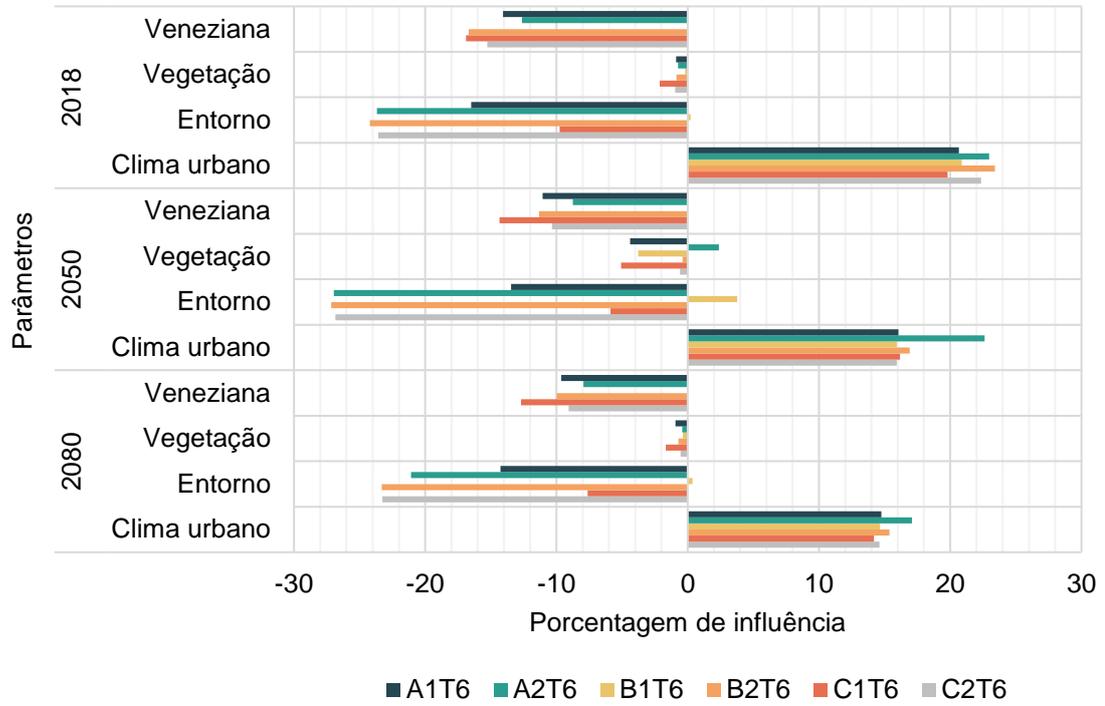
Parâmetros		A1T6	A2T6	B1T6	B2T6	C1T6	C2T6
Edificação	Envoltória	-1,641	-0,491	-1,864	-1,275	-1,341	-0,947
	FS do vidro	-4,874	-3,030	-8,514	-4,776	-5,364	-4,184
Entorno	PAF da fachada	-0,059	+1,063	-1,066	-0,526	-0,636	-0,500
	Uso misto	-0,864	+0,428	-0,627	-0,115	+0,805	-0,498

Diferença de consumo por parâmetro em porcentagem (%)

