

Izabella Medeiros de Lima

**A INFLUÊNCIA DO ENTORNO URBANO NA CARGA  
TÉRMICA DE EDIFICAÇÕES DE ESCRITÓRIO  
CONDICIONADAS ARTIFICIALMENTE EM UMA CIDADE DE  
CLIMA QUENTE E ÚMIDO**

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

Orientador: Prof. Roberto Lamberts, PhD.

Coorientadora: Prof.<sup>a</sup> Dr.<sup>a</sup> Veridiana Atanasio Scalco.

Florianópolis  
2018

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

Lima, Izabella Medeiros de

A influência do entorno urbano na carga térmica de edificações de escritório condicionadas artificialmente em uma cidade de clima quente e úmido / Izabella Medeiros de Lima ; orientador, Roberto Lamberts, coorientadora, Veridiana Atanasio Scalco, 2018.

188 p.

Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Santa Catarina, Centro Tecnológico, Programa de Pós-Graduação em Arquitetura e Urbanismo, Florianópolis, 2018.

Inclui referências.

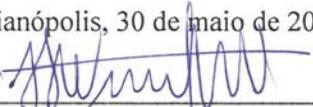
1. Arquitetura e Urbanismo. 2. Simulação energética. 3. Adensamento urbano. 4. Clima quente e úmido. I. Lamberts, Roberto. II. Scalco, Veridiana Atanasio. III. Universidade Federal de Santa Catarina. Programa de Pós-Graduação em Arquitetura e Urbanismo. IV. Título.

Izabella Medeiros de Lima

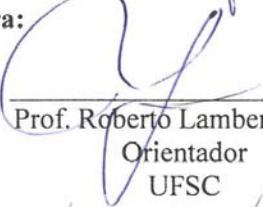
**A INFLUÊNCIA DO ENTORNO URBANO NA CARGA  
TÉRMICA DE EDIFICAÇÕES DE ESCRITÓRIO  
CONDICIONADAS ARTIFICIALMENTE EM UMA CIDADE DE  
CLIMA QUENTE E ÚMIDO**

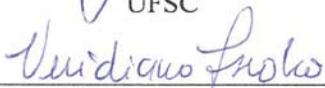
Esta Dissertação foi julgada adequada para obtenção do Título de  
“Mestre em Arquitetura e Urbanismo” e aprovada em sua forma final  
pelo Programa de Pós-Graduação em Arquitetura e Urbanismo.

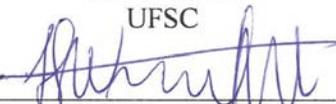
Florianópolis, 30 de maio de 2018.

  
Prof. Fernando Simon Westphal, Dr.  
Coordenador do Curso

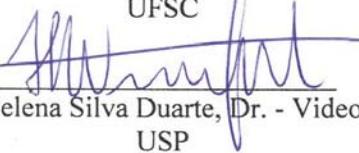
**Banca Examinadora:**

  
Prof. Roberto Lamberts, PhD  
Orientador  
UFSC

  
Prof.<sup>a</sup> Veridiana Atanasio Scalco, Dr.<sup>a</sup>  
Coorientadora  
UFSC

  
Prof. Fernando Simon Westphal, Dr.  
UFSC

  
Prof. Martin Ordenes Mizgier, Dr.  
UFSC

  
Prof. Denise Helena Silva Duarte, Dr. - Videoconferência  
USP



## AGRADECIMENTOS

Ao meu orientador, Roberto Lamberts, pela oportunidade, disponibilidade e principalmente por acreditar tanto no meu trabalho, mesmo quando até eu duvidei.

À minha coorientadora, Veridiana Scalco, por toda a dedicação ao trabalho e pela calma que me transmitiu ao longo desses dois anos.

À banca examinadora por aceitar avaliar o trabalho e pelas contribuições ao documento na qualificação e na defesa.

À CAPES pelo apoio financeiro ao longo dos dois anos, que viabilizou a presente pesquisa.

Aos amigos do LabEEE por compartilhar diariamente não só o conhecimento, mas também as alegrias e angústias da vida, nem sempre acadêmica, sem perder o humor. Sentirei falta das gírias nordestinas faladas nos mais diversos sotaques. Agradeço em especial ao Rayner Machado por toda a ajuda, principalmente com o UWG, à Ana Paula Melo por sanar todas as minhas dúvidas referentes ao EnergyPlus e ao Ricardo Rupp pela disponibilidade e auxílio com o DaySim.

Aos amigos e professores do Pós-ARQ, principalmente à minha amada turma de conforto, por toda a parceria dentro e fora da universidade. Vocês tornaram o mestrado muito mais especial.

Aos amigos e professores da UFAL que de alguma forma me incentivaram a continuar na vida acadêmica e me guiaram até o mestrado.

À Mayna e Roberta, que acompanharam de perto essa trajetória, por dividir as tristezas e somar as alegrias diariamente. Não tenho palavras para agradecer por tanto. Obrigada por fazer com que a saudade da terrinha ficasse um pouco menor, por tornar as dificuldades de morar sozinhas mais leves e por estarem no quarto ao lado para tudo.

Ao Chico, por ser meu grande porto seguro longe de casa. Obrigada pelo esforço para conseguirmos estar juntos todos os fins de semana, pela companhia em todas as novas aventuras e por me incentivar tanto.

Por fim, mas não menos importante, agradeço à minha família, por acreditar e apoiar todos os meus sonhos. Vocês são meus maiores exemplos, a razão para eu buscar ser uma pessoa melhor a cada dia e a força que me empurra sempre mais alto.



## RESUMO

Aponta-se o adensamento urbano como melhor solução para o crescimento sustentável das cidades. Entretanto, esse provoca modificações no consumo de energia resultantes principalmente de alterações climáticas como o aumento da temperatura do ar e a redução da velocidade do vento, alterações na quantidade de radiação solar que atinge superfícies urbanas, resultante da maior proximidade entre os edifícios que modifica os padrões de sombreamento e reflexão solar, e alteração na disponibilidade de iluminação natural. Algumas pesquisas indicam o aumento do consumo referente à carga térmica em áreas urbanas adensadas para climas temperado e mediterrâneo. Essa variação é resultado do aumento do consumo de equipamentos aquecedores em razão da redução da disponibilidade solar, mesmo levando em conta o aumento da temperatura do ar dos cânions resultante do efeito ilha de calor urbano. Considerando que a diminuição da radiação solar direta poderia ser um fator positivo em locais de clima quente, ainda que o efeito ilha de calor urbano passe a ser negativo devido ao aumento de temperatura, permanece o questionamento se o adensamento, do ponto de vista energético, poderia ser visto como um elemento positivo em regiões de clima quente. Dessa forma, o objetivo do presente estudo é analisar a influência do entorno urbano na carga térmica de edificações de escritório condicionadas artificialmente em Maceió/AL, uma cidade de clima quente e úmido. A avaliação, que focou no impacto da radiação solar levando em consideração a geometria e as características do envelope do entorno urbano, foi realizada por meio de simulações computacionais dinâmicas com o *software* EnergyPlus a partir das cargas necessárias para resfriamento. De forma auxiliar foram utilizados também os *softwares* UWG e DaySim buscando incluir nas simulações energéticas as modificações climáticas e o aproveitamento de luz natural das edificações dentro de contextos urbanos, respectivamente. A análise dos resultados demonstrou a importância da inserção do entorno urbano nas simulações energéticas, apontando uma redução média entre 16% e 18% na carga térmica quando esse é considerado e apontou o sombreamento como fator de maior impacto nessa redução. Dessa forma, considerando o contexto climático e os cenários de análise, o adensamento urbano, do ponto de vista energético, pode ser considerado uma boa estratégia urbana visando à redução da carga térmica de edificações comerciais com horário de funcionamento diurno.

**Palavras-chave:** Simulação energética. Adensamento urbano. Clima quente e úmido.



## ABSTRACT

Urban densification is pointed out as the most advantageous solution for the sustainable growth of cities. However, it causes changes in energy consumption resulting mainly from climate change such as increased air temperature and reduced wind speed, changes in the amount of solar radiation reaching urban surfaces, resulting from the greater proximity between buildings that modifies sun shading and reflection patterns, and changes in the availability of natural lighting. Some research indicates the increase in thermal load consumption in densely populated urban areas in Temperate and Mediterranean climates due to the increase in the consumption of heating equipment resulting from the reduction in solar availability, even taking into account the increase in the air temperature from the urban heat island effect. Considering that the decrease of the direct solar radiation could be a positive factor in places of hot climate, even if the urban heat island effect becomes negative due to the increase of temperature, the question remains whether the densification, from the energetic point of view, could be seen as a positive element in hot climate regions. The aim of this study is to analyze the influence of the urban environment on the thermal load of artificially conditioned office buildings in Maceió/AL, a city with a hot and humid climate. The evaluation, which focused on the impact of solar radiation taking into account the envelope geometry and the characteristics of the urban surroundings, was carried out through dynamic computational simulations with EnergyPlus software from the loads required for cooling. Additionally, UWG and DaySim software were used to include in the energy simulations the climatic changes and the use of natural light of buildings within urban contexts, respectively. The analysis of the results showed the importance of the insertion of the urban environment in the energy simulations, pointing out an average reduction between 16% and 18% in the thermal load when it is considered and that the shading is the major impact factor related to this reduction. Thus, considering the climatic context and the scenarios of analysis, the urban densification, from the energy point of view, can be considered a good urban strategy aiming at reducing the thermal load of commercial buildings with daytime working hours.

**Keywords:** Energy simulation. Urban densification. Hot and humid climate.



## LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Exemplos de contextos urbanos utilizados para a simulação computacional de energia.....	51
Figura 2: Demanda para aquecimento, resfriamento e iluminação artificial em kWh/m <sup>2</sup> /ano para as simulações com e sem o contexto urbano de alta densidade .....	52
Figura 3: Modelo do contexto urbano utilizado na simulação computacional de energia com destaque (bola vermelha) para a edificação de análise.....	53
Figura 4: Consumo de energia primária em Miami para aquecimento (a) e resfriamento (b) em kWh/ano para a edificação simulada isoladamente e dentro do contexto urbano.....	54
Figura 5: Consumo de energia primária em Minneapolis para aquecimento (a) e resfriamento (b) em kWh/ano para a edificação simulada isoladamente e dentro do contexto urbano.....	54
Figura 6: Contexto urbano (roxo) e edificação de análise (amarela e vermelha) utilizados para a simulação.....	55
Figura 7: Consumo de energia em kWh/ano para Miami (a), Washington (b) e Minneapolis (c) para a edificação no contexto urbano (IBE), sem levar em conta a reflexão (IBE w/o R) e sem levar em conta o sombreamento (IBE w/o S).....	56
Figura 8: Classes tipológicas mais representativas da forma urbana de Maceió.....	57
Figura 9:Tipologias urbanas selecionadas para a criação dos modelos .....	58
Figura 10: Diferentes contextos urbanos analisados em Singapura .....	61
Figura 11: Temperatura do ar externo em °C obtida através do arquivo EPW e calculada pelo UWG ao longo de uma semana típica do mês de julho .....	63
Figura 12: Mapa de Singapura indicando as estações de medição <i>in loco</i> em sete contextos urbanos (em amarelo) e em área rural (em vermelho) .....	64
Figura 13: Dados de temperatura do ar para sete diferentes contextos urbanos calculados pelo UWG (mod) e medidos <i>in loco</i> (obs), e medição realizada em área rural (Seletar) para fevereiro (a) e julho (b) .....	65
Figura 14: Índices do impacto da ilha de calor urbano no consumo de energia global de uma cidade.....	67

Figura 15: Contexto urbano utilizado para a simulação computacional (a) e destaque para a edificação de análise (b).....	70
Figura 16: Temperatura do ar externo em K de acordo com a medição <i>in loco</i> (Observed), calculado pelo TEB (TEB) e calculado a partir do método de acoplamento (CS) para um dia de inverno (a) e verão (b).....	71
Figura 17: Consumo médio de eletricidade em $Wm^2/dia$ da edificação a partir da medição <i>in loco</i> (Observed), calculado pelo TEB (TEB) e calculado pelo método de acoplamento (CS) para dias de dois meses do inverno.....	72
Figura 18: Média horária mensal do valor de correção da temperatura do ar externo em $^{\circ}C$ de acordo com a intensidade da ilha de calor urbano .....	73
Figura 19: Modelo utilizado para a simulação energética.....	73
Figura 20: Demanda anual de aquecimento normalizada em $56MJ/m^2$ (a) e de resfriamento em $1,7MJ/m^2$ (b) do edifício isolado (SA) e no contexto urbano (SC). .....	74
Figura 21: Contextos urbanos analisados com edificação de análise (amarelo) e edificações de entorno modeladas como elementos de sombreamento (azul).....	75
Figura 22: Relação entre a taxa de cobertura do solo da área analisada e a demanda anual de energia ( $kWh/m^2$ ) do apartamento para cinco estudos de caso.....	76
Figura 23: Imagem da cobertura de quadra dos bairros analisados com 10 lotes por quadra (a) e com 8 lotes por quadra (b).....	83
Figura 24: Imagem de perspectiva de quadra dos bairros analisados com 10 (a) e 8 (b) lotes (considerando a dimensão dos lotes de edificações verticais).....	83
Figura 25: Imagens de fachadas de edifícios residenciais em Maceió .....	84
Figura 26: Imagens de fachadas de edifícios de comércio/serviços em Maceió.....	84
Figura 27: Desenho urbano da área de estudo e localização do lote de análise com fachada principal voltada para o Norte (a) ou para o Sul (b) .....	85
Figura 28: Dimensões das edificações de análise e afastamentos no lote do tipo 1 (a) e do tipo 2 (b) .....	86
Figura 29: Plantas esquemáticas das zonas térmicas de cada pavimento das edificações de tipo 1 (a) e tipo 2 (b).....	87
Figura 30: <i>Schedule</i> de funcionamento da edificação nos dias de semana .....	89

Figura 31: Entorno homogêneo do tipo 1 (a) e tipo 2 (b) e heterogêneo .....	90
Figura 32: Carta bioclimática da cidade de Maceió.....	96
Figura 33: Média diária mensal da radiação solar em kWh/m <sup>2</sup> /dia em Maceió.....	97
Figura 34: Carta solar de Maceió .....	97
Figura 35: Médias mensais de temperatura e umidade do ar no ano em Maceió .....	98
Figura 36: Variação diária de temperatura do ar ao longo do ano em Maceió.....	98
Figura 37: Taxa de precipitação acumulada (mm ao mês) de Maceió.....	99
Figura 38: Diagrama de velocidade, umidade, temperatura e frequência de ocorrência de ventos em Maceió elaborado no <i>software Climate Consultant</i> .....	99
Figura 39: Reflexão solar direta refletida por um elemento opaco ( <i>Wall</i> ) de forma difusa e por um elemento translúcido ( <i>Window</i> ) de forma especular .....	101
Figura 40: Localização dos sensores de iluminação nas zonas perimetrais das edificações de tipo 1 (a) e de tipo 2 (b).....	105
Figura 41: Representação dos tipos de radiação que compõem a radiação solar total incidente em uma superfície urbana.....	109
Figura 42: Carga térmica anual dos cenários sem entorno e cenários homogêneos (50RM) .....	112
Figura 43: Carga térmica anual dos cenários homogêneos (50RM) e das simulações desses sem a modelagem da geometria de entorno..	114
Figura 44: Carga térmica anual dos cenários homogêneos (50RM) e das simulações desses sem considerar as modificações do UWG....	114
Figura 45: Carga térmica anual dos cenários homogêneos (50RM) e das simulações desses com o aproveitamento da iluminação natural	115
Figura 46: Diferença de temperatura média mensal por hora entre o arquivo climático UWG 1 e o EPW INMET 2016 de Maceió.....	117
Figura 47: Diferença de temperatura média mensal por hora entre o arquivo climático UWG 2 e o EPW INMET 2016 de Maceió.....	118
Figura 48: Carga térmica anual dos cenários da tipologia 1.....	120
Figura 49: Carga térmica anual dos cenários da tipologia 2.....	121
Figura 50: Carga térmica mensal para cenários da tipologia 1.	123
Figura 51: Carga térmica mensal para cenários da tipologia 2.	124
Figura 52: Carga por pavimento referente à Tipologia 1.....	126
Figura 53: Carga por pavimento referente à Tipologia 2.....	127

Figura 54: Exemplo de diagrama de caixa utilizado na análise dos resultados .....	129
Figura 55: Carga térmica por orientação referente à tipologia 1 .....	130
Figura 56: Carga térmica por orientação referente à tipologia 2 .....	131
Figura 57: Radiação incidente nas aberturas referente à tipologia 1 N.....	134
Figura 58: Radiação incidente nas aberturas referente à tipologia 1 S .....	135
Figura 59: Radiação incidente nas aberturas referente à tipologia 2 N.....	136
Figura 60: Radiação incidente nas aberturas referente à tipologia 2 S .....	137
Figura 61: Indicação de cores referentes às máscaras de sombra para tipologia 1 .....	140
Figura 62: Indicação de cores referentes às máscaras de sombra para tipologia 2 .....	141
Figura 63: Contexto urbano simulado com as letras identificando cada lote para o sorteio referente ao entono heterogêneo .....	161
Figura 64: Representação de uma cidade e dos volumes de controle considerados no UWG .....	163
Figura 65: Diagrama de esquema de funcionamento dos módulos do UWG.....	164
Figura 66: Temperatura do ar externo entre uma semana de março e abril .....	173
Figura 67: Temperatura do ar externo entre uma semana de agosto .....	174
Figura 68: Diferença de temperatura entre o arquivo climático UWG 1 e o EPW INMET 2016 de Maceió.....	176
Figura 69: Diferença de temperatura entre o arquivo climático UWG 2 e o EPW INMET 2016 de Maceió.....	177
Figura 70: Diferença de temperatura entre o arquivo climático UWG 3 e o EPW INMET 2016 de Maceió.....	177
Figura 71: Comparação horária entre UWG e INMET em todas as horas do ano, para o UWG 1 (a), UWG 2 (b) e UWG 3 (c).....	178
Figura 72: Comparação horária entre UWG e INMET considerando as horas com ocupação (8h às 18h), para o UWG 1 (a), UWG 2 (b) e UWG 3 (c).....	179
Figura 73: Umidade relativa do ar externo entre uma semana de março/abril .....	181

Figura 74: Umidade relativa do ar externo entre uma semana de agosto .....	181
Figura 75: Diferença de umidade relativa entre o arquivo climático UWG 1 e o EPW INMET 2016 de Maceió .....	182
Figura 76: Diferença de umidade relativa entre o arquivo climático UWG 2 e o EPW INMET 2016 de Maceió .....	183
Figura 77: Diferença de umidade relativa entre o arquivo climático UWG 3 e o EPW INMET 2016 de Maceió .....	183
Figura 78: Relação entre radiação solar incidente e carga térmica para resfriamento para as zonas Norte e Sul do cenário T1 N .....	185
Figura 79: Relação entre radiação solar incidente e carga térmica para resfriamento para as zonas Leste e Oeste do cenário T1 N .....	185
Figura 80: Relação entre radiação solar incidente e carga térmica para resfriamento para as zonas Norte e Sul do cenário T1 S .....	186
Figura 81: Relação entre radiação solar incidente e carga térmica para resfriamento para as zonas Leste e Oeste do cenário T1 S .....	186
Figura 82: Relação entre radiação solar incidente e carga térmica para resfriamento para as zonas Norte e Sul do cenário T2 N .....	187
Figura 83: Relação entre radiação solar incidente e carga térmica para resfriamento para as zonas Leste e Oeste do cenário T2 N .....	187
Figura 84: Relação entre radiação solar incidente e carga térmica para resfriamento para as zonas Norte e Sul do cenário T2 S .....	188
Figura 85: Relação entre radiação solar incidente e carga térmica para resfriamento para as zonas Leste e Oeste do cenário T2 S .....	188



## LISTA DE QUADROS

Quadro 1: Estudos brasileiros que abordam o impacto de diferentes características da morfologia urbana .....	36
Quadro 2: Propriedades dos elementos construtivos adotados ...	88
Quadro 3: Parâmetros do modelo para as simulações computacionais.....	89
Quadro 4: Cenários para simulação computacional referentes à tipologia 1.....	91
Quadro 5: Cenários para simulação computacional referentes à tipologia 2.....	92
Quadro 6: Variação paramétrica das características do envelope das edificações de entorno dos cenários homogêneos.....	94
Quadro 7: Máscaras de sombra do cenário T1 N .....	140
Quadro 8: Máscaras de sombra do cenário T2 N .....	141
Quadro 9: Quadro do sorteio no Excel referente à ocupação dos lotes de entorno .....	161
Quadro 10: Valores para a definição de refletância e porcentagem de área envidraçada das superfícies das edificações do entorno de forma aleatória.....	162
Quadro 11: Dados de entrada para os arquivos climáticos urbanos UWG 1, 2 e 3 .....	167



## LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Parâmetros urbanísticos para parte dos bairros litorâneos de Maceió considerando a limitação do cone do farol (tipo1) e sem considera-la (tipo 2).....	82
Tabela 2: Diferença entre o valor de carga anual dos cenários homogêneos e desses sem a influência, separadamente, do sombreamento e da reflexão.....	116
Tabela 3: Porcentagem de redução da carga térmica resultante da diferença entre os cenários sem entorno e os cenários com entorno (homogêneos).....	125
Tabela 4: Diferença de incidência da radiação solar entre os cenários urbanos homogêneos II 20RA e II 80RB considerando os três pavimentos de análise.....	139
Tabela 5: Desvio médio e padrão dos resultados de temperatura do ar (°C) de cada cenário homogêneo em relação ao cenário homogêneo T1 N/S II - 50RM .....	171
Tabela 6: Desvio médio e padrão dos resultados de temperatura do ar (°C) de cada cenário homogêneo em relação ao cenário homogêneo T2 N/S II - 50RM .....	171



## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas  
ASHRAE - *American Society of Heating, Refrigeration and Air Conditioning Engineers, Inc.*  
BEM – *Building Energy Models*  
UBEM – *Urban Building Energy Models*  
CB3E - Centro Brasileiro de Eficiência Energética em Edificações  
CEC - *California Energy Commission*  
CFD - *Computational fluid dynamics*  
COP- *Coefficient of Performance*  
EPW - *EnergyPlus Weather File*  
IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística  
IEA - *International Energy Agency*  
INMETRO – Instituto Nacional de Metrologia, Qualidade e Tecnologia  
ISSO - *International Organization for Standardization*  
LABEEE – Laboratório de Eficiência Energética em Edificações  
NBR - Norma Técnica Brasileira  
PROCEL - Programa Nacional de Conservação de Energia Elétrica  
RTQ-R - Regulamento Técnico da Qualidade para o Nível de Eficiência Energética de Edificações Comerciais  
UHI – *Urban Heat Island*  
WWR – *Window to Wall Ratio*



## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b> .....	<b>25</b>
1.1	OBJETIVOS .....	30
1.1.1	Objetivo Geral.....	30
1.1.2	Objetivos Específicos.....	30
1.2	ESTRUTURA DO TRABALHO.....	30
<b>2</b>	<b>REVISÃO DE LITERATURA</b> .....	<b>33</b>
2.1	ADENSAMENTO URBANO E DESEMPENHO ENERGÉTICO.....	33
2.1.1	Fenômenos climáticos.....	37
2.1.2	Radiação solar.....	42
2.1.2.1	Balanco de radiação em superfícies urbanas.....	42
2.1.2.2	Reflexão solar.....	44
2.1.2.3	Sombreamento.....	45
2.1.3	Iluminação.....	47
2.2	SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL EM CONTEXTOS URBANOS.....	49
2.2.1	Simulações com modelagem das características físicas do contexto urbano.....	50
2.2.2	Simulações das modificações climáticas promovidas pelo contexto urbano.....	59
2.2.3	Simulações acopladas das modificações climáticas e físicas proporcionadas pelo contexto urbano.....	68
2.3	CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	78
<b>3</b>	<b>PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS</b> .....	<b>81</b>
3.1	DEFINIÇÃO DOS PARÂMETROS DO MODELO.....	81
3.1.1	Edificação de análise.....	86
3.1.2	Entorno.....	90
3.1.3	Cenários de análise.....	90
3.1.4	Contexto climático.....	95
3.2	SIMULAÇÕES COMPUTACIONAIS.....	100
3.2.1	Simulação termo-energética – EnergyPlus.....	100
3.2.2	Simulação para modificações de arquivo climático - UWG.....	102
3.2.3	Simulação de iluminação natural - DaySim.....	103
3.3	TRATAMENTO DE DADOS.....	106
3.3.1	Comparação do desempenho energético – Carga térmica... ..	106
3.3.2	Comparação da radiação incidente nas aberturas.....	108

<b>4</b>	<b>RESULTADOS E DISCUSSÕES.....</b>	<b>111</b>
4.1	CARGA TÉRMICA GERAL ANUAL .....	111
4.1.1	Influência da consideração do contexto urbano nas simulações computacionais .....	111
4.1.2	Influência das características do envelope do contexto urbano nas simulações computacionais .....	119
4.2	CARGA TÉRMICA DETALHADA .....	123
4.2.1	Carga térmica mensal.....	123
4.2.2	Carga térmica anual por pavimento .....	126
4.2.3	Carga térmica anual por orientação .....	128
4.3	RADIAÇÃO INCIDENTE NAS ABERTURAS .....	132
<b>5</b>	<b>CONCLUSÕES.....</b>	<b>145</b>
5.1	LIMITAÇÕES .....	149
5.2	SUGESTÕES PARA FUTUROS TRABALHOS .....	150
	<b>REFERÊNCIAS.....</b>	<b>153</b>
	<b>APÊNDICE A: Método para a definição da aleatoriedade das características do entorno heterogêneo.....</b>	<b>161</b>
	<b>APÊNDICE B: Funcionamento do modelo computacional UWG</b>	<b>163</b>
	<b>APÊNDICE C: Dados de entrada do modelo computacional UWG .....</b>	<b>167</b>
	<b>APÊNDICE D: Resultados do teste de variação das características do envelope dos edifícios de entorno no modelo computacional UWG .....</b>	<b>171</b>
	<b>APÊNDICE E: Resultados da modificação do arquivo climático com o modelo computacional UWG .....</b>	<b>173</b>
	<b>APÊNDICE F: Relação entre radiação solar incidente e carga térmica para resfriamento.....</b>	<b>185</b>

## 1 INTRODUÇÃO

O consumo de energia tem crescido rapidamente em todo o mundo nas últimas décadas. As cidades são responsáveis por grande parcela desse aumento e o edifício em si representa mais de um terço do consumo final de energia (IEA, 2013). O uso de energia nas cidades tende a ser cada vez maior e, conseqüentemente, mais importante, diante de fatores como o crescimento acentuado da população urbana, a urbanização, o aumento da emissão de gases e o conseqüente aumento das temperaturas resultante do aquecimento global e das ilhas de calor urbano (FRAYSSINET et al., 2018; MARTINS; BONHOMME; ADOLPHE, 2013).

A mesma tendência de urbanização é observada no Brasil, no qual até a primeira metade do século XX caracterizava-se como predominantemente rural. O desenvolvimento da industrialização e o êxodo rural resultaram no processo de urbanização, com a modernização, crescimento e surgimento de novas cidades (DEÁK; SCHIFFER, 2004). O fenômeno demográfico e social do crescimento das cidades concretizava o novo caráter urbano no país. Segundo Carvalho (2002), nos anos de 1940, 37% da população brasileira concentrava-se nas áreas urbanas. Em 2014 esse número já havia alcançado 84% (IBGE, 2014).

Por questões econômicas, sociais e ambientais aponta-se o adensamento urbano como a melhor solução para o crescimento sustentável nas áreas urbanas. Porém, do ponto de vista energético a forma urbana adensada por meio da verticalização é recorrentemente abordada sob o viés negativo e seus efeitos são considerados complexos e conflitantes.

Pesquisas indicam o aumento do consumo energético em áreas urbanas adensadas de locais de clima frio devido ao aumento do consumo de equipamentos aquecedores em razão da redução da disponibilidade solar, mesmo levando em conta o aumento da temperatura do ar dos cânions resultante do efeito ilha de calor urbano (ou UHI - *Urban Heat Island*) (ALLEGRIANI; DORER; CARMELIET, 2012). Já em climas mediterrâneos, apesar da grande parte dos contextos urbanos analisados também indicarem um aumento do consumo energético de edificações dentro de áreas urbanas, o contexto mais adensado entre os analisados apresentou uma leve redução do consumo quando comparado a uma edificação sem modelagem de entorno e sem a consideração das alterações climáticas provocadas pelo efeito ilha de calor urbano (SALVATI; COCH; MORGANTI, 2017).

Considerando que a diminuição da radiação solar direta incidente nas fachadas poderia ser um fator positivo em locais de clima quente, mesmo que o efeito ilha de calor urbano passe a ser negativo devido ao aumento de temperatura, permanece o questionamento se o adensamento, do ponto de vista energético, poderia ser visto como um elemento positivo em regiões de clima quente.

A existência do contexto urbano provoca alterações no balanço energético, resultantes de (i) alterações climáticas em razão do aumento da temperatura do ar externo - resultante do intenso recobrimento do solo, redução da vegetação urbana e utilização de materiais de alta absorção solar - e da diminuição da velocidade do vento - resultante do aumento das barreiras edificadas, contribuindo para atenuação do efeito da ilha de calor urbano (LIU et al., 2017), (ii) alteração da quantidade de radiação solar que atinge superfícies urbanas, resultante da maior proximidade entre os edifícios que modifica os padrões de sombreamento e reflexão solar (HAN; TAYLOR; PISELLO, 2015), e (iii) alteração do acesso à iluminação natural (PISELLO et al., 2014). A dimensão desses efeitos deve variar ainda a depender do contexto urbano e do contexto climático de análise.

A análise conjunta dos elementos do contexto urbano detalhados, assim como seu impacto nas diferentes escalas climáticas e consequente impacto no desempenho térmico e energético das edificações ainda é um desafio para os *softwares* que realizam simulação termo-energética. Diferentes escalas temporais e dimensionais referentes aos modelos, assim como a limitação das máquinas, a necessidade de um grande número de informações das características urbanas e a difícil previsão do comportamento dos usuários inviabilizam uma previsão anual completa dos impactos energéticos das diferentes características do contexto urbano (FRAYSSINET et al., 2018; SREBRIC; HEIDARINEJAD; LIU, 2015). Mao et al. (2017) destacam a necessidade urgente de ferramentas de simulação que quantifique o real impacto causado pelas interações entre o comportamento térmico dos edifícios no contexto urbano e as mudanças climáticas urbanas.

Apesar das limitações nesse sentido, investigações acerca do assunto são importantes para o desenvolvimento da temática. Dessa forma, a problemática da presente pesquisa baseia-se em analisar a influência do contexto urbano no desempenho energético de edifícios, observando mais profundamente a influência do tópico (ii) citado anteriormente, a radiação solar, no desempenho energético de edificações a partir da variação de valores de refletância e porcentagem de área envidraçada dos elementos do entorno urbano e de diferentes

padrões de sombreamento proporcionados por diferentes geometrias urbanas.

As demais alterações promovidas pelo contexto urbano como a modificação climática e a alteração da disponibilidade de iluminação natural foram consideradas de maneira simplificada para a viabilização do estudo. Em relação à modificação climática considerou-se a mudança na temperatura e umidade do ar resultante do fenômeno ilha de calor urbano a partir da geração de novos arquivos climáticos com o *software* UWG. Já em relação à iluminação, considerou-se a utilização da iluminação natural em apenas um tipo de cenário para entender a sua influência na carga térmica e nos demais cenários a iluminação artificial permaneceu ligada durante todo o horário de uso da edificação, sem o aproveitamento da iluminação natural.

A quantidade de radiação solar que incide nos edifícios dentro de áreas urbanas irá depender da reflexão e do sombreamento provocados pelos elementos do entorno, como edificações, arborização e o próprio solo, além dos fatores geográficos referentes à insolação como latitude e altitude. Diante da maior proximidade entre os edifícios, os efeitos da reflexão solar e do sombreamento tornam-se mais ou menos intensos, principalmente em cidades de alta densidade urbana, e dessa forma surge a necessidade de pesquisas que avaliem as edificações, do ponto de vista energético, dentro de contextos urbanos. Essa necessidade parte do princípio de que as análises do edifício isoladamente já não representam mais a realidade destes lugares referentes à sua demanda por aquecimento e resfriamento, já que não levam em conta os efeitos provocados pelos edifícios de seu entorno.

A maioria dos estudos referentes ao consumo energético das edificações ainda não incluem as edificações do entorno urbano na análise. Com o aumento da população urbana e do adensamento a relação entre prédios deve ser crescente, modificando significativamente seu consumo energético. Essa constatação pode ser observada a partir de simulações computacionais energéticas comparando a demanda de energia de um edifício sem entorno com a demanda de um edifício modelado juntamente com o entorno. Nesse sentido os edifícios de entorno estão começando a ser considerados em algumas simulações energéticas como elementos de sombreamento, demonstrando a importância de se levar em consideração o impacto no entorno do projeto arquitetônico.

Pisello et al. (2012) encontraram imprecisões na predição de energia de até 32,7% entre a análise de um edifício sem entorno e desse com a presença do entorno como elemento de sombreamento em

diferentes contextos climáticos dos Estados Unidos. De modo geral, no verão observou-se uma superestimação no consumo de energia de até 47%. Já no inverno houve subestimação do consumo energético de até 22%. Samuelson et al. (2016) demonstraram em Pequim, Nova York e Shenzhen o efeito da consideração de edificações do entorno como elemento de sombreamento em simulações computacionais de energia em quatro diferentes contextos urbanos, indicando que esse impacto é significativo mesmo em contextos urbanos pouco densos. Han, Taylor e Pisello (2015) também consideraram os edifícios de entorno como elementos de sombreamento em diferentes contextos climáticos dos EUA e observaram que o impacto na imprecisão da predição de energia quando não se leva em conta o efeito entre prédios é maior em locais de clima mais quente dentre os observados.

Outros estudos consideraram a inserção dos efeitos provocados pelo contexto urbano a partir da utilização de arquivos climáticos urbanos, ou seja, através da geração de arquivos climáticos de acordo com as características urbanas do local de análise ou medição de variáveis urbanas *in loco*, visando uma predição de performance de energia mais precisa em simulações dinâmicas. As diferenças entre os arquivos climáticos rurais e urbanos podem levar a predições imprecisas e a escolhas de projeto incoerentes (PYRGOU et al., 2017). Porém, os estudos utilizando *softwares* modificadores de clima urbano têm se concentrado em analisar as alterações climáticas proporcionadas pelo fenômeno ilha de calor urbano nos cânions urbanos e em validá-lo (BUENO; NAKANO; NORFORD, 2015; UNZETA; NORFORD; BRITTER, 2009), enquanto poucos alcançam como resultados os impactos energéticos (SANTAMOURIS, 2014).

Apesar da existência de estudos tanto referentes à inserção das características físicas dos contextos urbanos como elementos de sombreamento, como estudos relacionados às modificações climáticas proporcionadas por esses contextos, ainda existem poucos trabalhos que utilizem ferramentas de simulações energéticas com modelagem da geometria urbana em conjunto com arquivos climáticos urbanos, que de fato representem o contexto climático de cada região da cidade.

Visando uma predição de consumo de energia mais precisa e realista, Allegrini, Dorer e Carmeliet (2012), Bueno et al. (2011) e Salvati, Coch e Morganti (2017) incorporaram nas simulações energéticas que levavam em conta a influência da geometria do entorno como elementos de sombreamento, os arquivos climáticos modificados de acordo com o contexto urbano de análise, que adicionam o efeito ilha de calor urbano. Esses estudos realizados na França, Suíça e Itália,

respectivamente, demonstraram que o efeito ilha de calor urbano, assim como a inserção da geometria nas simulações termo-energéticas, modifica significativamente o consumo de energia, que é maior em grande parte dos cenários analisados nas regiões de clima temperado e mediterrâneo.

Buscando aumentar a abrangência climática dos estudos que analisam de maneira conjunta os impactos do contexto urbano no desempenho energético de edificações, com aprofundamento nos impactos relacionados à radiação solar, o presente estudo propõe-se a analisar a influência do contexto urbano no desempenho energético de edificações em clima quente e úmido. Para isso, as alterações climáticas provocadas pelo entorno urbano serão consideradas a partir de simulações no UWG, as alterações no padrão de aproveitamento de iluminação natural serão consideradas a partir de simulações com o DaySim e as simulações com o *software* EnergyPlus serão responsáveis pela análise do impacto das modificações da radiação solar, além da análise de carga térmica geral de forma acoplada com o UWG e DaySim.

Diante do exposto, o trabalho pretende contribuir para (a) a discussão da inserção de contextos urbanos nas simulações computacionais energéticas dinâmicas, considerando as principais alterações que o mesmo provoca (climática, na radiação e na disponibilidade de luz natural), (b) para a determinação de quais as características dos edifícios do entorno urbano, dentre as analisadas (nível de densidade, refletância do envelope e porcentagem de área envidraçada), que mais influenciam no desempenho energético de uma edificação e (c) para observar o comportamento do desempenho energético de edificações de escritórios dentro de contextos urbanos localizadas em clima quente e úmido.

Para o alcance da contribuição proposta no item (b) apresentado acima, o presente estudo propõe-se a analisar a necessidade da consideração de condições mais detalhadas e reais do contexto urbano em simulações computacionais de energia para uma maior precisão na predição do consumo energético das edificações, não apenas considerando elementos externos como elementos de sombreamento, mas considerando também seus reais valores de refletância, porcentagem de área envidraçada e tipo de vidro utilizado, para que a reflexão solar, proveniente da radiação direta e difusa, possa ser analisada da maneira como realmente se apresentam no meio urbano, seja ela proveniente do solo ou de superfícies verticais. É importante ressaltar também que diferentes densidades produzem diferentes padrões

de reflexão solar e de sombreamento. Dessa forma esses fenômenos também serão analisados em diferentes tipos de cenários urbanos.

## 1.1 OBJETIVOS

### 1.1.1 Objetivo Geral

O objetivo geral da pesquisa é analisar, por meio de simulações computacionais, a influência do entorno urbano na carga térmica de edificações de escritório condicionadas artificialmente em Maceió, caracterizada pelo clima quente e úmido.

### 1.1.2 Objetivos Específicos

- a) Identificar, por meio da revisão bibliográfica, um método de simulação computacional adequado para avaliações termo-energéticas de edificações dentro de contextos urbanos reais ou de cenários urbanos virtuais;
- b) Comparar o impacto das diferentes alterações provocadas pela consideração do contexto urbano (no clima, na radiação solar e na alteração de disponibilidade de iluminação natural) na carga térmica das edificações de análise;
- c) Identificar quais características relativas ao envelope das edificações de entorno urbano mais impactam na carga térmica da edificação de análise;
- d) Observar a relação entre a variação da radiação solar incidente nas aberturas e a variação da carga térmica;

## 1.2 ESTRUTURA DO TRABALHO

O presente trabalho possui cinco capítulos. O primeiro apresenta a introdução, que traz uma contextualização ao tema de forma sintética, apresentando a problemática, a justificativa, as pesquisas recentes, a lacuna a ser preenchida e as principais contribuições pretendidas para a temática. Em seguida são apresentados os objetivos geral e específicos (tópico 1.1) e a presente estrutura do trabalho (tópico 1.2).

O segundo capítulo constitui a revisão de literatura. Primeiramente é abordada a relação entre o adensamento urbano e o desempenho energético das edificações (tópico 2.1), detalhando-se as três principais influências que ocorrem a partir do adensamento urbano no consumo de energia dos edifícios dentro de contextos urbanos: as

modificações no clima (tópico 2.1.1), as modificações no padrão de radiação solar que atinge a superfície das edificações (tópico 2.1.2) e as modificações no aproveitamento de iluminação natural (tópico 2.1.3). O segundo tópico apresenta as principais e mais recentes pesquisas que abordam o uso da simulação computacional em contextos urbanos visando à predição do consumo energético anual dos edifícios (tópico 2.2). Por fim, o último tópico do capítulo traz as considerações finais sobre a revisão apresentada (tópico 2.3).

No terceiro capítulo foram detalhados os procedimentos metodológicos utilizados para alcançar os objetivos, divididos em três etapas. Primeiro apresentou-se a definição dos parâmetros do modelo referentes às características do edifício de análise e do entorno, resultando na definição dos cenários a serem analisados (tópico 3.1). Depois foram apresentados os *softwares* EnergyPlus, UWG e DaySim, indicando seus respectivos parâmetros para as simulações computacionais (tópico 3.2) e por fim como foi realizado o tratamento dos dados (tópico 3.3).

Os dois últimos capítulos apresentam, respectivamente, os resultados e discussões da pesquisa (tópico 4) e as conclusões (tópico 5). Por fim, são apresentadas as referências bibliográficas utilizadas no trabalho, os anexos e os apêndices.



## 2 REVISÃO DE LITERATURA

A revisão de literatura está dividida em três tópicos principais. O primeiro trata da contextualização da problemática da dissertação que envolve a relação entre o adensamento urbano e o desempenho energético das edificações. Neste tópico são apresentadas as três principais consequências do adensamento urbano no consumo de energia dos edifícios dentro de contextos urbanos: as modificações no clima urbano (variáveis ambientais), as modificações no padrão de radiação solar que atinge a superfície das edificações e a modificação do aproveitamento de iluminação natural. No segundo tópico apresentam-se pesquisas recentes que utilizam a simulação computacional em contextos urbanos, demonstrando os métodos mais utilizados e recomendados para uma análise energética que leva em conta as alterações resultantes da inserção do contexto urbano, assim como as principais contribuições alcançadas para a temática. O último tópico trata das considerações finais referentes à revisão de literatura apresentada.

### 2.1 ADENSAMENTO URBANO E DESEMPENHO ENERGÉTICO

O adensamento é resultado da intensificação do uso e ocupação do solo nas cidades, e é observado em grande parte dos centros urbanos. O mesmo ocorre tanto em relação ao aumento da taxa de ocupação da edificação no terreno, quando em relação à verticalização.

Segundo Barbirato, Torres e Barbosa (2015), a literatura especializada demonstra que a adoção de uma malha urbana dispersa gera diversos problemas para a cidade. Dessa forma, por questões econômicas, sociais e ambientais aponta-se o adensamento urbano como a melhor solução para o crescimento sustentável nas áreas urbanas. Do ponto de vista econômico, o adensamento promoveria menores gastos com os sistemas urbanos de água, esgoto, drenagem, pavimentação e transporte, por exemplo. Já do ponto de vista social, diminuiria as distâncias a serem percorridas diariamente, aumentando a qualidade de vida da população. Do ponto de vista ambiental, uma cidade adensada é compacta, necessitando assim de menor destruição de áreas verdes.

Porém, do ponto de vista energético os efeitos do adensamento são complexos e conflitantes, gerando dúvidas em relação a sua adequabilidade frente a seus possíveis efeitos negativos para os espaços externos e internos. Isso porque duas de suas principais consequências – a modificação no clima que gera o efeito ilha de calor urbano e a

modificação no padrão de radiação solar que alteram a reflexão solar e sombreamento - alteram o padrão de consumo de energia de uma edificação de forma oposta, e a falta de conhecimento sobre a dimensão dessas modificações podem distorcer o entendimento acerca do tema. Dessa forma, Salvati, Coch e Morganti (2017) ressalta a necessidade de avaliar o efeito do adensamento urbano no desempenho energético dos edifícios em diferentes contextos climáticos, já que por um lado, pode contribuir para o aumento do efeito ilha de calor urbano (resultando no aumento de carga para resfriamento em climas quentes e redução de carga para aquecimento em climas frios) e por outro lado, modifica a disponibilidade de radiação solar na fachada do edifício (resultando na redução de carga para resfriamento em climas quentes e no aumento de carga para aquecimento em climas frios).