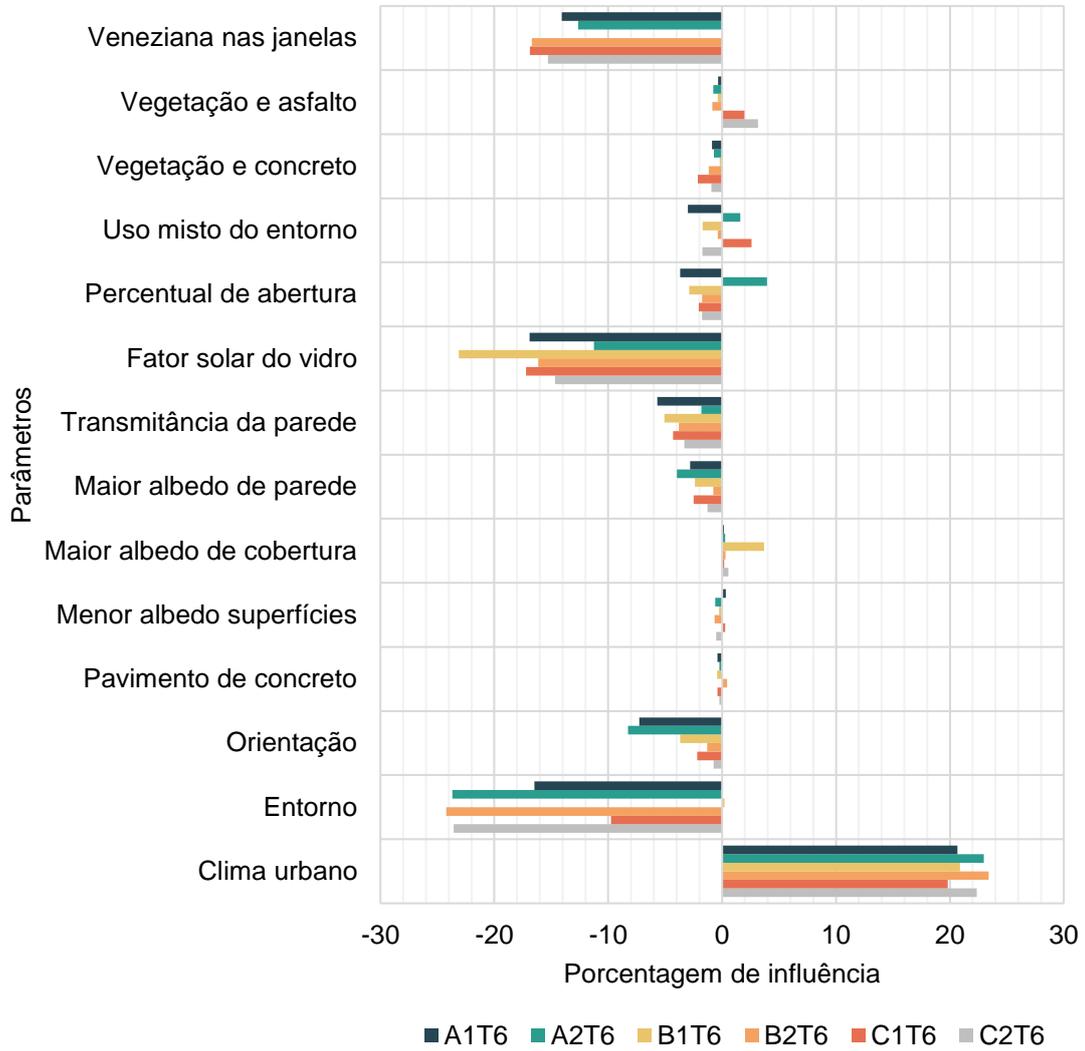
Parâmetros		A1T6	A2T6	B1T6	B2T6	C1T6	C2T6
Edificação	Envoltória	-5,692	-1,824	-5,062	-3,799	-4,302	-3,319
	FS do vidro	-16,906	-11,258	-36,823	-16,128	-17,209	-14,663
Entorno	PAF da fachada	-0,205	+3,949	-2,895	-1,77	-2,040	-1,752
	Uso misto	-2,997	+1,590	-1,703	-0,388	+2,583	-1,745

APÊNDICE G – Influência individual dos parâmetros

Porcentagem de influência dos parâmetros em projeções climáticas



Porcentagem de influência de todos os parâmetros em cenário atual



APÊNDICE H – Consumo por resfriamento em média mensal (kWh/m²)

A1T6	2018		2050		2080		T4	
Meses	RURAL	URBANO	RURAL	URBANO	RURAL	URBANO	RURAL	URBANO
Jan	3,636	3,595	5,409	5,513	6,572	6,516	5,164	4,723
Fev	3,101	3,246	4,834	5,113	5,807	6,006	4,347	4,253
Mar	4,448	4,692	7,087	7,623	7,970	8,266	6,394	6,233
Abr	2,990	2,961	5,548	5,534	6,617	6,460	4,516	3,995
Mai	1,264	1,220	4,029	3,776	5,174	4,831	2,165	1,611
Jun	0,750	0,769	3,523	3,232	4,683	4,329	1,386	1,008
Jul	0,888	0,779	3,458	3,026	4,556	4,014	1,572	1,021
Ago	0,817	0,707	3,061	2,818	4,022	3,692	1,419	0,894
Set	0,879	0,865	2,904	2,906	3,821	3,721	1,431	1,057
Out	2,208	2,245	4,303	4,441	5,647	5,717	3,208	2,894
Nov	3,556	3,593	6,023	6,191	7,501	7,551	4,968	4,689
Dez	4,077	4,157	6,202	6,462	7,540	7,671	5,804	5,535