Em relação à iluminação, de modo geral, o adensamento provoca a redução de disponibilidade de iluminação natural, resultando no aumento de carga para a iluminação artificial e na variação da carga térmica (aumento da carga para resfriamento ou redução da carga para aquecimento) devido a maior quantidade de calor gerada dentro do ambiente em razão do aumento de uso de equipamentos de iluminação.

A classificação da densidade urbana pode ser realizada de acordo com a geometria do cânion urbano, que pode ser expressa pela relação entre a altura dos edifícios e a largura entre eles (H/W). Quanto maior o resultado da razão H/W, mais adensado será o cânion (considerando edificações de igual altura).

O efeito de um determinado nível de densidade depende de uma grande quantidade de detalhes da estrutura física urbana. Em particular a cor e tipo das superfícies urbanas, que controlam a absorção e reflexão à radiação solar, e o tamanho, a forma e a orientação das edificações, alteram também os padrões de temperatura do ar, velocidade do vento, reflexão solar e sombreamento. Nesse sentido a envoltória passa a ser “moderador” não só das condições internas do edifício, como também das suas condições externas, sejam elas tanto referentes aos espaços livres externos, como ao interior das edificações de seu entorno. Isso porque, segundo Leite e Frota (2016), o consumo de energia de um edifício é determinado principalmente pelas trocas térmicas que ocorrem entre a sua envoltória e o seu entorno. É importante ressaltar também que atualmente os equipamentos e a iluminação artificial representam grande parcela desse consumo.

De forma geral, a forma urbana adensada por meio da verticalização resulta no aumento da temperatura do ar externo - resultante do intenso recobrimento do solo, redução da vegetação urbana

e utilização de materiais de alta absorção - e na diminuição da velocidade do vento, resultante do aumento das barreiras edificadas. Essas alterações compõem o efeito ilha de calor urbano (OKE, 1988). Já o padrão de radiação solar, por sua vez, é modificado, pois o aumento da densidade altera a morfologia das áreas urbanas promovendo uma maior proximidade entre os edifícios e resultando na alteração da quantidade de radiação solar que atinge suas superfícies, seja devido ao aumento da incidência de radiação solar refletida ou a diminuição da incidência de radiação direta e difusa (PISELLO et al., 2012). Em relação ao potencial de aproveitamento de iluminação natural, esse é reduzido com o aumento da densidade urbana.

No Brasil, diversas pesquisas já avaliaram o efeito da variação de diferentes características da morfologia urbana no microclima e conforto dos espaços externos e no conforto e desempenho térmico de ambientes internos. Algumas dessas pesquisas são destacadas e apresentadas no Quadro 1, classificadas pelo elemento urbano causador do impacto e pelo parâmetro de análise desse impacto.

Porém, nota-se a escassez de estudos que analisem o impacto da variação de diferentes características da morfologia urbana e, especificamente, do adensamento urbano diretamente no desempenho energético dos edifícios.

Enquanto em um clima frio o efeito ilha de calor urbano tende a ser positivo devido ao aumento da temperatura do ar, o sombreamento provocado pelos edifícios de entorno tende a ser negativo, pois aumenta a necessidade de carga para aquecimento. Já o oposto ocorre em climas quentes, onde o efeito ilha de calor é indesejado devido ao aumento do desconforto térmico para calor, enquanto o sombreamento é altamente recomendado quando se busca a redução de carga para resfriamento. Porém, a dimensão desses efeitos deve variar a depender do contexto urbano e do contexto climático local. Além disso, é importante ressaltar que o efeito ilha de calor ocorre principalmente durante a noite e madrugada, enquanto durante o dia é possível que ocorra uma inversão de valores, apresentando temperaturas mais baixas nas cidades quando comparados com o campo, resultado do intenso sombreamento.

Logo, apesar do adensamento urbano ser recorrentemente abordado sob um viés negativo do ponto de vista climático e energético em regiões de clima quente devido ao efeito ilha de calor urbano, segundo Leite e Frota (2016), apesar da influência negativa do adensamento sobre demais variáveis climáticas, o aumento nos ângulos de obstrução do céu pode resultar na redução da carga térmica interna em climas quentes devido à redução da radiação solar que atinge as

superfícies. Dessa forma, a pesquisa demonstra que, do ponto de vista energético, a maior proximidade entre os edifícios poderia ser uma estratégia desejada em climas nos quais a demanda por resfriamento ao longo do ano é significativa.

Quadro 1: Estudos brasileiros que abordam o impacto de diferentes características da morfologia urbana

<b>Elemento de impacto</b>	<b>Elemento de análise do impacto</b>	<b>Estudo</b>
Vegetação Urbana	Microclima urbano	(DUARTE et al., 2015) (SILVA; ROMERO, 2009)
	Conforto térmico de áreas externas	(SPANGENBERG et al., 2008)
	Conforto térmico de ambientes internos	(MARRA; MORILLE; ASSIS, 2017)
Ocupação do solo	Temperatura do ar externo	(DEBIAZI; SOUZA, 2017) (ROCHA; SOUZA; CASTILHO, 2011)
		(CAVALCANTE et al., 2017) (DEBIAZI; SOUZA, 2017)
Taxa de permeabilidade do solo	Temperatura do ar externo	(CAVALCANTE et al., 2017) (DEBIAZI; SOUZA, 2017)
Corpo d'água	Temperatura e umidade do ar externo	(MASIERO; SOUZA, 2013)
Geometria Urbana	Ilha de calor urbano	(NAKATA-OSAKI; SOUZA, 2016) (NAKATA; DE SOUZA, 2013)
		(FERREIRA; ASSIS, 2010) (PASSOS; SACRAMENTO; BARBIRATO, 2016)
	Iluminação natural de ambientes internos	(BECK; PEREIRA; SCALCO, 2017) (SCALCO; PEREIRA, 2016)
		(SCALCO; PEREIRA; RIGATTI, 2010)
	Disponibilidade de insolação	(SCALCO; PEREIRA; RIGATTI, 2010)
Adensamento urbano	Microclima urbano	(GUSSON; DUARTE, 2016) (TORRES; FREITAS; BARBIRATO, 2016)
		(FERREIRA; ASSIS, 2016)
	Desempenho ambiental	(GONÇALVES et al., 2011)

Fonte: Autora

Desse ponto de vista, considerando um contexto climático quente e a grande concentração de edifícios de uso comercial/serviços verticais

nos centros urbanos das cidades, que possuem horário de funcionamento principalmente durante o dia (em que o efeito ilha de calor pode ser inverso) e o uso extensivo de condicionadores de ar (não dependendo de ventilação natural), o adensamento poderia ser um interessante aliado para a diminuição do consumo energético desta tipologia de edifícios em relação à carga para resfriamento.

Diante das incertezas que ainda circundam o tema, Barbirato, Torres e Barbosa (2015) reforçam a necessidade de se aliar a arquitetura e urbanismo bioclimático e a climatologia urbana na busca por soluções de morfologia urbana adequada para uma cidade adensada. Como a estrutura da cidade é desenvolvida pelo planejamento urbano e projeto arquitetônico, é possível de certa forma controlar o clima e o consumo energético através de políticas urbanas que levem em conta o clima da cidade na hora do planejamento, buscando melhorar o conforto da população e reduzir a demanda de energia dos edifícios para aquecimento no inverno e resfriamento no verão. Dessa forma, ressalta-se que tanto os projetistas arquitetônicos quanto urbanos são responsáveis, a partir do seu desenho, pelo clima do seu entorno (GIVONI, 1998; ROMERO, 2001).

A seguir as três principais modificações que o adensamento urbano promove no consumo de energia dos edifícios dentro de contextos urbanos são tratadas com mais profundidade. As modificações são referentes aos fenômenos climáticos, radiação solar e iluminação.

### **2.1.1 Fenômenos climáticos**

Neste tópico são abordadas as variáveis climáticas que sofrem algum tipo de influência ou alteração em decorrência do adensamento urbano, resultando no fenômeno ilha de calor urbano, principal consequência climática da intensa urbanização nas cidades, que ocorre em quase todas as áreas urbanas, grandes ou pequenas, em climas quentes ou frios. Além disso, são demonstradas as escalas espaciais de ocorrência desses fenômenos.

O clima urbano pode ser definido como o resultado da interação entre o clima de um determinado local e sua urbanização. Ou seja, é a modificação de um clima natural levando em conta as alterações proporcionadas pela urbanização de um espaço, alterações estas relacionadas a: (a) características dos materiais artificiais de recobrimento urbano, que possuem maior capacidade térmica e são melhores condutores de calor que os naturais, (b) morfologia urbana, que é mais rugosa, diminuindo a velocidade do vento, e possui maior

massa e superfície para absorver e refletir radiação solar; (c) impermeabilidade do solo, que impede a penetração de água; (d) poluição do ar, no qual a maior quantidade de partículas no ar altera a insolação e prejudica a re-irradiação para o espaço e (e) geração de energia térmica nas cidades por indústrias, equipamentos condicionadores do ar e automóveis (OKE, 1988; ROMERO, 2001).

As principais variáveis ambientais relacionadas ao ganho de calor nas edificações modificadas pelo adensamento são: a radiação solar (abordada no tópico seguinte), temperatura do ar e velocidade do ar. A temperatura do ar em cidades adensadas costuma ser de 3,0 a 5,0°C mais altas durante o período noturno quando comparadas às suas áreas circundantes. Durante o dia a diferença é menor, geralmente entre 1,0 e 2,0°C, podendo ser até mais baixa nas cidades que no campo devido ao sombreamento promovido pelas edificações verticais (GIVONI, 1998). A modificação da temperatura do ar de uma cidade compõe o fenômeno ilha de calor urbano, que é atenuado pela baixa velocidade do vento resultante da maior rugosidade encontrada no meio urbano. Esse fenômeno é ocasionado durante o dia por meio da radiação de onda curta proveniente do sol e salientado durante a noite pela radiação de onda longa proveniente das superfícies urbanas. Durante o dia os raios solares atingem os materiais da superfície da cidade e são refletidos e absorvidos por eles, aumentando sua temperatura superficial. Durante a noite o calor absorvido ao longo do dia começa a ser liberado em forma de radiação de onda longa, aumentando a temperatura do ar externo, e possui dificuldade em alcançar a atmosfera devido à geometria urbana. Quanto maior e mais densa a cidade, maior é a diferença de temperatura entre ela e sua área circundante. O aumento da temperatura resulta conseqüentemente na redução da umidade relativa do ar.

Já em relação à ventilação natural, o tecido urbano é capaz de provocar grandes reduções da velocidade do vento em razão da alta rugosidade da geometria urbana. Do ponto de vista da forma urbana, para manter uma boa circulação do vento na cidade, a utilização de altos recuos progressivos e baixos coeficientes de aproveitamento são instrumentos de limitações urbanas mais eficientes que a limitação das alturas dos edifícios, pois considerando uma mesma densidade populacional, edificações altas e com significativo afastamento entre si resultam em melhor circulação do ar quando comparadas a edificações mais baixas e próximas entre si (BITTENCOURT; CÂNDIDO, 2015).

Além das variáveis citadas, estudos direcionados ao clima urbano de forma geral também observam o comportamento da temperatura radiante média, temperatura de superfície e temperatura operativa em

suas análises, já que apresentam significativa influência nos resultados de conforto térmico tanto para ambientes internos quanto externos.

Um fator de extrema importância para a amenização da ilha de calor urbano é a presença de vegetação urbana, pois as plantas possuem menor capacidade térmica, resultando em baixa taxa de aquecimento durante o dia e alta taxa de resfriamento durante a noite quando comparadas aos materiais urbanos, além de promover o aumento da umidade (evapotranspiração). Porém, a tendência com o crescimento das cidades é de uma taxa cada vez menor de vegetação urbana.

Uma limitação nos estudos referentes à ilha de calor urbano é a falta de regularidade entre o que pode ser considerado "rural" e "urbano" no momento de se realizar uma comparação entre as variações entre ambos, que caracterizará a intensidade da ilha de calor urbano da análise. Stewart e Oke (2012), propuseram uma classificação de zonas climáticas (LCZ - *Local Climate Zones*) de acordo com diferentes combinações de configurações urbanas. Esse estudo buscou criar um conjunto de tipologias urbanas e rurais classificadas em zonas de acordo com várias de suas características físicas, visando facilitar os estudos referentes a ilhas de calor urbano. Os autores indicam que dentro dos limites estipulados para as características de cada zona o comportamento climático daquele conjunto urbano seria similar.

A classificação é realizada de acordo com um intervalo de valores para diferentes parâmetros considerados de influência no efeito ilha de calor urbano: fator visão de céu, relação H/W, altura média das edificações, rugosidade do terreno, taxa de ocupação do edifício no terreno, porcentagem de área impermeável, albedo médio das superfícies e fluxo de calor antropogênico. Os autores defendem que a classificação tem o potencial de melhorar a consistência e precisão nos relatórios de clima urbano, permitindo também uma base de comparação entre os diferentes estudos.

Diversos estudos sobre o efeito ilha de calor urbano já foram realizados em todo o mundo e sua intensidade varia principalmente em função da topografia local, das condições climáticas, das características urbanas como densidade, forma, uso e ocupação do terreno, calor antropogênico dissipado, materiais utilizados e fator visão de céu. (SANTAMOURIS, 2014; SANTAMOURIS et al., 2015). Ao avaliar diferentes parâmetros climáticos como temperatura, umidade relativa, radiação solar e velocidade do vento, a maior parte dos estudos concluiu que a temperatura do ambiente é o parâmetro que representa o maior impacto na variação da demanda de eletricidade (SANTAMOURIS et al., 2015).

Os efeitos das alterações climáticas provocadas pelo adensamento urbano podem ser observados em diferentes escalas (vertical e horizontal) dentro da cidade. A escala vertical, sugerida por Oke (2002) classifica a atmosfera sob influência urbana em três camadas: a camada limite urbana (*urban boundary layer*), que se localiza acima do nível dos telhados de uma área urbana e recebe a influência térmica da superfície urbana de forma geral, a camada de dossel urbano (*urban canopy layer*), que corresponde ao ambiente formado abaixo do nível do telhado pelos cânions urbanos e é resultante de uma mescla dos microclimas resultantes do entorno imediato e a pluma urbana, que seria a prolongação da camada limite urbana a sotavento da cidade sobre a área rural.

Já a escala climática horizontal pode ser classificada em: macroescala, mesoescala, escala local e microescala. A macroescala abrange uma região de forma geral. A mesoescala corresponde à escala de uma cidade ou região metropolitana, levando em conta sua topografia, paisagem local como vales, montanhas, grandes massas de água e vegetação. Essa escala é capaz de apreender, por exemplo, o fenômeno de ilha de calor urbano e em uma extensão vertical corresponderia à camada limite urbana. Já a escala local corresponde à escala de um bairro e de uma estação climática de meteorologia. A microescala é uma escala pequena que seria capaz de apreender os fenômenos ao nível do pedestre e os efeitos provocados pelo balanço radiativo das fachadas. De forma geral são levados em consideração os efeitos das ações humanas sobre o entorno. Em relação à escala vertical corresponderia a camada do dossel urbano (ou *urban canopy layer*) (OKE, 2002).

Para Martins (2014) uma das principais barreiras referentes a pesquisas sobre o clima urbano é justamente a dificuldade do tratamento das diferentes escalas simultaneamente e a impossibilidade de integrar todos os fenômenos climáticos nelas com a mesma precisão já que esses não se comportam da maneira equivalente quando submetidos a diferentes condições morfológicas. Dessa forma, a autora aponta como uma importante lacuna do tema o estudo da influência de diferentes escalas no desempenho do clima local do dossel urbano ou no comportamento energético dos edifícios em cânions urbanos.

Nessa direção, alguns estudos apresentados no tópico 2.2 (simulação computacional em contextos urbanos) vêm buscando associar os efeitos provocados pelo fenômeno da ilha de calor urbano (abordado no presente subtópico) aos efeitos provocados pelo balanço radiativo das fachadas (subtópico 2.1.2) no desempenho energético das

edificações em contextos urbanos. A maior dificuldade concentra-se no fato de que para uma previsão do comportamento energético de um edifício é necessária uma análise anual dos dados, enquanto a maioria das análises climáticas são realizadas a partir de dias típicos ou dias com condições de estabilidade atmosférica devido a grande demanda de tempo requerido por programas de simulações direcionados ao clima urbano.

Outra possível problemática considerando a influência do efeito ilha de calor urbano no consumo de energia das edificações urbanas é seu impacto de forma contrária em diferentes regiões climáticas. De modo geral, o aumento da temperatura intensifica o consumo de energia para resfriamento e em climas nos quais o uso de aquecimento é necessário, o aumento da temperatura se torna positivo do ponto de vista energético devido à redução do consumo desse (SANTAMOURIS, 2014; SANTAMOURIS et al., 2015; STEWART; OKE, 2012).

Porém, Santamouris (2014) ressalta que o aquecimento das cidades é muito mais significativo durante o verão do que no inverno e isso causa um aumento muito maior da carga de resfriamento em comparação com a diminuição correspondente à carga de aquecimento dos edifícios.

Santamouris et al. (2015) fazem uma comparação do resultado de diferentes estudos que abordam o impacto do aumento da temperatura urbana no consumo de eletricidade das edificações. Os autores concluíram que o impacto do aumento da temperatura irá depender principalmente das características do edifício, da zona climática de análise, da forma urbana e dos serviços de energia fornecidos. Concluiu-se também que o aumento da demanda de eletricidade por grau de aumento da temperatura varia entre 0,5% e 8,5% nos contextos climáticos estudados. Visando à redução do impacto do aumento da temperatura no consumo de energia, o estudo sugere que edifícios e estruturas urbanas têm que se adaptar às condições climáticas específicas através da utilização de edificações de baixo consumo energético em paralelo ao desenvolvimento e uso de técnicas avançadas de adaptação e mitigação urbanas e tecnologias com potencial para diminuir a temperatura ambiente nas cidades.

É importante ressaltar também que embora o presente estudo considere apenas as mudanças de temperatura ocasionadas pelo adensamento no clima urbano, o aumento da temperatura de forma global também vem sendo observado na Terra. Apesar de alguns pesquisadores atribuírem esse fenômeno à variação natural de temperatura do globo terrestre ao longo dos anos, muitos acreditam que

o aumento significativo e acelerado da temperatura do ar é resultado do aumento das emissões de gases que compõem o efeito estufa.

Segundo Alves, Duarte e Gonçalves (2015) o estudo acoplado das mudanças climáticas e do desempenho térmico das edificações ainda é um campo recente de pesquisa, mas se mostra de crescente relevância face ao aumento das modificações climáticas. O artigo, a partir de uma revisão crítica, destaca que a principal fonte de emissão antropogênica de gases de efeito estufa é a geração de energia. Logo, buscaram-se alternativas para a mitigação desses impactos. No âmbito da arquitetura e do urbanismo, as ações possíveis visando à redução de parte das emissões de gases do efeito estufa e, conseqüentemente, a mitigação das mudanças climáticas ocasionadas por fatores não naturais não se localizam no campo da geração elétrica, mas da eficiência energética dos edifícios e cidades.

## **2.1.2 Radiação solar**

O Sol é a principal fonte de calor da Terra. Logo, fatores relacionados à energia solar são informações de extrema importância para os estudos relacionados ao clima e ao desempenho energético. Neste tópico aborda-se como a radiação solar incidente nas edificações pode sofrer alterações em um contexto urbano, detalhando-se o balanço da radiação em superfícies urbanas e os fenômenos da reflexão solar e do sombreamento no meio urbano.

### **2.1.2.1 Balanço de radiação em superfícies urbanas**

O balanço de radiação em superfícies urbanas é dado pela diferença entre a quantidade de energia que é absorvida por uma superfície urbana e a quantidade de energia que é emitida por ela. Dessa forma, o balanço radiativo das superfícies irá variar de acordo com as características urbanas e climáticas do local. Cada elemento urbano irá interferir no balanço, seja atuando como uma barreira ao vento, promovendo sombreamento, absorvendo e emitindo radiação de onda longa ou refletindo e absorvendo a energia solar (ROMERO, 2001). Segundo Givoni (1998), os detalhes arquitetônicos dos edifícios, especialmente a cor adotada, podem modificar completamente o balanço da radiação urbana e temperatura. Por esta razão cada novo elemento deve respeitar o ambiente já existente no local.

Devido às inúmeras características e particularidades, a trajetória da radiação solar incidente nos edifícios de um meio urbano adensado é

complexa, e a maior disponibilidade de superfície aumenta o calor armazenado nas cidades. De modo geral, a quantidade de radiação que atinge as coberturas é significativamente maior que a quantidade que atinge o solo. Isso porque a morfologia das cidades promove pouca distância entre os edifícios e dificulta a incidência da radiação direta no solo. Por outro lado, a radiação incidente nas fachadas das edificações é em parte absorvida e em parte refletida para edifícios vizinhos e para o solo, e apenas uma pequena fração é refletida de volta para a atmosfera. A reflexão múltipla resulta no aprisionamento de calor dentro dos cânions urbanos e suas superfícies ficam mais aquecidas que se estivessem isoladas. Aliado a isso, as superfícies urbanas emitem radiação de onda longa. A intensidade da perda de radiação de onda longa depende da quantidade de céu que a superfície “vê”. Dessa forma, em áreas densamente construídas a radiação de onda longa tem dificuldade de atravessar o meio urbano, aumentando a temperatura do ar externo.

Destacam-se aqui as três principais propriedades físicas de uma superfície opaca que determinam sua troca radiante com o ambiente externo: a absorvidade ( $\alpha$ ), a refletividade ( $\rho$ ) e a emissividade ( $\epsilon$ ). A absorvidade determina a quantidade de radiação que será absorvida por uma superfície, e depende basicamente da sua cor, e a refletividade determina a quantidade de radiação que será refletida e é obtida de forma complementar ao valor da absorvidade ( $\alpha + \rho = 1$ ). Ambas correspondem a fenômenos referentes à radiação de onda curta incidente. Já a emissividade está relacionada à radiação de onda longa absorvida e emitida pela superfície. Essa propriedade independe da cor, mas sim da densidade da superfície e de sua composição molecular. De forma geral quase todas as superfícies não metálicas possuem emissividade em torno de 0,9. As superfícies metálicas possuem baixa emissividade e, conseqüentemente, absorvem e emitem pouca radiação de onda longa.

A radiação total que atinge uma superfície é resultado da soma de três componentes de onda curta (radiação direta, radiação difusa e radiação refletida) e duas componentes de onda longa (radiação térmica pelo céu e radiação térmica emitida pelas superfícies urbanas). A radiação solar direta, como o nome diz, é proveniente dos raios diretos do sol e provém de uma direção diferente a cada hora do ano. A radiação difusa é resultado da reflexão da radiação direta por partículas da atmosfera e está distribuída ao longo de toda a abobada celeste. Dessa forma, uma superfície horizontal pode receber radiação difusa de toda a abobada celeste, enquanto uma superfície vertical pode receber

no máximo radiação de metade dela de forma difusa. A radiação refletida é resultante da soma da radiação solar direta e difusa refletida por superfícies do entorno como solo e elementos verticais. A radiação de onda longa é resultado do aquecimento das superfícies urbanas, que por consequência emitem radiação térmica de onda longa (LAMBERTS; DUTRA; PEREIRA, 2014).

A proporção dos três tipos de radiação de onda curta incidente em uma superfície (direta, difusa e refletida) irá variar bastante a depender da condição de céu do local e de sua densidade construída. Por exemplo, a depender da nebulosidade e quantidade de nuvens na atmosfera a radiação difusa pode representar 5% do total de radiação em um dia claro em regiões áridas ou de até 80% em um dia escuro. Já em áreas densamente construídas, grande parte da abobada pode ficar obstruída por edifícios de entorno, diminuindo a incidência de radiação direta e difusa e podendo aumentar a incidência de radiação refletida (GIVONI, 1998). Cânions mais largos absorvem mais radiação solar nas fachadas quando comparados a cânions mais estreitos, pois uma maior quantidade de radiação solar consegue entrar no mesmo e fica aprisionada devido às múltiplas reflexões (ALLEGRIANI; DORER; CARMELIET, 2012).

Outro fator que também influencia tanto na distribuição dos diferentes tipos de radiação quanto em sua intensidade é a posição solar. O ângulo de incidência dos raios e sua intensidade irá variar de acordo com o azimute a altitude solar e de acordo com a latitude do local. Em cidades mais próximas à linha do equador, onde o sol está alto em grande parte do ano, a radiação atinge o meio urbano, mesmo adensado, com mais facilidade e intensidade, resultando em maior quantidade de radiação solar aprisionada. Em cidades de latitude mais baixas, como a altura solar é mais baixa, os raios solares têm mais dificuldade de atingir as superfícies urbanas dentro de um cânion.

As alterações provocadas pelo sombreamento e reflexão na radiação solar são consideradas como uma das cargas que mais afetam as necessidades de carga de um edifício urbano comparado com edificações isoladas. Já os impactos da radiação de onda longa são bem menores que os da radiação solar em relação à necessidade de energia dos edifícios (FRAYSSINET et al., 2018). Dessa forma, esses dois fenômenos são apresentados mais detalhadamente a seguir.

### 2.1.2.2 Reflexão solar

A radiação refletida que atinge uma superfície é um fenômeno resultante da reflexão solar das radiações direta e difusa por uma

superfície urbana como o solo ou os edifícios de entorno. De forma geral a radiação solar refletida por um edifício é resultante em sua maior parte das suas superfícies verticais, já que seu telhado “vê” principalmente o céu. Já em relação ao solo, que reflete radiação em todas as direções, o percentual que atinge uma superfície vertical é de em média 50% (GIVONI, 1998). Porém, em áreas densamente construídas o fenômeno da radiação refletida é muito mais complexo. Sua intensidade será proporcional à refletância dos materiais e a quantidade de radiação os atinge, que varia ao longo do dia. Em cada situação o padrão de radiação nas superfícies do entorno tem que ser levado em conta quando se deseja uma previsão precisa da radiação refletida.

A quantidade de radiação solar que uma superfície é capaz de refletir é denominada refletância e seu valor mudará em função principalmente da cor externa da edificação. Cores claras possuem alta refletância, enquanto cores escuras possuem baixa refletância. As cores externas do envelope do edifício determinam o impacto da radiação solar nesse, sendo a fração que será absorvida responsável pelo ganho solar. Já a fração refletida não causará efeitos diretos na condição térmica interna do edifício em si, mas sim no entorno. Dessa forma a utilização de cores claras, principalmente em climas quentes, é incentivada, visando manter temperaturas mais baixas dentro dos edifícios (FROTA; SCHIFFER, 2001).

Porém, essa estratégia pode se tornar um efeito negativo para o espaço público exterior e até para as edificações de entorno imediato, causando por vezes desconforto térmico, devido ao aumento da radiação solar refletida, e visual, devido ao ofuscamento (ROMERO, 2001). Resolver esse problema utilizando cores escuras iria causar um aquecimento não desejado da edificação. Algumas alternativas para a diminuição da carga referente à reflexão de edificações de entorno seria a implementação nas fachadas de projeções horizontais e verticais ou fachadas verdes. Essas soluções trariam benefícios tanto para os próprios edifícios que as utilizassem quanto para as áreas externas e seus edifícios de entorno em climas mais quentes como o do Brasil. Essas estratégias podem ajudar na busca por minimizar as influências negativas mútuas entre os edifícios (HAN; TAYLOR; PISELLO, 2015).

### 2.1.2.3 Sombreamento

O padrão de sombreamento de um ambiente dentro de uma cidade vai variar basicamente a partir das distâncias entre os edifícios,

sua altura e sua orientação de implantação, além da trajetória solar já definida para cada latitude. Como visto, a proximidade entre os edifícios resulta em mudanças climáticas negativas para climas quentes, como aumento de temperatura e diminuição da velocidade do vento, que podem ser negativas também do ponto de vista energético. Porém o sombreamento entre edifícios, conseqüente também da maior proximidade entre eles, pode ser do ponto de vista energético uma conseqüência positiva. Isso porque, apesar de aumentar a demanda por iluminação artificial (quando há o aproveitamento da iluminação natural) e por aquecimento (pequena ou inexistente em contextos climáticos quentes), diminui significativamente a demanda por resfriamento, devido à redução da incidência solar nos edifícios (HAN; TAYLOR; PISELLO, 2015; PISELLO et al., 2012).

A distância entre prédios, tanto das ruas quanto dos lotes, afeta a exposição solar dos edifícios e conseqüentemente os padrões de aquecimento e resfriamento. De forma geral, ruas largas possuem uma maior demanda de energia para resfriamento em relação a cânions com edifícios mais próximos, que são mais sombreados ao longo do dia. Porém, ruas mais estreitas (maior H/W) provocam maior intensidade do efeito da ilha de calor urbano noturna, porém, durante o dia essas ruas possuem temperaturas mais baixas que ruas mais largas (menor H/W), devido ao sombreamento provocado pelos edifícios.

O efeito do sombreamento se afigura ainda mais importante em contextos urbanos altamente adensados. Nesses, a demanda por resfriamento tende a crescer com a altura do andar do edifício. Isso porque os andares mais próximos ao nível do solo são muito mais sombreados que os andares mais altos, especialmente em comparação à cobertura que recebe radiação no teto, além das fachadas (ALLEGRIANI; DORER; CARMELIET, 2012).

Dessa forma, a determinação gráfica das sombras é de extrema importância, especialmente no contexto urbano já que os elementos de entorno podem interceptar parte dos raios solares, reduzindo os períodos de real insolação ao longo do dia (FROTA; SCHIFFER, 2001). Scalco, Pereira e Rigatti (2010) desenvolveram um método para a avaliação do impacto de novas edificações da vizinhança nas condições de insolação e iluminação natural de um ambiente, visando garantir as condições mínimas de ambos nos ambientes urbanos. Samuelson et al. (2016) indicam, a partir de simulações computacionais com e sem a existência de sombreamento proveniente dos elementos de entorno, que esse produz um impacto substancial na demanda de energia de um edifício e

que a prática comum de não considerá-los em simulações de energia pode resultar em decisões de projeto não eficazes ou desnecessárias.

A importância da consideração do sombreamento proporcionado pelo entorno nas simulações termo-energéticas foi destacada também por Barbosa e Guisi (2017) através de estudo realizado em Goiânia utilizando o *software* EnergyPlus e hobos para monitoramento da temperatura do ar. A pesquisa indicou a inserção do entorno urbano como elemento de sombreamento como parâmetro mais influente na calibração de um modelo de simulação a partir de dados medidos *in loco*. Os parâmetros analisados foram: geometria da cobertura, adição do entorno, absorvância das superfícies, resistência térmica dos materiais e infiltração do ar. Dentre as simulações paramétricas realizadas para dois ambientes de uma residência unifamiliar adotada, a alteração do entorno foi o parâmetro que mais aumentou a correlação entre os dados simulados e os medidos *in loco* (coeficiente de determinação  $R^2$  de 0,72 para o quarto 1 e 0,91 para o quarto 2) para os ambientes analisados, destacando-se assim a modelagem do entorno urbano como elemento de sombreamento como elemento de essencial importância e grande influência na construção de modelos localizados dentro de contextos urbanos em simulações termo-energéticas.

### 2.1.3 Iluminação

A modificação do aproveitamento de iluminação natural compõe também uma das principais consequências do adensamento urbano no consumo de energia dos edifícios dentro de contextos urbanos. Esta modificação é resultado principalmente da redução da disponibilidade de iluminação natural em edificações localizadas nos centros urbanos comparadas aquelas isoladas.

Com o intuito de manter os níveis mínimos necessários para realizar diferentes atividades no interior dos edifícios, utiliza-se a iluminação artificial quando necessária. Com o aumento da obstrução das aberturas em ambientes nos centros urbanos, aumenta-se também a necessidade desse recurso. Outros fatores como a cor e material do envelope dos edifícios de entorno, a existência e tipo do vidro utilizado na edificação de análise, a orientação e dimensão das aberturas e a existência de elementos de proteção solar na edificação de análise também são fatores que interferem na quantidade de iluminação artificial mínima necessária para atingir o conforto dos usuários.

A redução da disponibilidade de iluminação natural pode resultar no aumento do consumo energético primário, uma vez que a utilização

de iluminação artificial gera um maior consumo de carga referente à iluminação artificial e altera também a carga térmica, uma vez que gera mais calor no ambiente (resultando em maior carga para resfriamento ou menor carga para aquecimento).

O estudo de Pisello et al. (2014), a partir de uma análise comparativa de um edifício de escritórios localizado dentro de uma universidade na Perugia (Itália) simulado (EnergyPlus) sem e com a presença de entorno urbano, indicou um aumento de consumo energético quando o entorno é levado em consideração de até 14% em uma sala durante o verão e aumento médio anual entre 3% e 5% nos diferentes ambientes analisados. Avaliando-se separadamente as cargas referentes ao resfriamento, aquecimento e iluminação artificial, a maior alteração em termos percentuais foi em relação à carga de iluminação artificial, que sofreu uma variação entre 7% e 9,5%, enquanto as demais cargas variaram entre 0,5% e 1,5%.

Estes resultados confirmam a importância de incluir, além das contribuições de aquecimento e resfriamento, o componente de iluminação na análise de energia primária de edificações dentro de contextos urbanos. O impacto da alteração na carga térmica provocada pelo aproveitamento da iluminação natural nos ambientes, no entanto, não foi informado nas pesquisas.

Já Samuelson et al. (2016), também em estudo comparativo entre uma edificação sem e com a presença de entorno a partir de simulações computacionais com o *software* EnergyPlus em três diferentes cidades (Nova York, Shenzhen e Beijin), indica a carga para resfriamento, dentre as analisadas, como de maior variação entre os dois cenários (até 31%), seguida pela carga para iluminação artificial (8%) e carga para aquecimento (7%). Aqui também não se analisou o impacto do aumento da utilização de iluminação artificial em contextos urbanos na carga térmica separadamente.

Já o estudo de Li e Wong (2007), apesar de não considerar inicialmente a geometria do entorno urbano, demonstrou o impacto do aproveitamento da iluminação natural no consumo de energia de forma desagregada (iluminação artificial, equipamentos, condicionadores de ar, ventiladores e aquecedores) em um edifício de escritórios em Hong Kong de forma quadrada, com 40 pavimentos e sistema de ar condicionado central a partir de simulações computacionais com o *software* EnergyPlus. O estudo demonstrou que a modificação de carga resultante do aproveitamento da iluminação natural foi de 11% no consumo total anual e que essa redução é muito maior na carga para iluminação artificial (25% da carga para iluminação artificial ou 8,6%

da carga total do edifício) do que na carga térmica (condicionadores de ar, ventiladores e aquecedores), que apresentou uma redução de apenas 2,4% na carga total do edifício, resultante de uma pequena redução das cargas referentes aos condicionadores de ar e dos ventiladores e um aumento ainda menos significativo da carga referente aos aquecedores.

A segunda parte do estudo de Li e Wong (2007) realizou uma análise de regressão para avaliar o desempenho energético de edifícios de escritórios com aproveitamento de iluminação natural sombreados por edifícios vizinhos. A análise apresentou uma correlação entre a redução de eletricidade do edifício de referência e o ângulo de obstrução formado entre as aberturas do edifício de análise com o topo do edifício vizinho, indicando que quanto maior o ângulo, menor a redução de carga referente ao aproveitamento da iluminação natural. Os resultados confirmaram que o efeito de sombreamento causado por obstruções próximas afeta fortemente o consumo de energia dos edifícios, alcançando reduções de energia elétrica de até 28 kWh/m<sup>2</sup>/ano nos modelos analisados.

Pisello et al. (2014) ressalta a necessidade da consideração, por parte dos projetistas, dos benefícios do ambiente externo visando projetar edifícios com uma maior eficiência de energia, uma vez que a consideração da luz natural, por exemplo, poderia ajudar a reduzir a o consumo de energia tanto em relação à carga para iluminação artificial quanto à carga sensível de resfriamento devido à iluminação artificial.

## 2.2 SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL EM CONTEXTOS URBANOS

Atualmente políticas energéticas que visam o planejamento urbano e o projeto arquitetônico situado em um contexto urbano ainda são pouco estudadas e difundidas quando comparadas àquelas referentes a edificações na escala individual. Martins, Bonhomme e Adolphe (2013) apresentam três possíveis razões para esse fato: (a) a falta de estudos quantitativos aprofundados sobre o impacto da morfologia da cidade na demanda de energia, (b) a dificuldade de se traduzir em modelos matemáticos precisos a complexidade de modelos físicos em diferentes escalas e (c) a escassez de estudos que demonstrem a evolução morfológica da cidade e seu cenário futuro a partir da forma urbana existente.

Dessa forma, a simulação energética da edificação de forma isolada ainda é largamente utilizada por profissionais da área. A principal desvantagem é que os fenômenos causados pelo contexto

urbano, como a modificação do padrão de radiação solar incidente e a ilha de calor urbano, por exemplo, são negligenciados (MARTIN et al., 2015). Apesar da existência de estudos que buscam estimar a demanda de energia para aquecimento e resfriamento de edifícios inseridos na cidade, poucos consideram todas as edificações e condições climáticas do contexto urbano e apenas uma quantidade ainda mais reduzida alcança resultados de demanda de energia por hora. Porém ambos os aspectos apresentados são de grande importância nos estudos de consumo de energia de edifícios urbanos (FRAYSSINET et al., 2018).

A importância de uma modelagem que inclui as características do meio urbano em análises energéticas será crescente diante da crescente proximidade entre os edifícios. Hoje, por meio de simulações computacionais, vem sendo confirmada a importância de se levar em conta o contexto urbano ainda nos momentos iniciais do projeto, pois muitas decisões importantes podem mudar caso se leve em conta a modelagem das características físicas do entorno, como demonstrado no tópico 2.2.1, ou as modificações climáticas promovidas pelo contexto urbano, como demonstrado no tópico 2.2.2.

Os estudos do tópico 2.2.3 demonstram ainda a possibilidade de avaliação mais detalhada do desempenho energético de edifícios dentro de cidades aliando as simulações computacionais energéticas que modelam o entorno urbano com os modelos de cânion urbano que levam em conta as modificações climáticas ou que utilizam arquivos climáticos de medições *in loco*.

É importante ressaltar que uma vez que a alteração de disponibilidade de iluminação natural devido à inserção das características do entorno impactam no consumo de energia principalmente na carga referente ao uso de iluminação artificial e que os resultados da presente dissertação possuem foco apenas nas modificações referentes à carga térmica, os estudos sobre a alteração proporcionada entorno na iluminação não foram abordados neste tópico, restringindo-os apenas ao tópico 2.1.3.

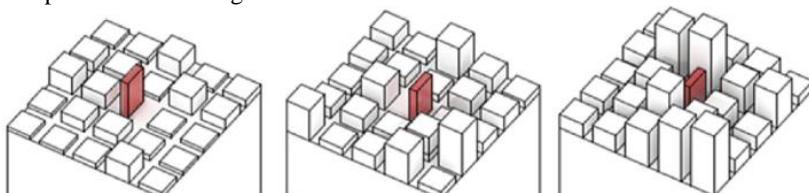
### **2.2.1 Simulações com modelagem das características físicas do contexto urbano**

Os estudos aqui apresentados consideraram a inclusão do contexto urbano nas simulações energéticas de edificações residenciais e comerciais apenas a partir da construção da geometria do entorno, adotando uma refletância fixa para o solo e edificações de entorno e levando em conta a redução da incidência de radiação solar devido ao

sombreamento promovido pelas edificações. Fenômenos como a ilha de calor urbano não são considerados, constituindo a principal limitação destas pesquisas.

Samuelson et al. (2016) destacam a grande importância da utilização do contexto urbano em simulações de edificações residenciais verticais mesmo nas etapas iniciais do projeto. O estudo trata de uma análise paramétrica de diferentes decisões iniciais de projeto como dimensão de janelas, material do envelope, elementos de sombreamento do próprio edifício e forma do edifício. No total foram testadas 12.096 diferentes combinações desses parâmetros a partir de simulações energéticas com o *software* EnergyPlus. Posteriormente, o estudo considerou que a inserção do contexto urbano poderia ser uma importante variável para os resultados referentes ao consumo de energia e simulou novamente todas as combinações dentro de contextos urbanos de diferentes densidades (Figura 1). As análises foram realizadas ainda para três diferentes contextos climáticos referentes às cidades de Nova York (EUA), Beijin (China) e Shenzhen (China).

Figura 1: Exemplos de contextos urbanos utilizados para a simulação computacional de energia

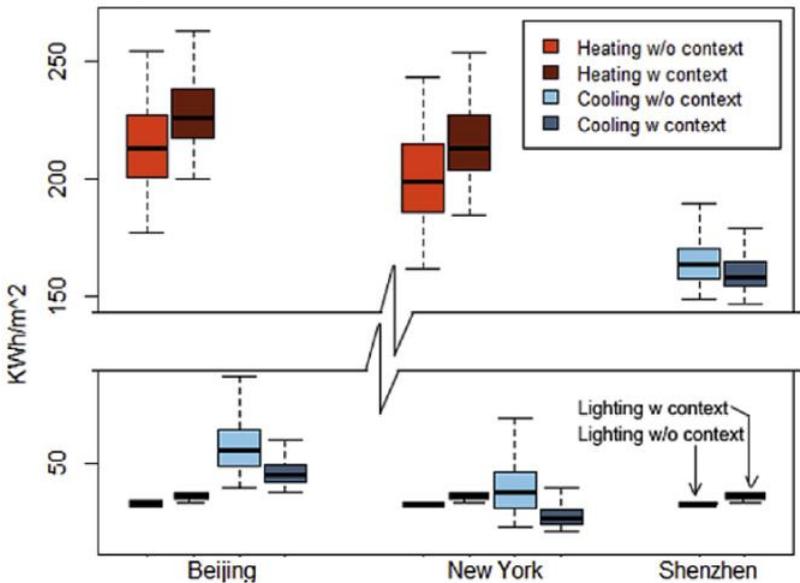


Fonte: Samuelson et al. (2016).

A partir de ambos os conjuntos de simulações (sem e com contexto urbano) observaram-se algumas modificações nas decisões iniciais de projeto indicadas pelas primeiras simulações. Os autores observaram que a consideração do sombreamento provocado por edificações de entorno em um contexto de alta densidade urbana fez com que a necessidade de sombreamento das janelas fosse eliminada para as cidades de Nova York e Beijin, enquanto que para a cidade de Shenzhen, que possui contexto climático mais quente entre as analisadas, além da eliminação da necessidade de sombreamento nas janelas foi modificada a preferência pela forma do edifício e pela sua orientação. A análise de três diferentes contextos urbanos indicou ainda que esse impacto é significativo mesmo em contextos urbanos menos densos.

Na Figura 2 é possível observar o aumento no consumo para aquecimento e iluminação artificial causado pela consideração do contexto urbano, assim como a diminuição do consumo para resfriamento em maior proporção que as demais cargas. No contexto climático mais quente (Shenzhen), onde não existe consumo para aquecimento, o sombreamento torna-se um efeito apenas positivo do ponto de vista energético, já que aqui não foram analisadas as modificações climáticas em decorrência do maior adensamento.

Figura 2: Demanda para aquecimento, resfriamento e iluminação artificial em kWh/m<sup>2</sup>/ano para as simulações com e sem o contexto urbano de alta densidade



Fonte: Samuelson et al. (2016).