A2T6	2018		2050		2080		T4	
Meses	RURAL	URBANO	RURAL	URBANO	RURAL	URBANO	RURAL	URBANO
Jan	3,525	3,314	5,071	4,752	6,138	5,848	5,726	4,372
Fev	2,985	2,982	4,479	4,359	5,367	5,337	4,935	3,851
Mar	4,269	4,211	6,503	6,290	7,318	7,123	6,880	5,912
Abr	3,024	2,778	5,263	4,687	6,250	5,712	4,468	3,843
Mai	1,430	1,251	3,937	3,187	5,016	4,310	1,923	1,592
Jun	0,949	0,869	3,495	2,721	4,584	3,872	1,065	1,030
Jul	1,079	0,855	3,433	2,567	4,481	3,626	1,328	1,023
Ago	0,953	0,704	3,010	2,316	3,920	3,248	1,246	0,833
Set	0,975	0,794	2,792	2,345	3,662	3,219	1,507	0,946
Out	2,196	2,046	4,070	3,762	5,301	5,065	3,565	2,601
Nov	3,374	3,277	5,525	5,243	6,868	6,681	5,866	4,298
Dez	3,915	3,831	5,761	5,539	6,973	6,843	6,473	5,128

B1T6	2018		2050		2080		T4	
Meses	RURAL	URBANO	RURAL	URBANO	RURAL	URBANO	RURAL	URBANO
Jan	3,879	4,354	5,796	6,622	7,032	7,714	5,610	6,284
Fev	3,308	3,943	5,212	6,172	6,256	7,129	4,738	5,685
Mar	4,737	5,657	7,667	9,157	8,604	9,859	6,923	8,295
Abr	3,148	3,866	5,921	7,150	7,060	8,174	4,807	5,848
Mai	1,317	1,853	4,277	5,462	5,495	6,679	2,267	3,041
Jun	0,762	1,295	3,724	5,022	4,953	6,289	1,411	2,237
Jul	0,915	1,260	3,657	4,571	4,820	5,690	1,622	2,135
Ago	0,850	1,210	3,274	4,217	4,292	5,201	1,483	2,062
Set	0,937	1,305	3,138	3,917	4,112	4,828	1,563	2,110
Out	2,356	2,777	4,618	5,372	6,055	6,756	3,489	4,094
Nov	3,830	4,335	6,530	7,419	8,112	8,881	5,479	6,219
Dez	4,358	4,966	6,664	7,677	8,095	8,976	6,324	7,190

B2T6	2018		2050		2080		T4	
Meses	RURAL	URBANO	RURAL	URBANO	RURAL	URBANO	RURAL	URBANO
Jan	4,022	3,546	5,894	5,013	7,066	6,204	5,949	4,799
Fev	3,463	3,170	5,406	4,557	6,423	5,618	5,107	4,213
Mar	4,797	4,611	7,876	6,763	8,755	7,687	7,188	6,595
Abr	3,172	3,158	5,900	5,302	6,981	6,441	4,718	4,369
Mai	1,370	1,478	4,195	3,718	5,366	4,960	2,067	1,819
Jun	0,822	1,037	3,569	3,229	4,739	4,497	1,167	1,171
Jul	0,988	1,007	3,562	3,023	4,684	4,168	1,427	1,160
Ago	0,917	0,874	3,317	2,764	4,300	3,775	1,331	1,002
Set	1,064	0,929	3,325	2,637	4,274	3,584	1,586	1,127
Out	2,504	2,202	4,795	3,971	6,187	5,375	3,698	2,868
Nov	4,046	3,517	6,791	5,490	8,324	7,045	6,057	4,710
Dez	4,498	4,085	6,767	5,813	8,145	7,227	6,734	5,673

C1T6	2018		2050		2080		T4	
Meses	RURAL	URBANO	RURAL	URBANO	RURAL	URBANO	RURAL	URBANO
Jan	3,667	3,685	5,460	5,651	6,631	6,647	5,136	4,842
Fev	3,130	3,333	4,887	5,246	5,869	6,125	4,286	4,326
Mar	4,485	4,934	7,167	8,008	8,055	8,616	6,343	6,775
Abr	3,006	3,370	5,594	6,305	6,670	7,236	4,418	4,621
Mai	1,266	1,562	4,054	4,712	5,207	5,827	2,050	2,058
Jun	0,748	1,027	3,539	4,107	4,706	5,251	1,279	1,373
Jul	0,887	1,020	3,476	3,820	4,580	4,829	1,464	1,349
Ago	0,817	0,979	3,083	3,600	4,051	4,489	1,303	1,256
Set	0,884	1,028	2,934	3,277	3,858	4,106	1,334	1,358
Out	2,227	2,319	4,347	4,567	5,702	5,842	3,126	2,998
Nov	3,594	3,668	6,094	6,317	7,584	7,658	4,932	4,755
Dez	4,114	4,243	6,263	6,595	7,613	7,780	5,785	5,656