Pisello et al. (2012) também reforçam as duas importantes contribuições do estudo apresentado anteriormente: a comprovação da distorção dos resultados de predição do uso de energia quando se analisa um edifício sem levar em conta os edifícios de seu entorno e a variação da dimensão desse efeito em diferentes contextos climáticos.

As análises foram realizadas a partir de simulações computacionais energéticas com o *software* EnergyPlus. Para o estudo foi escolhido um conjunto residencial com vinte edificações de dois andares e dimensões de 10 por 10 metros (Figura 3). Foram simuladas duas situações: a primeira referente ao edifício destacado em vermelho

na imagem isoladamente e outra com esse inserido no contexto urbano. Ambas as situações foram avaliadas em dois diferentes contextos climáticos dos EUA, representando condições climatológicas extremas dentro do país. As cidades escolhidas foram Miami, que possui clima tropical caracterizado por verões quentes e úmidos e invernos curtos e é considerada a cidade mais quente do país em termos de média anual de temperatura, e Minneapolis, de clima continental caracterizada por invernos frios e verões quentes, considerada a cidade mais fria a partir da média anual de temperatura.

Figura 3: Modelo do contexto urbano utilizado na simulação computacional de energia com destaque (bola vermelha) para a edificação de análise



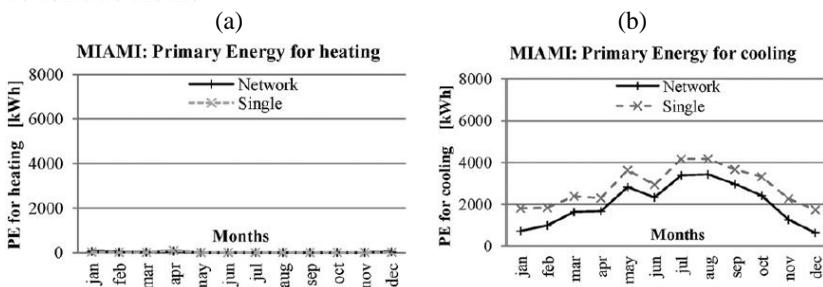
Fonte: Pisello et al. (2012).

As imprecisões observadas na predição de energia indicaram uma superestimação no consumo de energia do edifício isolado em relação ao edifício dentro do contexto urbano no verão de até 47% para Miami e de 33% para Minneapolis e uma subestimação no inverno de até 22% para Minneapolis e superestimação de 20% para Miami. Considerando todo o ano, observou-se uma inexatidão na estimativa de consumo de 22,7% para o contexto climático mais frio e de 32,7% para o contexto climático mais quente.

Na Figura 4 e Figura 5, que indicam o consumo anual para aquecimento e resfriamento de Miami e Minneapolis, respectivamente, é possível entender que a superestimação ocorreu em Miami durante todo o ano devido à necessidade de resfriamento em todos os meses. Como o sombreamento reduz a necessidade de carga para resfriamento, o

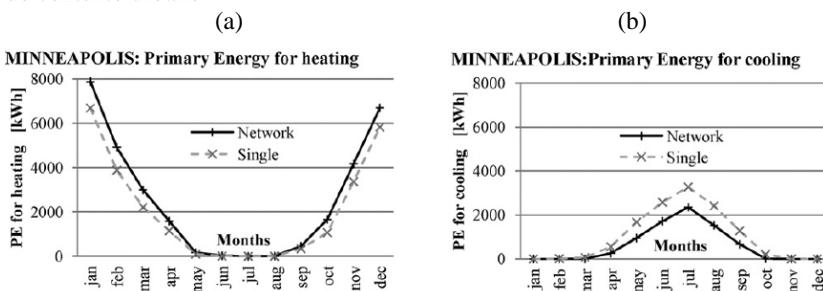
contexto climático mais quente apresentou uma maior inexatidão na predição energética, enquanto no contexto climático mais frio os meses que necessitam de aquecimento artificial na análise do edifício isolado subestimam que a carga necessária para esse fim será maior devido a menor incidência de radiação solar, que se torna um ponto negativo do sombreamento nesses meses. Dessa forma a superestimação no verão é em parte compensada pela subestimação no inverno, diminuindo a imprecisão anual em contextos mais frios.

Figura 4: Consumo de energia primária em Miami para aquecimento (a) e resfriamento (b) em kWh/ano para a edificação simulada isoladamente e dentro do contexto urbano



Fonte: Pisello et al. (2012).

Figura 5: Consumo de energia primária em Minneapolis para aquecimento (a) e resfriamento (b) em kWh/ano para a edificação simulada isoladamente e dentro do contexto urbano

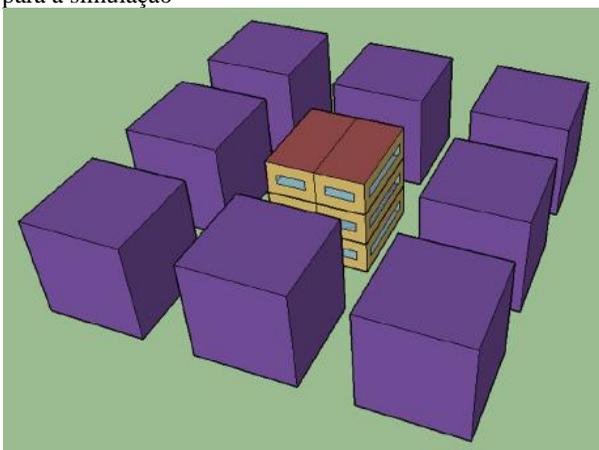


Fonte: Pisello et al. (2012).

Por fim a pesquisa conclui que os dois principais contribuintes para as modificações no consumo de energia causadas pela adoção do entorno urbano são os fenômenos do sombreamento e da reflexão solar.

Han, Taylor e Pisello (2015) deram continuidade ao estudo de Pisello et al. (2012) utilizando um contexto urbano hipotético de um centro comercial adensado com edificações de 10m x 10m, com distância entre elas de 5,25m, resultando em um valor de H/W igual a 2,0 (Figura 6). Por ser um centro comercial, considerou-se sua utilização entre 8 horas da manhã até às 18 horas da tarde durante todos os dias da semana. Foram considerados ganhos internos para pessoas de 6 W/m<sup>2</sup> e de 10 W/m<sup>2</sup> para iluminação artificial. A refletância dos elementos externos foi definida em 40% e a refletância do solo em 20%.

Figura 6: Contexto urbano (roxo) e edificação de análise (amarela e vermelha) utilizados para a simulação



Fonte: Han, Taylor e Pisello (2015).

Nesse estudo foi realizada, a partir de simulações computacionais energéticas com o *software* EnergyPlus, a desagregação dos efeitos do sombreamento e da reflexão solar indicados anteriormente como os principais fenômenos que alteram o consumo de energia de um edifício em um meio urbano, buscando identificar qual tem maior impacto. Para isso, previamente foram analisados três cidades com contextos climáticos distintos típicos dos EUA: Washington (D.C.) que possui estações bem definidas como um típico clima temperado, Miami (FL) e Minneapolis (MN) que representam as condições climáticas extremas onde as cargas de resfriamento e aquecimento são grandes respectivamente. A partir de uma análise anual foi possível observar que o sombreamento tem impacto significativamente maior entre os dois, com aumento na previsão do consumo de 30,1%, 12,7% e 4,2% para

Miami, Washington e Minneapolis, respectivamente, quando não se leva em conta o sombreamento e diminuição na predição do consumo de apenas 6,0%, 2,2% e 0,7% quando não se leva em conta a reflexão (Figura 7).

Observou-se também que a imprecisão da predição de energia quando não se leva em conta o entorno urbano a partir do sombreamento e reflexão das edificações é maior em locais de clima mais quente (Miami), dentre os observados (Figura 7). Esse fato pôde ser explicado a partir da desagregação do consumo anual para a observação do consumo mensal. Em meses mais quentes o sombreamento, que é o efeito mais significativo na alteração do consumo energético, possui mais impacto, pois traz benefícios como redução de carga necessária para resfriamento. Como em locais de clima mais quente possuem uma maior quantidade de meses quentes, a imprecisão na predição de energia quando não se leva em conta o entorno, e conseqüentemente os efeitos do sombreamento, é cada vez maior.

Figura 7: Consumo de energia em kWh/ano para Miami (a), Washington (b) e Minneapolis (c) para a edificação no contexto urbano (IBE), sem levar em conta a reflexão (IBE w/o R) e sem levar em conta o sombreamento (IBE w/o S)

(a)			(b)		
Miami, FL.			Washington, D.C.		
Simulation type	Total (kW h)		Simulation type	Total (kW h)	
IBE	41064.3		IBE	30783.5	
IBE w/o R	38603.5	-6.0%	IBE w/o R	30120.0	-2.2%
IBE w/o S	53435.9	+30.1%	IBE w/o S	34694.2	+12.7%

(c)		
Minneapolis, MN.		
Simulation type	Total (kW h)	
IBE	43557.1	
IBE w/o R	43237.9	-0.7%
IBE w/o S	45394.1	+4.2%

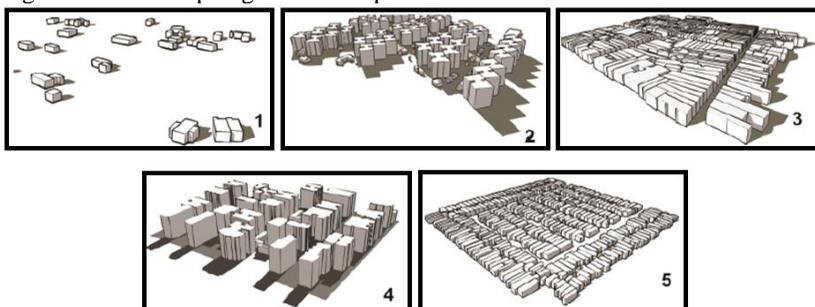
Fonte: Han, Taylor e Pisello (2015).

Em uma segunda etapa o estudo foi expandido totalizando na análise de oito grandes cidades do país, abrangendo suas seis zonas climáticas (Oeste: Los Angeles, CA e São Francisco, CA; Sul: Houston, TX e Miami, FL; Nordeste: Nova York, NY e Boston, MA; Meio-Oeste: Minneapolis, MN e Chicago, IL). A partir da grande variedade de contextos climáticos foi possível confirmar a dominância do efeito do sombreamento sobre o efeito da reflexão e a maior imprecisão na predição de energia quando não se leva em conta o entorno urbano em climas mais quentes, alcançando uma superestimação de até 60,4% no

consumo, enquanto em contextos frios esse aumento foi de no máximo 10,8%.

No Brasil, Martins, Bonhomme e Adolphe (2013) avaliaram o impacto da consideração do contexto urbano em cinco diferentes classes urbanas comuns na cidade em Maceió, cidade de clima quente e úmido localizado no nordeste do país (Figura 8). A classe 1 compreende os bairros da periferia da cidade e é, de forma geral, horizontal com edificações residenciais individuais e isoladas. A classe 2 representa, entre outras tipologias, a habitação vertical coletiva de até 4 pavimentos. A classe 3 corresponde aos bairros do centro comercial e histórico da cidade. A classe 4 é composta principalmente de habitações situadas na orla marítima, variando entre horizontais e verticais e apesar da elevada densidade total construída, apresenta-se como um tecido de porosidade importante. Por fim, a classe 5 é caracterizada como horizontal e densa.

Figura 8: Classes tipológicas mais representativas da forma urbana de Maceió



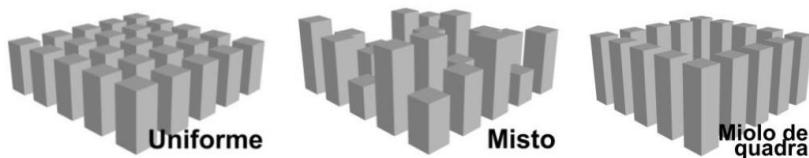
Fonte: Martins, Bonhomme e Adolphe (2013)

Nos resultados, obtidos a partir de simulações computacionais para estimativa da demanda de energia das edificações com o *software* CitySim, a menor demanda de energia estimada (193,83 MWh/m<sup>2</sup>/ano) correspondeu à classe mais adensada e vertical da cidade (classe 4), devido a verticalização que resulta na redução da fração visível do céu e em sombreamento reduzindo os ganhos de calor por radiação e, conseqüentemente, a carga estimada para resfriamento. A classe menos eficiente energeticamente correspondeu ao contexto urbano menos adensado, de maior compacidade e maior prospecto construído (classe 1 – 869,3 MWh/m<sup>2</sup>/ano). As análises demonstraram que para o clima analisado observa-se o importante efeito da verticalização e adensamento urbano na redução da demanda de energia dos edifícios.

Segundo Pyrgou et al. (2017) algumas pesquisas têm focado também em analisar o impacto da inserção do entorno urbano como elemento de sombreamento na performance de sistemas de energia renovável, demonstrando uma alta correlação entre o potencial de produção de energia solar e as características urbanas como a relação H/W do cânion urbano, distância entre prédios em lotes vizinhos e albedo da superfície.

No Brasil, alguns estudos, como o de Gaviria, Pereira e Mizgier (2013), apresentado a seguir, analisaram o impacto de diferentes tipologias de contextos urbanos de edificações comerciais na geração de energia fotovoltaica, uma vez que essa pode constituir uma das soluções para a redução do impacto das cidades no consumo energético. Os autores apontaram a necessidade de modelar o entorno urbano diante do processo de adensamento das cidades a partir de um estudo que buscou demonstrar a capacidade de geração fotovoltaica de edificações localizadas dentro de contextos urbanos verticais variados em Florianópolis. Nos cenários urbanos houveram variações de parâmetros como: taxa de ocupação, tipologia urbana (conjunto de edificações) e largura das ruas, mantendo-se a área construída e a área de análise de todos os cenários constante (Figura 9).

Figura 9:Tipologias urbanas selecionadas para a criação dos modelos



Fonte: Gaviria, Pereira e Mizgier (2013)

Os resultados, obtidos a partir de simulações dinâmicas com o *plug in* Diva para o *software* Rhinoceros, demonstraram que a influência das coberturas no cálculo da geração energética é bastante importante, porém o aproveitamento das fachadas apresentou bons resultados, principalmente nos modelos com taxas de ocupação menores. Os melhores resultados quando se avalia a geração tanto nas superfícies verticais quanto horizontais foram referentes aos cenários Mistos e Uniformes, porém quando se avalia apenas as fachadas verticais os resultados referentes aos cenários de Miolo de quadra foram mais satisfatórios. Em relação à taxa de ocupação, quando se analisa a geração considerando fachadas e coberturas o aumento da TO resulta no

aumento da eficiência, porém quando se analisa apenas as fachadas o aumento da TO é inversamente proporcional ao aumento da eficiência.

### **2.2.2 Simulações das modificações climáticas promovidas pelo contexto urbano**

Os estudos aqui apresentados consideraram a inclusão do contexto urbano nas simulações apenas a partir da consideração das modificações no clima provocadas pelo fenômeno ilha de calor urbano. A modelagem das edificações de entorno não são consideradas, constituindo a principal limitação destas pesquisas.

Em relação às modificações climáticas promovidas pelos elementos urbanos, estas não são captadas de forma total pelos programas de simulação energética dos edifícios. Eles são capazes de prever algumas interações entre os edifícios e seu entorno, como o sombreamento, a reflexão, troca de radiação de onda longa com o céu e padrão de iluminação natural, porém não são capazes de prever o efeito térmico dos edifícios no clima local, embora esse possa influenciar significativamente na performance de energia da edificação (UNZETA; NORFORD; BRITTER, 2009).

A maior dificuldade atualmente concentra-se no fato de que para uma previsão do comportamento energético de um edifício é necessária uma análise anual dos dados, enquanto a maioria das análises climáticas que abordam as alterações das variáveis ambientais resultantes do contexto urbano são realizadas a partir de dias típicos ou dias com condições de estabilidade atmosférica devido a grande demanda de tempo requerido por programas de simulações das alterações das variáveis ambientais. Alguns estudos foram desenvolvidos analisando o desempenho energético das edificações a partir de análises de contextos climáticos parciais do ano, como em Yang et al. (2012) que utilizou o *software* EnergyPlus (simulação energética) e o *software* Envi-MET (simulação microclimática) de forma acoplada. Bouyer, Inard e Musy (2011) acoplaram o *software* Fluent (CFD) com o *software* Solene (balanço termo-radiativo) com semelhante objetivo.

Porém alguns autores entendem que uma análise anual é imprescindível na busca por uma predição mais precisa do consumo energético das edificações. Dessa forma, artifícios foram desenvolvidos para que as modificações climáticas causadas pelo meio urbano fossem levadas em conta e, conseqüentemente, minimizassem as imprecisões dos resultados das simulações. Um deles é através da criação de arquivos climáticos urbanos, ou seja, através da geração de arquivos

climáticos de acordo com as características urbanas do local de análise ou medição de variáveis urbanas *in loco*, visando uma predição de performance de energia mais precisa em simulações dinâmicas. As diferenças entre os arquivos climáticos rurais e urbanos podem levar a predições imprecisas e a escolhas de projeto (design) incoerentes já que a temperatura de bulbo seco e a irradiação solar impactam nas cargas de aquecimento e resfriamento, enquanto a umidade relativa impacta no dimensionamento dos equipamentos condicionadores de ar (PYRGOU et al., 2017).

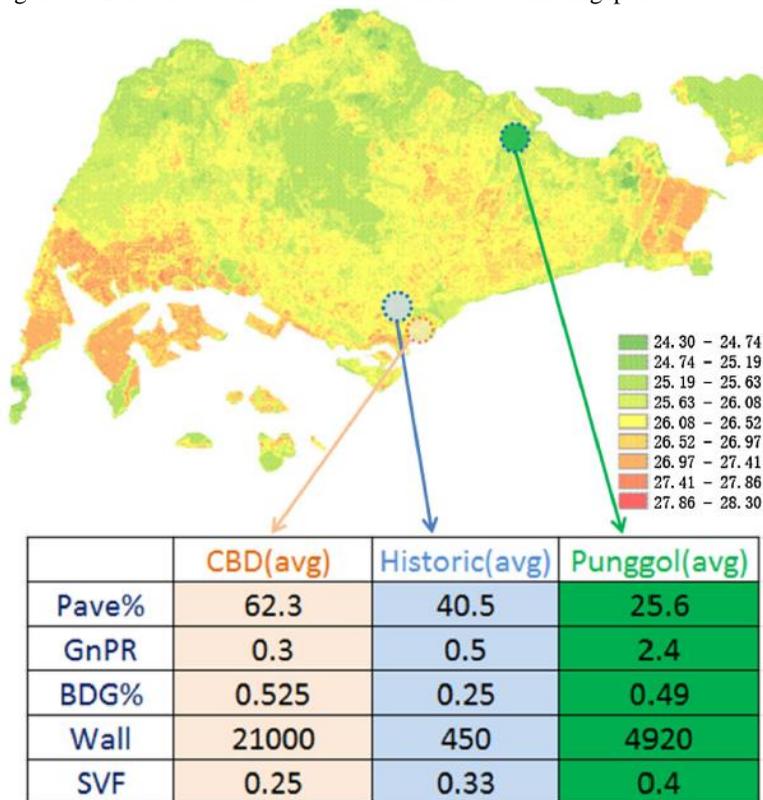
Como dito, a modificação do arquivo climático pode ser realizada principalmente a partir de duas formas. A primeira seria através de medições em campo, onde são monitorados tanto a estação localizada em campo aberto quanto uma estação localizada em um centro urbano (ALLEGRI; DORER; CARMELIET, 2012; PYRGOU et al., 2017). Nesse método os dados climáticos anuais medidos *in loco* em determinado contexto urbano formariam um arquivo climático equivalente ao clima urbano daquela porção da cidade. No entanto, a obtenção de dados de campo é muito trabalhosa e cara, além de serem limitadas espacialmente e temporariamente (FRAYSSINET et al., 2018). Logo, a disponibilidade desses dados é muito pequena, impossibilitando a utilização desse método em diversos locais.

O estudo de Liu et al. (2017), que utilizou a primeira forma de modificação de arquivo climático citada acima, buscou demonstrar a grande necessidade da utilização de arquivos climáticos que levem em conta o contexto urbano do local, e consequentemente o efeito ilha de calor urbano, demonstrando o impacto da utilização desse novo arquivo no consumo energético de edificações residenciais na cidade de Singapura. Foram avaliadas edificações em três locais da cidade com diferentes características urbanas como: porcentagem de área pavimentada em um raio de 50m (Pave%), relação entre área verde e área do sítio urbano (GnPR), relação da altura com a área construída do edifício (BDG%), área total de superfície das paredes (Wall) e fator visão de céu (SVF). A localização das áreas urbanas e suas características são apresentadas na Figura 10.

A modificação do arquivo climático (temperatura) para que o efeito ilha de calor urbano fosse levado em conta nos três diferentes contextos urbanos foi feita utilizando a fórmula proposta por Jusuf e Wong (2012), baseada na correlação entre a temperatura medida nos últimos anos nas áreas urbanas da cidade e as variáveis do tecido urbano (altura média das edificações, ocupação, área das fachadas, fator visão de céu, área pavimentada e áreas verdes), resultando em um arquivo

TMY modificado. Os efeitos na ventilação e na radiação solar não foram corrigidos e, segundo os autores, serão tema de estudos futuros.

Figura 10: Diferentes contextos urbanos analisados em Singapura



Fonte: Liu et al. (2017)

Os resultados, simulados com o *software* EnergyPlus, demonstraram que os novos arquivos TMY possuem médias mensais de temperatura de 1°C a 2°C mais altas que o antigo, o que provocou um aumento no consumo de energia de 4,15% para "Punggol", 5,8% para "Historic" e de 10,95% para "CBD". A maior diferença no consumo foi observada no contexto urbano mais adensado (CBD), onde a combinação entre grande área pavimentada, baixa área verde e baixo fator de visão de céu aumentaram o efeito de ilha de calor urbano.

O estudo realizou ainda uma comparação entre as previsões energéticas simuladas e o consumo real de uma edificação típica pública

residencial. Os resultados referentes aos novos arquivos climáticos simulados ficaram mais próximos que os reais do que os do arquivo antigo, mas os valores de consumo reais apresentaram-se sempre maiores que os simulados. Os novos arquivos TMY foram capazes de reduzir a diferença entre o consumo real e previsto de 4,47% para 1,62% para "Historic" e de 11,64% para 9,76% para "Punggol". Embora a alteração dos arquivos climáticos na simulação resulte na redução de diferenças entre o consumo simulado e o consumo real em menos de 2%, segundo os autores, ainda é uma melhoria importante para edifícios residenciais, onde o comportamento do usuário é o fator dominante em relação ao uso de energia e, portanto, seu consumo é difícil de prever.

Para superar as limitações referentes à primeira forma de modificação dos arquivos climáticos, é possível ampliar os dados meteorológicos medidos em locais de fácil acesso, como por exemplo, estação meteorológica rural, para outros locais a partir de técnicas de extrapolação ou de *softwares* geradores de clima (FRAYSSINET et al., 2018). A modificação dos valores de temperatura do ar de acordo com características do meio urbano onde a edificação de análise se encontra a partir de modelos matemáticos constitui a segunda forma de modificação do arquivo climático.

Hoje existem diversos métodos matemáticos para a alteração dos arquivos climáticos, entre eles alguns mais simplificados como o de Crawley (2008), que calcula a diferença horária de acordo com o tamanho da população, e outros que exigem um nível maior de detalhamento da área de estudo em relação a suas características físicas, como o proposto e aperfeiçoado por Bueno et al., (2013), Nakano et al., (2015), Yang (2016) e Mao et al., (2017), resultante em um *software* denominado *Urban Weather Generator*, específico para a produção de arquivos climáticos modificados a partir de arquivos climáticos já existentes em formato EPW. A utilização de arquivos climáticos modificados possibilita o acoplamento a programas de simulação energética (UNZETA; NORFORD; BRITTER, 2009).

A metodologia desenvolvida por Crawley (2008) permite criar arquivos climáticos que representem o impacto da ilha de calor urbano nos centros urbanizados. Dessa forma, no estudo foram criados arquivos climáticos para 25 localidades diferentes (20 regiões climáticas). Em seguida, analisou-se o impacto da mudança desses arquivos climáticos no consumo de energia em uma pequena edificação de escritórios. Os resultados demonstraram que em climas frios, a mudança do consumo anual de energia devido às modificações climáticas seria positiva - reduzindo o uso de energia em 10% ou mais. Já para os climas tropicais,

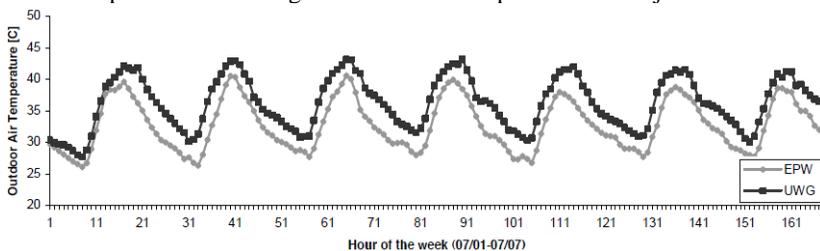
o consumo anual energia sofreria um aumento de até mais de 20% devido às modificações climáticas.

Já os estudos utilizando *softwares* modificadores de clima urbano, como o UWG, têm se concentrado em analisar as alterações na temperatura do ar proporcionadas pelo fenômeno ilha de calor urbano nos cânions urbanos. O UWG já foi validado em Toulouse/França, Basel/Suíça (BUENO et al., 2013), Singapura (BUENO et al., 2014), e Boston/EUA (NAKANO, 2015).

No estudo realizado por Unzeta, Norford e Britter (2009) os autores realizaram uma análise comparativa entre a temperatura do ar no cânion urbano fornecida pelo arquivo de EPW da estação meteorológica mais próxima da cidade de Abu Dhabi (Emirados Árabes) e a temperatura obtida a partir de simulação computacional utilizando o *software* modificador de clima urbano *Urban Weather Generator* (UWG). O cânion urbano modelado para a simulação era composto de dois edifícios de escritório, com H/W de 0,9 e orientação Leste-Oeste.

Na Figura 11 é possível observar a variação da temperatura do ar externo horária entre os valores obtidos pelo arquivo EPW e os calculados a partir do UWG ao longo de uma semana típica de verão. Os resultados demonstram o aumento da temperatura do ar em todas as horas da semana quando o contexto urbano é levado em conta e apontam uma maior variação (até 5°C) durante o período da noite e madrugada, em concordância com a literatura referente ao fenômeno ilha de calor urbano.

Figura 11: Temperatura do ar externo em °C obtida através do arquivo EPW e calculada pelo UWG ao longo de uma semana típica do mês de julho

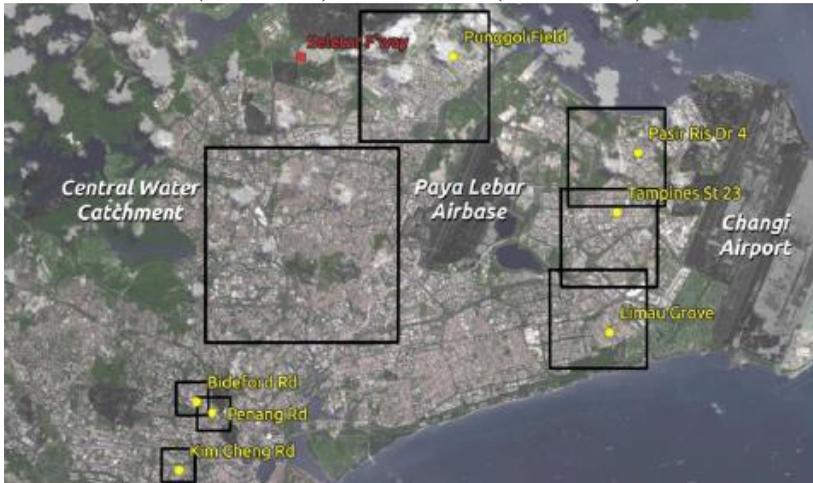


Fonte: Unzeta, Norford e Britter (2009).

Já em Bueno, Nakano e Norford (2015) foram comparados valores de temperatura do ar obtidos em medições *in loco* em sete diferentes contextos urbanos (destacados em amarelo na Figura 12) de Singapura, cidade de clima tropical úmido com temperaturas altas

constantes e alta precipitação ao longo do ano, com os valores calculados pela simulação utilizando UWG para cada contexto urbano em que foi realizada a medição. Esses valores foram comparados ainda com os medidos *in loco* em uma área não urbanizada no entorno (destacado em vermelho na Figura 12), típica localização das estações meteorológicas que fornecem os dados para os arquivos EPW.

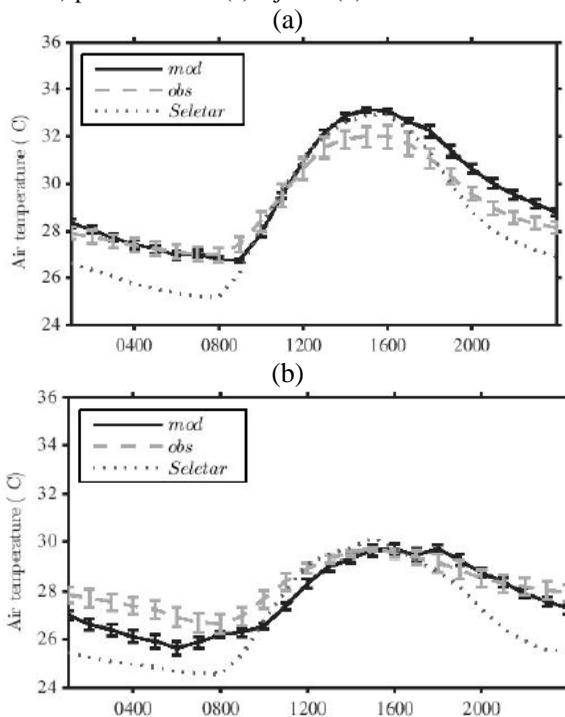
Figura 12: Mapa de Singapura indicando as estações de medição *in loco* em sete contextos urbanos (em amarelo) e em área rural (em vermelho)



Fonte: Bueno, Nakano e Norford (2015).

A Figura 13 apresenta os dados da temperatura do ar externo referentes a um dia de fevereiro e de julho. Os resultados demonstraram que os valores calculados pelo UWG (mod) mantêm-se sempre mais próximos aos medidos *in loco* em contextos urbanos (obs) que os valores medidos em uma área não urbanizada (Seletar) principalmente durante o período da noite e madrugada, que são os horários de maior influência do fenômeno ilha de calor urbano. O erro médio quadrático (RMSE) entre as medições em contexto urbano (obs) e o UWG (mod) foi de 0,9K para fevereiro e de 1,2K para julho, reforçando a aplicabilidade dos simuladores de modelos de cânion urbano.

Figura 13: Dados de temperatura do ar para sete diferentes contextos urbanos calculados pelo UWG (mod) e medidos *in loco* (obs), e medição realizada em área rural (Seletar) para fevereiro (a) e julho (b)



Fonte: Bueno, Nakano e Norford (2015).

A importância da utilização de arquivos climáticos que condizem com a realidade das cidades também foi destacado em Pyrgou et al. (2017). O estudo, conduzido em uma cidade de médio porte na Itália (Perugia), realizou uma comparação estatística entre os arquivos climáticos TRY e TMY, comumente utilizados nas análises, e dois arquivos climáticos medidos *in loco*, um em uma área urbana e outro em uma área rural. O objetivo principal foi destacar a necessidade de uma frequente atualização dos arquivos climáticos utilizados comumente para prever as performances dos edifícios em simulações dinâmicas dentro de áreas urbanas, visando incluir as modificações microclimáticas causadas pela urbanização como o efeito ilha de calor urbano e picos de temperatura. Os resultados demonstraram a presença do efeito ilha de calor urbano no verão de até 5,5°C no final de tarde e de -3,5°C no início da manhã, resultados do efeito ilha de calor urbano,

ressaltando a necessidade de utilização de arquivos climáticos mais precisos para simulações de edifícios dentro de áreas urbanas.

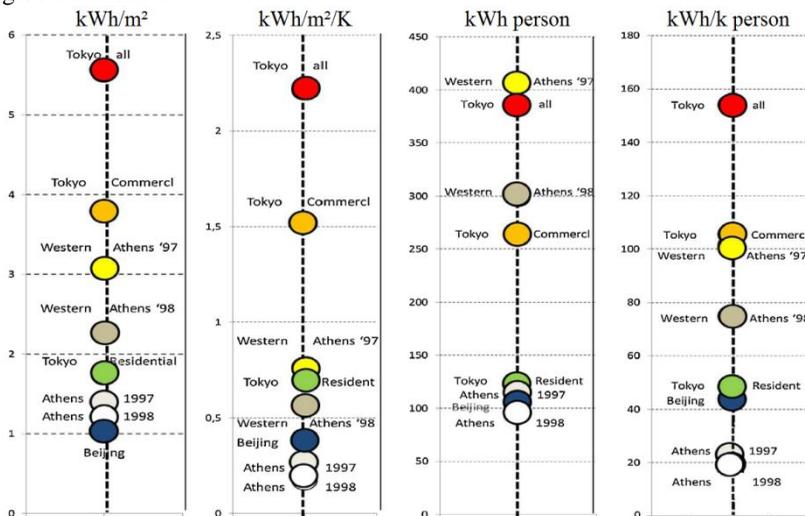
Crawley (2008) salienta que, a partir de arquivos climáticos modificados, as simulações termo-energéticas de edificações podem servir como ferramenta de avaliação de mudanças climáticas e de políticas públicas, além de suas capacidades já reconhecidas como avaliação de um projeto ou retrofit, design de equipamentos de aquecimento e refrigeração e avaliação de tecnologias alternativas de eficiência energética e energia renovável.

Os estudos previamente apresentados realizaram a análise de um único edifício dentro de um contexto urbano. Essa abordagem é importante, pois proporciona um conhecimento útil e rápido do impacto do aquecimento urbano, no entanto, os resultados de um único edifício dependem totalmente de suas características e por isso não são sempre necessariamente representativos para toda a cidade. Visando ultrapassar esse obstáculo alguns pesquisadores tentaram estimar o impacto energético do aquecimento urbano para o conjunto de edifícios de uma cidade.

Esses estudos foram realizados a partir de duas metodologias: Na primeira se calcula o consumo de energia para resfriamento de edificações típicas para em seguida se estimar o consumo total da cidade usando como dados de entrada os consumos típicos para cada tipo de edifício e também o tamanho, distribuição e características estatísticas de todo o conjunto da cidade. As simulações são realizadas com os dados climáticos urbanos medidos *in loco*, que consideram o efeito da ilha de calor urbano, e em seguida com os dados climáticos de uma estação rural de referência. A diferença entre as duas estimativas é considerada a alteração na carga para resfriamento provocada pelo efeito ilha de calor urbano. Essa primeira metodologia foi utilizada por Hassid et al. (2000) e Santamouris, Paraponiaris e Mihalakakou (2007). A segunda metodologia consiste em estabelecer correlações entre a temperatura do ar e o correspondente consumo de energia visando o resfriamento. Aqui também são realizadas simulações com dois conjuntos de dados climáticos (um com o impacto do efeito ilha de calor urbano e outro sem). A correlação entre a temperatura ambiente e o consumo de energia de refrigeração é usada para ambos os conjuntos de dados climáticos. A diferença entre as duas simulações é considerada como a alteração no consumo causada pelo efeito ilha de calor urbano. Esta segunda metodologia foi utilizada por Hirano e Fujita (2012) e Li et al. (2014).

O trabalho de Santamouris (2014) teve o objetivo de coletar, analisar e classificar estudos existentes do impacto do aquecimento das áreas urbanas (efeito ilha de calor urbano e aquecimento global) no consumo energético dos edifícios. Porém, as diferentes formas de apresentação dos resultados referentes à magnitude desse efeito nas cidades foi uma grande dificuldade do estudo e, dessa forma, teve também como objetivo definir e calcular indicadores desse impacto. Baseado nos dados analisados dos estudos citados anteriormente (HASSID et al., 2000; HIRANO; FUJITA, 2012; LI et al., 2014; SANTAMOURIS; PARAPONIARIS; MIHALAKAKOU, 2007), Santamouris (2014) definiu e calculou quatro indicadores de análise para representar a variação de energia resultante da ilha de calor urbano e das mudanças climáticas. São eles: GEPS (*Global energy penalty per unit of city surface - kWh/m<sup>2</sup>*), GEPSI (*Global energy penalty per unit of city surface and per degree of the UHI intensity - kWh/m<sup>2</sup>/K*), GEPP (*Global energy penalty per person - kWh/p*) e o GEPM (*Global energy penalty per person and per degree of the UHI intensity - kWh/p/K*). A Figura 14 apresenta os índices de impacto do efeito ilha de calor urbano no consumo de energia calculados a partir das informações dos quatro estudos.

Figura 14: Índices do impacto da ilha de calor urbano no consumo de energia global de uma cidade



Fonte: Santamouris (2014).

Os resultados apontam que o índice GEPS, comumente utilizado em pesquisas que analisam o desempenho da carga das edificações, é altamente influenciado pela densidade dos edifícios da cidade, logo quanto mais denso o contexto urbano, maior o valor desse indicador. Embora a intensidade do efeito da ilha de calor urbano em Atenas e no oeste de Atenas seja bastante superior à Tóquio, os valores do índice GEPS em Atenas são significativamente mais baixos. Isso porque a densidade de edifícios é muito menor em Atenas do que em Tóquio, enquanto o uso de ar condicionado também é muito menor. O GEPSI reflete as mesmas características do indicador GEPS, levando em conta a variação do efeito ilha de calor urbano (UHI).

O GEPP é um indicador altamente influenciado pela densidade de pessoas de uma área. Quanto menor a população, maior o valor do GEPP para uma determinada intensidade de ilha de calor urbano (UHI). Os valores mais altos são calculados para Atenas ocidental, pois é a área com a menor densidade populacional entre os estudos existentes e também apresenta a maior intensidade de ilha de calor urbano. Por fim, o índice GEPI possui as mesmas características do indicador GEPP, apenas incluindo a intensidade do efeito ilha de calor urbano (UHI) local como informação adicional.

Santamouris (2014) conclui que embora os estudos disponíveis comparando o consumo de energia de edificações similares localizadas em zonas urbanas e rurais sejam limitados, os dados existentes apontam que o aumento médio da carga de resfriamento por causa da ilha de calor é estatisticamente significativo, de em média 13 % e que os estudos referentes ao impacto do aquecimento das áreas urbanas na cidade como um todo, igualmente limitados, indicam que existe um significativo aumento no consumo energético de em média 2,4kWh/m<sup>2</sup>. O autor ressalta que esses números consistem em informações preliminares que podem mudar quando mais dados estiverem disponíveis.

### **2.2.3 Simulações acopladas das modificações climáticas e físicas proporcionadas pelo contexto urbano**

Apesar da existência de estudos tanto referentes à inserção das características físicas dos contextos urbanos (tópico 2.2.1), como estudos da possibilidade de cálculo das modificações climáticas proporcionadas por esses contextos (tópico 2.2.2), ainda existem poucos trabalhos que utilizem em conjunto ferramentas de simulações

energéticas com arquivos climáticos que de fato representem o contexto climático urbano visando a previsão anual de energia.

Para Crawley (2008), mesmo com todo o estudo científico sobre o efeito ilha de calor urbano, poucos até então haviam analisado o potencial do impacto das modificações das variáveis ambientais no desempenho energético dos edifícios. Ele destaca que o terceiro relatório de avaliação do IPCC (IPCC 2001) resume o impacto das mudanças climáticas no ambiente construído como o "aumento da demanda de refrigeração elétrica e redução da confiabilidade do fornecimento de energia". Ainda segundo Crawley (2008) esta visão ignora a variabilidade na resposta climática observada entre os diferentes edifícios e sua localização, já que cada um responde de maneira complexa às variadas interações. De forma geral, as pesquisas estão voltadas principalmente para as causas das mudanças climáticas que para os impactos. Os impactos são mais difíceis de prever, em parte, porque a capacidade de projetar mudanças no clima em uma escala urbana tem sido limitada. Como resultado, são necessárias mais pesquisas sobre impactos e adaptações em assentamentos humanos (IPCC 2001).

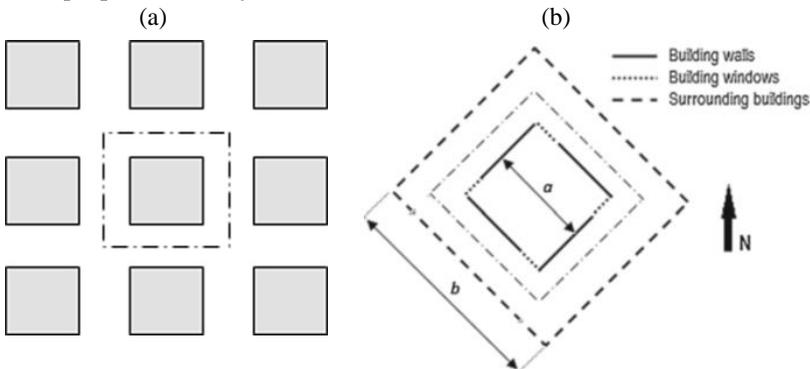
Idealmente, as simulações de edificações inseridas na cidade deveriam ser realizadas de maneira acoplada com modelos de microclima, e esses juntamente com um modelo mesoclimático. Porém, segundo Frayssinet et al. (2018), ainda não existe uma ferramenta inteiramente validada capaz de simular de forma precisa a demanda de energia de edifícios na escala da cidade em razão do alto custo computacional necessário, como já abordado. Para reduzi-los, são necessárias simplificações nas características físicas urbanas e climáticas. Embora as simplificações exigidas possam levar a certa incerteza nos resultados, estas seriam ainda maiores caso o modelo não considerasse de nenhuma característica física ou climática do entorno.

Buscando reduzir esta lacuna, inicialmente, para que os efeitos do contexto urbano fossem levados em conta no clima urbano, pesquisadores desenvolveram modelos de energia dos edifícios simplificados integrados dentro de modelos de cânions urbanos. Se por um lado esses novos modelos representaram um avanço significativo na integração dos estudos entre clima urbano e energia nos edifícios, esses ainda possuíam limitações significativas que afetavam o cálculo de predição do consumo energético das edificações. Por essa razão Bueno et al. (2011) buscaram integrar estudos do clima urbano e de energia em edificações através do acoplamento de um modelo de energia do edifício detalhado (EnergyPlus) e um modelo de cânion urbano (TEB).

O método de acoplamento EnergyPlus + TEB possibilita analisar o efeito do clima urbano nas edificações, assim como permite a identificação de configurações de edifícios cujas concepções são mais sensíveis às condições climáticas urbanas. O acoplamento é realizado por meio das interações dos cálculos de ambos os programas, começando pela simulação do TEB. A temperatura das paredes, da cobertura e as condições climáticas dos cânions calculadas no TEB foram utilizadas como dados de entrada na simulação energética. Depois, a temperatura das aberturas e o valor de emissão da perda de calor do HVAC calculadas pelo EnergyPlus são usadas em uma nova interação do TEB. Esse processo é repetido até alcançar uma convergência considerada satisfatória.

Para o estudo de Bueno et al. (2011), realizado no contexto climático de Toulouse (França), foi modelado um edifício residencial composto por uma zona única, com abertura em todas as fachadas e com uma massa térmica interna que representa construções de piso intermediário (Figura 15). Os resultados foram analisados a partir da comparação entre dados de medições coletados durante um experimento *in loco* em um denso centro urbano da cidade (Observed) com o método de acoplamento (CS) e os resultados apenas do modelo do cânion urbano (TEB) que possui uma forma simplificada de calcular o consumo energético.