C2T6	2018		2050		2080		T4	
Meses	RURAL	URBANO	RURAL	URBANO	RURAL	URBANO	RURAL	URBANO
Jan	3,888	3,425	5,684	4,817	6,798	5,932	5,726	4,372
Fev	3,357	3,068	5,238	4,394	6,208	5,387	4,935	3,851
Mar	4,612	4,399	7,595	6,434	8,427	7,294	6,880	5,912
Abr	3,034	2,998	5,641	4,997	6,665	6,055	4,468	3,843
Mai	1,296	1,436	3,971	3,558	5,080	4,726	1,923	1,592
Jun	0,782	1,019	3,342	3,099	4,452	4,291	1,065	1,030
Jul	0,939	0,989	3,359	2,900	4,422	3,980	1,328	1,023
Ago	0,871	0,846	3,153	2,619	4,089	3,574	1,246	0,833
Set	1,033	0,895	3,209	2,506	4,114	3,398	1,507	0,946
Out	2,427	2,132	4,644	3,832	5,972	5,153	3,565	2,601
Nov	3,931	3,402	6,571	5,272	8,035	6,730	5,866	4,298
Dez	4,345	3,927	6,518	5,553	7,833	6,874	6,473	5,128

Variação de consumo mensal mínima e máxima em porcentagem (%)

Cenário	Mínimo	Mês	Máximo	Mês
A1T6	-13,48	Agosto	+5,49	Março
A1T4	-36,99	Agosto	-2,18	Fevereiro
A2T6	-26,12	Agosto	-0,10	Fevereiro
A2T4	-50,00	Agosto	-8,91	Fevereiro
B1T6	+12,25	Janeiro	+69,94	Junho
B1T4	+12,02	Janeiro	+58,48	Junho
B2T6	-13,08	Novembro	+26,17	Junho
B2T4	-28,95	Setembro	+0,37	Junho
C1T6	+0,48	Janeiro	+37,31	Junho
C1T4	-7,89	Julho	+7,31	Junho
C2T6	-13,45	Novembro	+30,38	Junho
C2T4	-37,23	Setembro	-3,30	Junho

Consumo energético (kWh/m²) na média mensal de março com arquivo climático rural e urbano

Cenários	2018			2050			2080		
	Rural	Urbano	Diferença	Rural	Urbano	Diferença	Rural	Urbano	Diferença
A1T6	4,448	5,289	0,841	7,087	8,171	1,084	7,970	9,113	1,143
A2T6	4,269	5,168	0,899	6,503	7,922	1,419	7,318	8,538	1,220
B1T6	4,737	5,645	0,908	7,667	8,822	1,155	8,604	9,820	1,216
B2T6	4,797	5,824	1,027	7,876	9,105	1,229	8,755	10,026	1,271
C1T6	4,485	5,302	0,817	7,167	8,278	1,111	8,055	9,165	1,110
C2T6	4,612	5,556	0,944	7,595	8,702	1,107	8,427	9,584	1,157

Consumo energético (kWh/m²) na média mensal de março por parâmetro

Cenários	2018			2050			2080		
	Entorno	Vegetação	Veneziana	Entorno	Vegetação	Veneziana	Entorno	Vegetação	Veneziana
A1T6	4,692	4,657	4,116	7,623	7,241	6,413	8,266	8,176	7,335
A2T6	4,211	4,185	3,779	6,290	6,485	5,878	7,123	7,083	6,455
B1T6	5,657	5,646	5,645	9,157	8,822	8,822	9,859	9,820	9,820
B2T6	4,611	4,578	3,958	6,763	6,727	5,867	7,687	7,615	6,737
C1T6	4,934	4,846	4,198	8,008	7,591	6,639	8,616	8,466	7,486
C2T6	4,399	4,363	3,821	6,434	6,381	5,636	7,294	7,239	6,483