Figura 15: Contexto urbano utilizado para a simulação computacional (a) e destaque para a edificação de análise (b)

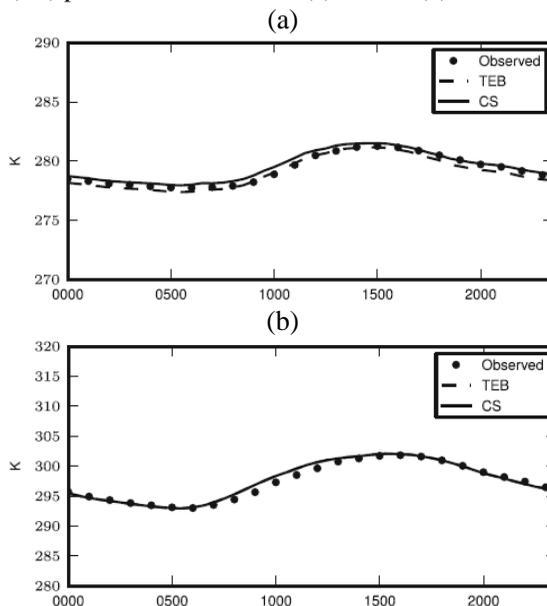


Fonte: Bueno et al. (2011).

Em relação à predição da temperatura do ar externo tanto o modelo do método de acoplamento (CS) quanto o modelo do cânion

urbano (TEB) foram capazes de prevê-la corretamente, demonstrando grande concordância com as medições *in loco*, com erro médio quadrático diário (RMSE) menor que 1K tanto durante o inverno quanto durante o verão (Figura 16). Esses resultados indicam a capacidade dos modelos de cânion urbano de prever corretamente as alterações climáticas promovidas pelo contexto urbano.

Figura 16: Temperatura do ar externo em K de acordo com a medição *in loco* (Observed), calculado pelo TEB (TEB) e calculado a partir do método de acoplamento (CS) para um dia de inverno (a) e verão (b)

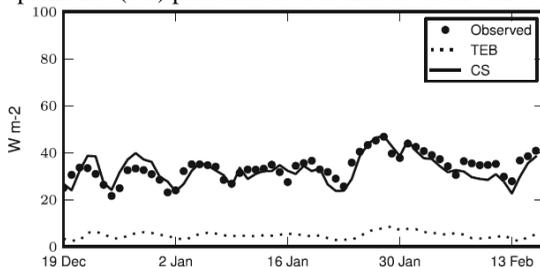


Fonte: Bueno et al. (2011).

Em relação à análise de energia é importante ressaltar que durante o verão o ar-condicionado é pouco utilizado nesse contexto climático, não representando um consumo de energia significativo de condicionamento artificial durante essa época, dispensando uma análise energética nesse sentido. Já durante o inverno existe o uso intensivo de aquecedores artificiais. A Figura 17 a seguir referente a dois meses do inverno aponta a concordância entre os dados medidos *in loco* com os resultados do método de acoplamento, indicando sua precisa estimação de energia elétrica, com erro médio quadrático de  $3,8 \text{ Wm}^2$  no inverno e de  $4,7 \text{ Wm}^2$  no verão (média diária). Observa-se também que a

estimação realizada apenas pelo modelo de cânion urbano (TEB), que não leva em conta as perdas de calor pela janela e infiltração, não correspondeu satisfatoriamente a medição *in loco*, pois subestimou o consumo de energia para aquecimento nas edificações. Esse resultado aponta a necessidade de uma análise energética a partir de programas de simulação de energia detalhados para uma predição precisa em conjunto com um modelo de cânion urbano.

Figura 17: Consumo médio de eletricidade em  $Wm^2/dia$  da edificação a partir da medição *in loco* (Observed), calculado pelo TEB (TEB) e calculado pelo método de acoplamento (CS) para dias de dois meses do inverno



Fonte: Bueno et al. (2011).

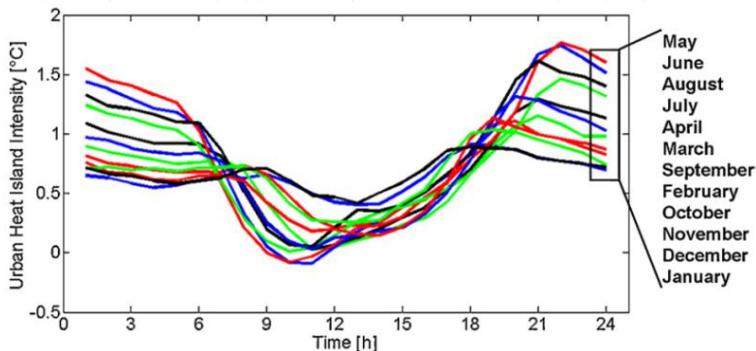
Diferentemente das simulações que levaram em conta apenas as características físicas do entorno e realizaram a comparação com a simulação do edifício isolado, as que levaram em conta também as modificações climáticas de forma acoplada a modelagem do entorno, como em estudo realizado por Allegrini, Dorer e Carmeliet (2012) e Salvati, Coch e Morganti (2017), apresentaram na maior parte dos casos um aumento do consumo total de energia, pois a captação do efeito ilha de calor urbano demonstrou forte influência no desempenho energético das edificações analisadas. É importante salientar que os contextos climáticos das pesquisas foram a Suíça, país de clima temperado com verões amenos e invernos rigorosos (ALLEGRIINI; DORER; CARMELIET, 2012) e Roma, cidade de clima temperado, onde de forma geral a necessidade de aquecimento e resfriamento são equivalentes ao longo do ano (SALVATI; COCH; MORGANTI, 2017).

Para a consideração tanto das modificações das características físicas quanto das climáticas provocadas pelo contexto urbano, o estudo de Allegrini, Dorer e Carmeliet (2012) realizou simulações computacionais de energia a partir do *software* TRNSYS com o edifício isolado e com os edifícios de entorno e utilizou na primeira o arquivo climático referente a uma estação rural de campo aberto (Basel, Suíça),

como é recorrentemente realizado em simulações energéticas, e para a segunda simulação utilizou um arquivo climático modificado, gerado a partir da correção dos dados referentes à temperatura do ar do arquivo climático rural de acordo com a Figura 18 apresentada a seguir. Esta foi desenvolvida baseada em medições realizadas por um projeto denominado BUBBLE, desenvolvido na mesma cidade, com medições de temperaturas em diferentes contextos urbanos ao longo de um ano (ROTACH et al., 2005), e apresenta os valores horários a serem corrigidos em cada mês do ano.

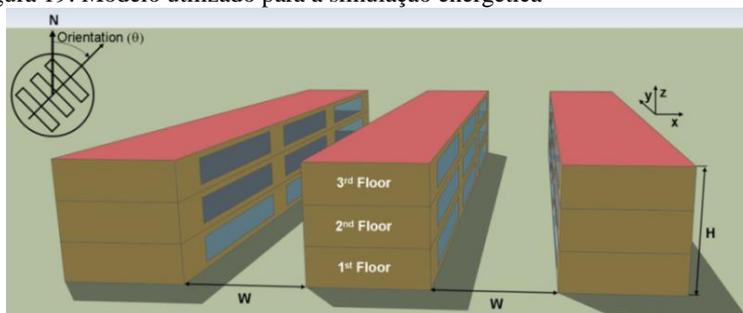
Foi analisada a demanda de energia para aquecimento e resfriamento dos três pavimentos do edifício central, com H/W de 1,0 entre ele e o entorno (Figura 19). Os prédios possuem formato retangular de 13,5m de largura e 110,5m de profundidade e uso misto (residencial + escritórios).

Figura 18: Média horária mensal do valor de correção da temperatura do ar externo em °C de acordo com a intensidade da ilha de calor urbano



Fonte: Allegrini, Dorer e Carmeliet (2012).

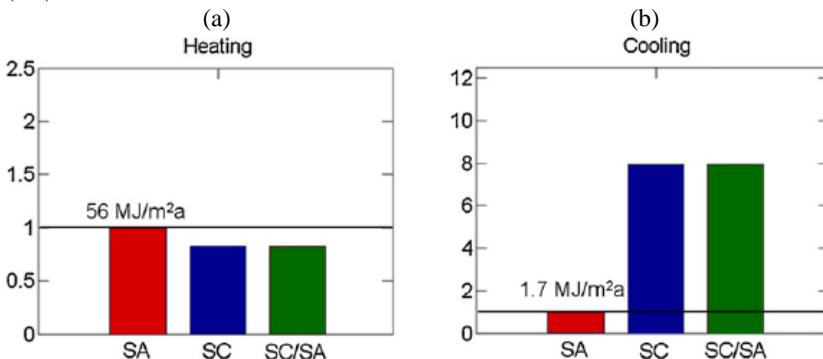
Figura 19: Modelo utilizado para a simulação energética



Fonte: Allegrini, Dorer e Carmeliet (2012).

Foi observado que a diferença dos resultados entre a simulação de um edifício isolado com utilização de arquivo climático medido em campo aberto (AS) e um edifício dentro do contexto urbano com arquivo climático corrigido (SC) demonstraram, de forma geral, uma diminuição da carga para aquecimento e um aumento da demanda por resfriamento (Figura 20). Os principais motivos identificados para essas mudanças no padrão de consumo foram: (a) o aprisionamento da radiação solar dentro dos cânions, especialmente durante o verão devido à altura solar, (b) o bloqueio da radiação de onda longa de volta para o céu pelas edificações, (c) menores perdas de calor convectivo e (d) maiores temperaturas devido à ilha de calor urbano.

Figura 20: Demanda anual de aquecimento normalizada em  $56\text{MJ/m}^2$  (a) e de resfriamento em  $1,7\text{MJ/m}^2$  (b) do edifício isolado (SA) e no contexto urbano (SC).



Fonte: Allegrini, Dorer e Carmeliet (2012).

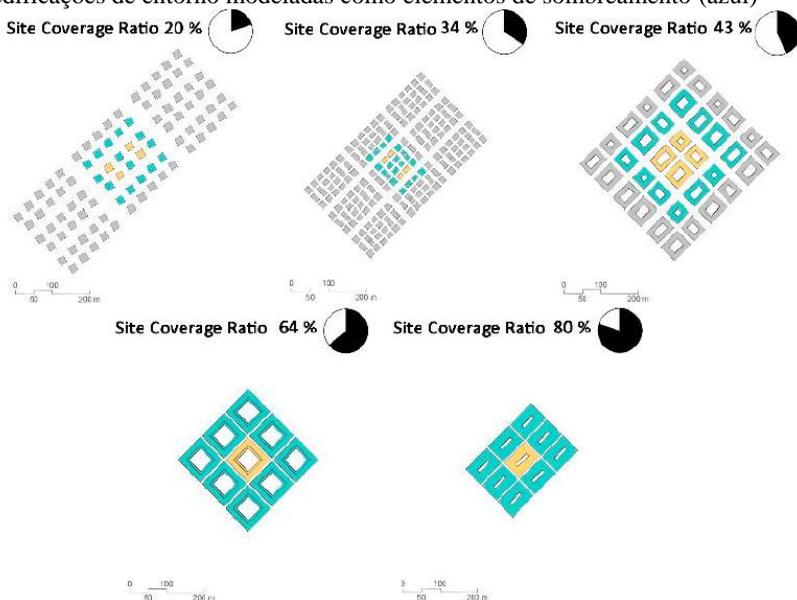
É importante ressaltar, porém, que os gráficos da figura acima foram normalizados para o valor de demanda do edifício isolado. Dessa forma, apesar do aumento da demanda por resfriamento de 80% em termos relativos, em termos absolutos esse crescimento foi de em média  $13,6\text{ MJ/m}^2$  ao ano, valor próximo à redução da demanda por aquecimento de em média  $11,2\text{ MJ/m}^2$  ao ano (30%).

Já em Salvati, Coch e Morganti (2017), para a consideração tanto das características físicas do contexto urbano como das modificações climáticas provocadas pelo efeito ilha de calor urbano o estudo realizou simulações termo-energéticas com o *software* EnergyPlus primeiramente com o edifício sem entorno e com o arquivo climático medido em área rural e em seguida com o edifício em diferentes contextos urbanos - selecionados considerando diferentes níveis de

densidade a partir da taxa de ocupação do terreno ( $\rho_{bld}$ ) - e para cada contexto urbano utilizou um arquivo climático criado com *software* UWG a partir do arquivo climático rural existente e as características de cada contexto urbano de análise (Figura 21).

O estudo buscou avaliar o efeito do adensamento urbano no desempenho energético dos edifícios num clima mediterrânico (cargas igualmente significantes para aquecimento e resfriamento). Os resultados, referentes a uma edificação de apartamentos residenciais, foram apresentados e analisados separadamente em relação à carga para resfriamento, a carga para aquecimento e depois de forma conjunta, apresentado na Figura 22. Na imagem a linha vermelha identifica a demanda de energia do mesmo apartamento localizado no meio rural, sem efeito ilha de calor urbano ou obstruções solares.

Figura 21: Contextos urbanos analisados com edificação de análise (amarelo) e edificações de entorno modeladas como elementos de sombreamento (azul)

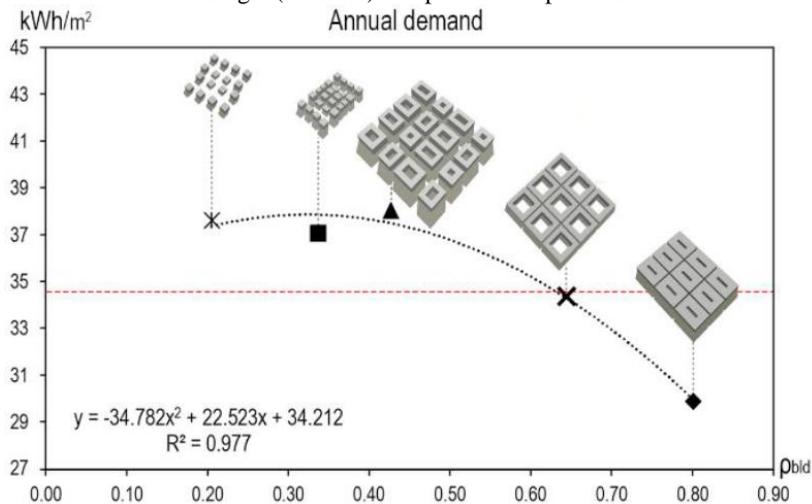


Fonte: Salvati, Coch e Morganti (2017)

Primeiramente, os resultados confirmaram que, quanto mais adensado, menor a radiação solar que atinge as fachadas dos edifícios e maior a intensidade do efeito ilha de calor urbano. Considerando-se a demanda de carga para resfriamento, observou-se uma grande

correlação entre essa e o adensamento (ocupação no terreno), com  $R^2$  de 0.95. O aumento da ocupação no terreno resultou em uma proporcional redução desta carga. Dessa forma, concluiu-se que o aumento da densidade é benéfico durante o verão no clima mediterrâneo, devido à importância da radiação solar reduzida ser maior do que o aumento da ilha de calor. Considerando apenas a carga para aquecimento um aumento da densidade implica, no início, um aumento da demanda de aquecimento, devido à diminuição progressiva da radiação solar que incide nas fachadas. No entanto, existe um valor limite de taxa ocupação ( $\rho_{bld} = 0,4$ ) a partir do qual a demanda de aquecimento começa a diminuir. Isso acontece porque a economia de energia resultante de uma forte intensidade do efeito ilha de calor urbano se torna mais importante do que a redução dos ganhos solares durante o inverno.

Figura 22: Relação entre a taxa de cobertura do solo da área analisada e a demanda anual de energia (kWh/m<sup>2</sup>) do apartamento para cinco estudos de caso



Fonte: Salvati, Coch e Morganti (2017)

Os resultados da demanda anual de energia (aquecimento + resfriamento) indicaram que o contexto urbano é prejudicial ao desempenho energético dos edifícios (aumenta a carga) se a estrutura urbana estiver dispersa. Para valores baixos de taxa de cobertura do local, a demanda de energia do apartamento é maior (em até 10%) do que em um ambiente rural. No entanto, o aumento do adensamento urbanos a partir do aumento na taxa de ocupação determina uma

diminuição da demanda anual de energia no contexto urbano. Além disso, os impactos contrastantes do adensamento na demanda de energia compensam-se em texturas urbanas compactas (pbld em torno de 0,63), determinando a mesma demanda de energia de um ambiente rural. Na no contexto urbano mais compacto entre os estudos de caso (pbld = 0,8), a demanda anual de energia é ainda menor do que em um ambiente rural. Dessa forma, os resultados apontaram que os contextos urbanos compactos (pbld acima de 0,5) são mais eficientes energeticamente em um clima mediterrâneo em comparação aos padrões urbanos dispersos, porque a densidade permite aproveitar a intensidade do efeito ilha de calor urbano durante o inverno, reduzindo a demanda de resfriamento graças a uma enorme redução da radiação solar nas fachadas dos edifícios.

Apesar dos estudos apresentados na presente revisão apresentarem, de forma geral, o impacto do contexto urbano em uma única edificação de análise é importante ressaltar que algumas outras pesquisas buscam avaliar o impacto do contexto urbano em um conjunto de edificações formadoras da cidade, como um bairro, por exemplo. Reinhart, Cerezo e Davila (2016) apresenta uma revisão dos estudos existentes sobre esse novo campo de pesquisa, onde existe uma modificação na tipologia de simulação de BEM (*Building energy models* – Modelos de energia de edificações isoladas) para UBEM (*Urban building energy models* – Modelos de energia de um conjunto de edificações). O estudo apresenta que essa necessidade de modificação surgiu em razão do rápido e desordenado crescimento urbano dos últimos anos e que a UBEM pode se estabelecer como uma importante ferramenta para os planejadores urbanos e até arquitetos.

Assim como os estudos apresentados anteriormente, este leva em consideração as modificações do contexto urbano no clima (variáveis ambientais) a partir de arquivos climáticos modificados, na radiação solar a partir da modelagem de toda uma área urbana e na iluminação natural. As principais limitações também são similares: dimensionar a modificação da ventilação natural, radiação de onda longa e prever o comportamento dos usuários, além da dificuldade de obter dados referentes a uma área grande.

Uma importante preocupação é em relação à confiabilidade dos resultados da simulação. Considerando que mesmo as previsões individuais (BEM) apresentam incertezas nos resultados, inicialmente parece improvável que uma UBEM seja capaz de prever fielmente o uso de energia de muitos edifícios. No entanto, segundo os estudos analisados por Reinhart, Cerezo e Davila (2016), quando se compara o

consumo anual de energia de um conjunto de edificações medidos com a simulação de múltiplos edifícios, os resultando apontam erros de 1 a 19% para o consumo total de energia. Esses intervalos foram considerados aceitáveis para orientar decisões que afetam vários edifícios. No entanto, para uma análise de carga de pico, diferenças de até 40% foram relatadas, constatando-se que a precisão da simulação diminui à medida que os resultados são analisados ao nível do edifício individual.

### 2.3 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Neste capítulo foi apresentada a revisão de literatura, que auxiliou na definição da metodologia do estudo para que os objetivos fossem alcançados. A revisão abordou primeiramente os impactos do adensamento urbano no consumo de energia, apresentando conceitos e estudos de forma mais qualitativa (tópico 2.1) e em seguida apresentou os estudos recentes que adotaram o contexto urbano nas simulações termo-energéticas (tópico 2.2).

Diante dos estudos expostos, hoje já é possível afirmar que modelar e tratar edifícios como elementos isolados não representa com precisão e fidelidade sua performance de energia, pois não considera a grande proximidade entre as edificações de uma área urbana e suas implicações energéticas. Foram observadas no tópico 2.2.1 diferenças no consumo energético total de até 32,7% a partir de simulações com e sem a modelagem da geometria do entorno urbano e as maiores diferenças apresentaram-se nos contextos climáticos mais quentes. Já nas simulações considerando a modificação da temperatura do ar resultante do efeito ilha de calor urbano observou-se alterações no consumo total de energia de até 13% (tópico 2.2.2). Os estudos que levaram em conta tanto a modelagem da geometria do entorno e as modificações no clima referentes ao efeito ilha de calor urbano apresentaram variações de até 10% na carga energética.

Com o crescimento e transformação constante nas áreas urbanas, apontam-se as simulações computacionais como o meio mais viável de análise desses fenômenos. A partir de simulações que levem em conta o contexto urbano de forma adequada é possível obter recomendações gerais para o planejamento urbano e projeto arquitetônico mais pertinente à realidade de cada local, ajudando a promover uma rede de edifícios sustentáveis e de consumo energético consciente.

As principais alterações resultantes do adensamento urbano que possuem impacto no consumo referente à carga térmica são as alterações

climáticas que provocam o efeito ilha de calor urbano e as alterações do padrão da radiação solar resultante da geometria do entorno, seguidos pelo impacto da alteração do aproveitamento da iluminação natural na carga térmica.

Ao incorporar as modificações proporcionadas pelo contexto urbano na simulação energética, novas estratégias mais adequadas à realidade do local onde este se insere podem ser propostas visando aumentar a eficiência energética do ambiente construído.

O adensamento, entretanto, promove modificações complexas e conflitantes na carga térmica das edificações dependendo da necessidade de carga (resfriamento ou aquecimento) referente a cada clima, uma vez que (i) o efeito ilha de calor urbano pode aumentar ou reduzir a demanda de energia, uma vez que reduz a carga de aquecimento e aumenta a carga de resfriamento, (ii) a redução da radiação incidente pode aumentar a carga para aquecimento ou reduzir a carga para resfriamento e (iii) o crescimento da necessidade de utilização de iluminação natural pode aumentar a carga para resfriamento ou reduzir a carga para aquecimento. Logo, cada contexto climático deve ser analisado com cautela. Também por esta razão os projetos devem apresentar soluções mais holísticas direcionadas para o local onde o edifício será implantado, observando seu impacto nos ambientes internos e nas edificações de entorno.