ANEXOS

ANEXO A – Tabelas da Prefeitura Municipal de Vitória

Plano Diretor Urbano de Vitória

ÍNDICES DE CONTROLE URBANÍSTICO ZOR, ZOC, ZOP, ZAR, ZOE e ZI												ANEXO 9 TABELA 01 FOLHA 01					
CARACTERÍSTICA DAS ZONAS	ZONA	COEFICIENTE DE APROVEITAMENTO (CA)					TAXA DE OCUPAÇÃO MÁXIMA	TAXA DE PERMEABILIDADE		AFASTAMENTOS MÍNIMOS		PARCELAMENTO					
		MÍNIMO	R1, R2 e R3	USO MISTO e R4	HOTEL, APART HOTEL E SIMILARES	USO NÃO RESIDENCIAL		TAXA MÍNIMA (6)	BACIAS CRÍTICAS	FRENTE (m)	FUNDOS E LATERAIS (m)	TESTADA MÍNIMA (m)	ÁREA MÍNIMA (m²)				
ZONA DE OCUPAÇÃO RESTRITA ZOR	ZOR 1	0,2	1,2	1,4 (7 e 11)	1,4 (7)	1,4 (7)	60%	10%	ANEXO 13	3	ISENTO	15	450m² (8)				
	ZOR 2 (9)		1,2	1,4 (11)	1,4 (10)	1,4	60%			3	ISENTO						
	ZOR 3		NA	NA	NA	NA	30%			5	8m						
ZONA DE OCUPAÇÃO CONTROLADA ZOC	ZOC 1	0,2	1,2	1,4 (11)	1,4 (10)	1,4	60%	10%	ANEXO 13	3 (12)	ISENTO	15	450m²				
	ZOC 2			2,25 (11)	2,25 (10)		60% (1)				ISENTO ATÉ 5,80m (5)						
	ZOC 3			2,8 (11)	2,8 (10)		60% (3)				ISENTO ATÉ 8,40m (5)						
ZONA DE OCUPAÇÃO PREFERENCIAL ZOP	ZOP 1	0,2	1,2	2,25	2,25	1,8	60%	10%	ANEXO 13	4	ISENTO ATÉ 5,80m (5)	12	450m²				
	ZOP 2					2,25	60% (2)			6 (14)	ISENTO ATÉ 5,80m (5)						
	ZOP 3					1,4	60% (3)			4	ISENTO ATÉ 8,40m (5)						
	ZOP 4					2,8	2,8			2,8	30% (4 e 18)			8	ISENTO ATÉ 8,40m (5)	30	900 m²
	ZOP 5	1,8	2,8	2,8	2,8	ANEXO 10	NA	ANEXO 10	ISENTO ATÉ 8,40m (13)	12	380m²						
ZONA ARTERIAL ZAR	ZAR 1	0,2	1,2	2,8	2,8	2,8	60% (4)	10%	ANEXO 13	4 (18)	ISENTO ATÉ 8,40m (5)	12	380m²				
	ZAR 2			2,25	2,25	1,4				4	ISENTO ATÉ 8,40m (5)						
ZONA DE OCUPAÇÃO ESPECÍFICA ZOE	ZOE 1	NA	NA	NA	0,3	0,3	ANEXO 11		ANEXO 13	5	4	NA	NA				
	ZOE 2						20%	60%									
	ZOE 3						1,0	1,0						50%	30%		
	ZOE 4						NA	1,2						ANEXO 12	10%	ANEXO 12	ISENTO ATÉ 8,40m (5)
	ZOE 5						0,5	0,3						20%	10%	ANEXO 13	5
ZONA INDUSTRIAL ZI	ZI	NA	NA	NA	NA	0,25	15%	60%	ANEXO 13	15 (17)	15 (17)	NA	NA				

NA = NÃO SE APLICA

CARACTERÍSTICAS FÍSICAS E ESTRUTURAIS DA REDE VIÁRIA BÁSICA													ANEXO 6 TABELA 01 FOLHA 05		
TIPO DE VIÁRIA	CARACTERÍSTICAS FÍSICAS							CARACTERÍSTICAS GEOMÉTRICAS							
	FAIXA DE DOMÍNIO	CANTEIRO CENTRAL	LARGURA DOS PASSEIOS	LARGURA DA FAIXA DE ROLAMENTO	NÚMERO DE FAIXAS DE ROLAMENTO POR SENTIDO	TIPO DE PAVIMENTAÇÃO	TIPO DE ILUMINAÇÃO	VELOCIDADE DIRETRIZ DE PROJETO	RAMPA MÁXIMA LONGITUDINAL	RAMPA MÍNIMA LONGITUDINAL	RAMPA TRANSVERSAL	INCLINAÇÃO DO PASSEIO E ALTURA DO MEIO-FIO	RAIO MÍNIMO	ALTURA LIVRE	INCLINAÇÃO DA GUIA REBAIXADA PARA PEDESTRES
LOCAL	12,00m a 21,00m	-	Mínimo = 2,50m	3,00m	1	Asfalto ou concreto ou bloquete ou paralelepípedo	Atender aos padrões estabelecidos pelo Órgão Municipal Responsável pela Infraestrutura Urbana	30 Km/h	10% a 15%	1,00%	2%	2% a inclinação transversal do passeio. Meio-fio com altura de 0,15m	Praça de retorno = 7,00m	5,50m	8,33%

Fonte: Prefeitura Municipal de Vitória (2018).