O principal problema relacionado a simulações de edificações em contextos urbanos consiste na falta de ferramentas que prevejam adequadamente, de forma acoplada, as diferentes modificações proporcionadas por esse nas simulações termo-energéticas anuais dos edifícios. A revisão demonstrou que ou as pesquisas analisam de forma detalhada o impacto da forma urbana no microclima do local e alcançam uma análise energética de períodos parciais do ano (dias), a partir, por exemplo, do acoplamento do *software* Envi-MET com o EnergyPlus ou de CFD com EnergyPlus, ou analisam de forma simplificada o impacto da forma urbana no microclima do local e alcançam uma análise energética anual, a partir, por exemplo, do acoplamento do *software* UWG com o EnergyPlus. Entendendo que uma análise anual é imprescindível quando se trata de simulações termo-energéticas, o presente estudo adotou a segunda forma de simulação apresentada.

É importante ressaltar que nas pesquisas analisadas as principais limitações são referentes a três aspectos: dificuldade em dimensionar a modificação da ventilação natural em ambientes urbanos uma vez que os *softwares* CFD demandam elevado tempo de simulação, dificuldade de contabilizar a radiação de onda longa referente ao entorno nas

simulações termo-energéticas uma vez que os *softwares* como o EnergyPlus até o momento das pesquisas não contabilizava a radiação de onda longa dos elementos de sombreamento do entorno e por fim, dificuldade de prever o comportamento dos usuários nas edificações.

Ainda na revisão foi possível observar que as pesquisas existentes que acoplam tanto as modificações climáticas quanto as modificações da geometria proporcionadas pelo contexto urbano nas simulações estão concentradas em cidades de clima temperado e mediterrâneo com uso residencial ou misto. Essas indicaram um aumento do consumo com o adensamento urbano. Para preencher a lacuna climática, o presente estudo foi realizado no contexto climático de Maceió, uma cidade de clima tropical quente e úmido localizada no Estado de Alagoas, nordeste do Brasil.

Dessa forma, esta pesquisa visou analisar a influência das características do entorno urbano na carga térmica de edificações de escritórios localizadas em uma cidade de clima quente e úmido a partir de simulações computacionais termo-energéticas com o *software* EnergyPlus. Simulações computacionais de modificação de arquivos climáticos com o *software* UWG e de aproveitamento da iluminação natural com o *software* DaySim serão realizadas de forma a subsidiar informações para as simulações termo-energéticas.

### 3 PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS

Para alcançar os objetivos do estudo, os procedimentos metodológicos foram divididos em três principais etapas, correspondentes aos tópicos 3.1, 3.2 e 3.3. A primeira etapa consiste na definição dos parâmetros do modelo referentes às características do edifício de análise e do entorno, resultando na definição dos cenários a serem analisados, e na apresentação das variáveis ambientais do contexto climático da pesquisa. A segunda etapa é referente às simulações computacionais. O desempenho termo-energético das edificações de análise foi obtido a partir do *software* EnergyPlus. Estas simulações foram realizadas com o arquivo climático medido em campo aberto EPW INMET 2016 ou, quando havia entorno urbano no cenário, foi utilizado o arquivo climático EPW modificado a partir de simulações com o *software* UWG. Observando que o cálculo de iluminação natural do EnergyPlus é considerado subestimado, foi utilizado de forma acoplada a esse o *software* DaySim para avaliar o impacto da inserção do entorno na carga térmica de edificações que utilizam a iluminação artificial e natural em conjunto. Por fim, no tópico de tratamento de dados são apresentados quais os tipos de resultados foram utilizados para compor a análise final.

#### 3.1 DEFINIÇÃO DOS PARÂMETROS DO MODELO

Os cenários são compostos por uma edificação de análise, que possui as características do envelope constantes, e por um tipo de entorno, modelado como elemento de sombreamento. Para a definição das suas características foi adotado um desenho arquitetônico (altura e dimensões máximas) de acordo com os parâmetros estipulados pelo código de urbanismo e edificações (MACEIÓ, 2007) e um parcelamento do solo com dimensões de vias e lotes corriqueiros em uma porção verticalizada da cidade.

Entre os bairros da cidade de Maceió destaca-se a Jatiúca e a Ponta Verde como áreas de maior verticalização nos dias atuais e ainda com significativo potencial de verticalização. Considerando que ambos os bairros estão inseridos dentro da mesma zona (ZR-4) de acordo com o zoneamento urbano da cidade (MACEIÓ, 2007), seus parâmetros urbanísticos foram utilizados como base para a definição dos cenários de análise.

Porém, o código de urbanismo e edificações vigente hoje na cidade de Maceió, até o ano de 2015, restringia o adensamento a partir

da verticalização ao Cone do Farol da Marinha (farol que servia como orientação para marinheiros), localizado na porção de planalto da cidade. Esse determinava uma altura máxima permitida para as edificações de alguns bairros litorâneos, inferior à altura máxima permitida para a zona ZR-4 pelos parâmetros urbanísticos do código. Em 2015, com a construção de um novo farol no porto da cidade, o artigo 29-I (verticalização restrita ao Cone do Farol da Marinha na ZR-4) passou a ser desconsiderado do código de urbanismo e edificações e os bairros litorâneos passaram a obedecer apenas às limitações impostas por sua referente zona.

Considerando que nas áreas dos bairros analisados, nos quais a verticalização já é mais consolidada, os parâmetros urbanísticos atendam a limitação de altura do artigo 29-I e que nas áreas onde a verticalização ainda está se iniciando os parâmetros urbanísticos atendam apenas à limitação da ZR-4 (sem restrição ao cone do farol), foi proposto para o presente estudo duas tipologias de cenário: a tipo 1, no qual a edificação de análise possui 9 pavimentos (média de pavimentos das quadras dos bairros analisados), e a 2, em que o edifício de análise possui 15 pavimentos (máximo permitido de acordo com a ZR-4).

Na Tabela 1 a seguir é possível observar os parâmetros urbanísticos dos bairros da Jatiúca e Ponta Verde considerando a altura máxima permitida até 2015 (Tipo 1), e após esse ano (Tipo 2). A modificação principal é em relação à altura total permitida, que resulta na alteração dos afastamentos mínimos exigidos em cada tipo, que é crescente com o aumento da quantidade de pavimentos, assim como na alteração da taxa de ocupação do terreno máxima, que diminui de acordo com o aumento do número de pavimentos.

Tabela 1: Parâmetros urbanísticos para parte dos bairros litorâneos de Maceió considerando a limitação do cone do farol (tipo1) e sem considera-la (tipo 2)

<b>Parâmetros Urbanísticos</b>	<b>Tipo 1</b>	<b>Tipo 2</b>
Altura Máxima	9 pavimentos	15 pavimentos
Taxa de ocupação do terreno máxima	50%	35%
Recuo mínimo frontal $\left(3 + \frac{n-2}{2}\right)_*$	6,5m	9,5m
Recuo mínimo lateral/fundo $\left(1,5 + \frac{n-2}{2}\right)_*$	5m	8m
Coefficiente de aproveitamento do terreno máximo	4	4

\*n = número de pavimentos

Fonte: Código de urbanismo e edificações (MACEIÓ, 2007)

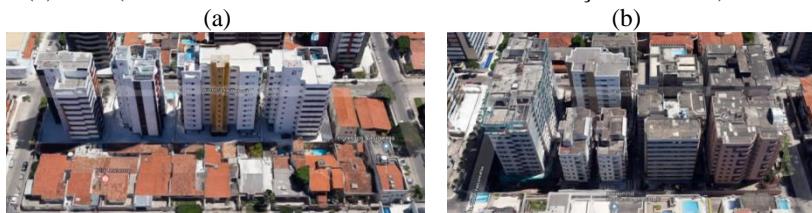
A seguir são apresentadas imagens de cobertura e perspectivas dos bairros da Jatiúca e Ponta Verde no ano de 2017. É possível observar na Figura 23 o traçado predominantemente retilíneo, com quadras retangulares no sentido Leste-Oeste compostas por 8 ou 10 lotes (considerando a dimensão dos lotes de edificações verticais) e em sua maioria quadrados, com 30m em média de comprimento. Observa-se na Figura 24 que nas áreas onde a verticalização já está consolidada, as edificações seguem o padrão proposto no presente estudo pelo tipo 1, com prédios de até 9 pavimentos e com alta taxa de ocupação nos terrenos. Nos bairros analisados ainda são verificadas poucas de edificações que atinjam alturas elevadas, não existindo, até o momento, o padrão urbano proposto pelo tipo 2.

Figura 23: Imagem da cobertura de quadra dos bairros analisados com 10 lotes por quadra (a) e com 8 lotes por quadra (b)



Fonte: Google Earth (Acesso em dezembro de 2017).

Figura 24: Imagem de perspectiva de quadra dos bairros analisados com 10 (a) e 8 (b) lotes (considerando a dimensão dos lotes de edificações verticais)



Fonte: Google Earth (Acesso em dezembro de 2017).

A seguir são apresentadas algumas imagens de tipologias de fachadas de edificações residenciais (Figura 25) e de edificações comerciais (Figura 26) encontradas nesta área verticalizada da cidade. É possível observar nas imagens a grande variação em relação à refletância dada pelas cores das fachadas e quantidade de área envidraçada.

Figura 25: Imagens de fachadas de edifícios residenciais em Maceió



Fonte: Autora (2018).

Figura 26: Imagens de fachadas de edifícios de comércio/serviços em Maceió



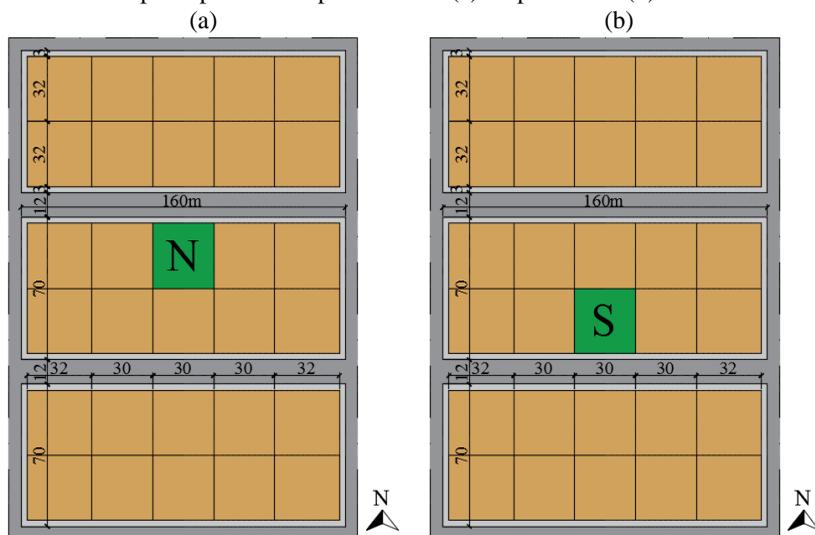
Fonte: Google Maps (Acesso em março de 2018).

A partir das dimensões padrões dos lotes e quadras apresentados e da altura máxima de pavimentos para ambos os tipos de edificações (1 e 2), foi definido o desenho urbano e a localização das edificações de análise e das edificações de entorno (Figura 27).

As edificações de análise foram localizadas nos lotes centrais de uma quadra com 10 lotes (5 lotes Leste-Oeste por 2 lotes Norte-Sul). Considerando que existe um lote central com fachada principal voltada para o Norte e outro com fachada principal voltada para o Sul, e que a diferença na insolação provavelmente resultaria em cargas distintas para as duas diferentes orientações, optou-se por realizar a análise em ambos os lotes, para ambas os tipos de edificações adotados. A letra N corresponde às análises com a fachada principal voltada para o Norte (Figura 27 - a) e a letra S com a fachada principal voltada para o Sul (Figura 27 - b).

É importante ressaltar ainda que, para que o entorno urbano fosse levado em conta de maneira satisfatória, a análise foi realizada considerando a modelagem de 3 quadras, sendo que a edificação de análise está localizada sempre na quadra central.

Figura 27: Desenho urbano da área de estudo e localização do lote de análise com fachada principal voltada para o Norte (a) ou para o Sul (b)



Legenda:

■ Rua

■ Calçada

■ Lote entorno

■ Lote edificação de análise

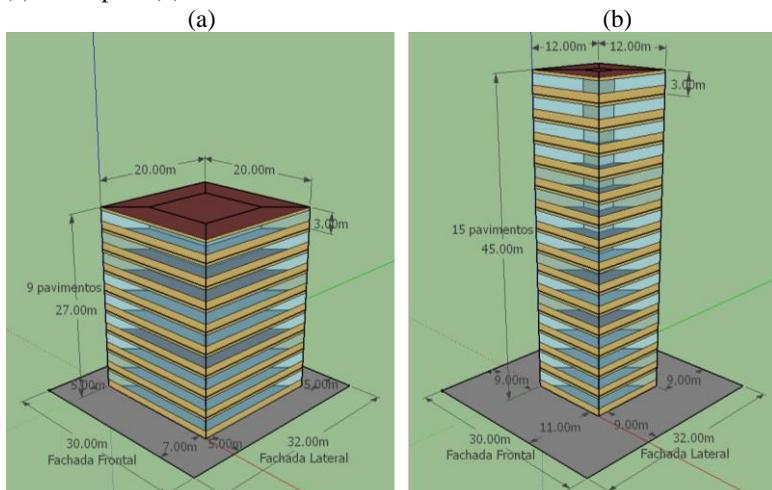
Fonte: Autora (2018).

### 3.1.1 Edificação de análise

As edificações de análise possuem tipologia comercial com uso direcionado para escritórios e serviram como base para a análise do presente estudo. As suas características se mantiveram sempre iguais nas simulações (exceto pelas dimensões, considerando o tipo 1 e tipo 2), pois as modificações paramétricas foram realizadas apenas nos edifícios do entorno, buscando entender a sua influência na edificação de análise.

O número de pavimentos adotado foi o máximo permitido para ambas as tipologias arquitetônicas e as demais dimensões foram definidas de acordo com esse valor e a dimensão dos lotes já proposta, seguindo os parâmetros do código de obras e edificações da cidade. Dessa forma, as edificações de análise dos cenários do Tipo 1 possuem 9 pavimentos, dimensões de 20x20m (máxima permitida de acordo com os afastamentos mínimos), taxa de ocupação no terreno de 42% e coeficiente de aproveitamento de 3,75 (Figura 28 – a). Já no tipo 2 as edificações possuem 15 pavimentos, dimensões de 12x12m, taxa de ocupação no terreno de 15% e coeficiente de aproveitamento de 2,25 (Figura 28 – b). No Tipo 2 a dimensão máxima permitida a partir dos afastamento mínimos seria de 14x14m, porém optou-se por manter em ambas as tipologias a mesma área superficial de paredes (2160m<sup>2</sup>), visando tornar a comparação entre os resultados mais coerente.

Figura 28: Dimensões das edificações de análise e afastamentos no lote do tipo 1 (a) e do tipo 2 (b)

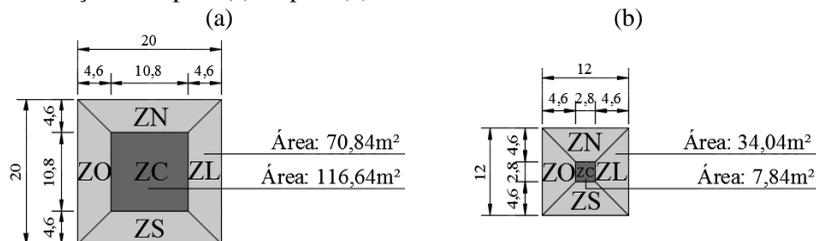


Fonte: Autora (2018).

Em ambas as tipologias a altura de cada pavimento é de 3m e a porcentagem de área envidraçada de 50% da fachada, resultando em janelas que percorrem todo o perímetro das fachadas com 1,5m de altura em cada pavimento. Para as faces externas foi adotada refletância de 50% para as paredes, 20% para o piso e de 30% para a cobertura. Nos ambientes internos adotou-se refletância de 80% para paredes, 30% para o piso e de 80% para o teto.

Na modelagem cada pavimento do edifício foi dividido em cinco diferentes zonas térmicas, como indicado pela ASHRAE (2004), permitindo uma análise mais detalhada dos resultados, já que as quatro zonas perimetrais são as mais sensíveis ao clima externo, possibilitando observar a influência do contexto urbano nas quatro principais orientações separadamente. No tipo 1 as zonas perimetrais representam 70% da área da edificação (Figura 29 - a), enquanto no tipo 2 as zonas perimetrais representam 95% do total (Figura 29 - b).

Figura 29: Plantas esquemáticas das zonas térmicas de cada pavimento das edificações de tipo 1 (a) e tipo 2 (b)



Fonte: ASHRAE 90.1 (2004)

A partir do estudo de duas tipologias de edificação de análise foi possível observar o impacto das características do entorno em uma edificação vertical com menor altura, maior ocupação e menores afastamentos e em uma edificação vertical de maior altura, menor ocupação no terreno e maiores afastamentos.

Os elementos construtivos que compõem as paredes, piso, laje intermediária, cobertura e aberturas, assim como suas propriedades térmicas estão expostos no Quadro 2 a seguir e seus valores foram obtidos em Weber et al. (2017). A escolha dos materiais foi baseada em parte na tabela de referência para edificações de escritórios da nova proposta de métodos para avaliação da eficiência energética de edificações comerciais (CB3E, 2017).

Quadro 2: Propriedades dos elementos construtivos adotados

Tipologia	Elemento construtivo	Condutividade térmica (W/m K)	Densidade de massa aparente (kg/m <sup>3</sup> )	Calor Específico (J/kg K)	Transmitância térmica total (W/m <sup>2</sup> K)
Parede de tijolo cerâmico 6 furos	Argamassa interna (2,5cm)	1,15	2000	1000	2,39
	Cerâmica (1,34cm)	0,9	1600	920	
	Câmara de ar (6,32cm)	0,361	Resistência t. (m <sup>2</sup> -K/W) = 0,175	1000	
	Cerâmica (1,34cm)	0,9	1600	920	
Piso térreo	Argamassa externa (2,5cm)	1,15	2000	1000	3,44
	Concreto (9,85cm)	1,75	2200	1000	
	Contra piso (2,0cm)	1,15	2000	1000	
	Piso Cerâmico (0,75cm)	1,05	2000	920	
Piso/Laje intermediária nervurada com câmara de ar	Gesso (1,0cm)	0,35	900	870	2,35
	Câmara de ar (6,32cm)	1,19	Resistência t. (m <sup>2</sup> -K/W) = 0,1063	1000	
	Concreto (9,85cm)	1,75	2200	1000	
	Contra piso (2,0cm)	1,15	2000	1000	
Cobertura de telha de fibrocimento	Piso Cerâmico (0,75cm)	1,05	2000	920	2,06
	Telha fibrocimento (0,8cm)	0,95	1900	840	
	Câmara de ar (25cm)	1,19	Resistência t. (m <sup>2</sup> -K/W) = 0,21	1000	
	Laje de concreto (10cm)	1,75	2200	1000	
Tipologia	Elemento construtivo	Condutividade térmica (W/m K)	Transmissão luminosa	Fator Solar	Transmitância térmica total (W/m <sup>2</sup> K)
Aberturas	Vidro Parsol Grey (0,6cm)	1,0	0,43	0,6	5,79 (W/m <sup>2</sup> )

Fonte: Weber et al. (2017).

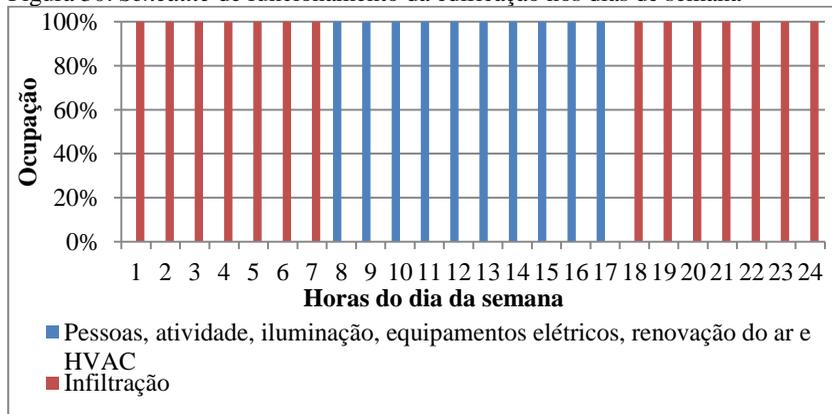
Por tratar-se de uma edificação de comércio/serviços um importante fator a ser levado em conta para se avaliar seu desempenho energético são os valores de ganhos internos relacionados às pessoas, atividade realizada, iluminação artificial e equipamentos elétricos, além da taxa de infiltração e renovação do ar do sistema de condicionamento de ar condicionado. As cargas resultantes do funcionamento do edifício são apresentadas no Quadro 3 e na Figura 30 são apresentadas as *schedules* de funcionamento para cada uma delas. Foi definido a utilização do edifício com 100% de ocupação de segunda a sexta-feira das 8h às 18h e de 0% de ocupação nos finais de semana.

Quadro 3: Parâmetros do modelo para as simulações computacionais

Parâmetros do modelo		Fonte	
Ganhos Internos	Pessoas	9 m <sup>2</sup> /pessoa	NBR 16401 (ABNT, 2008)
	Atividade	70 W/m <sup>2</sup>	ASH 55 (ASHRAE, 2013)
	Iluminação Artificial	8,6 W/m <sup>2</sup>	Title 24 (CEC, 2016) / (CB3E, 2017)
	Equipamentos elétricos	16,2 W/m <sup>2</sup>	NBR 16401 (ABNT, 2008)
Trocas de ar	Infiltração	0,5 trocas/hora	-
	Renovação do ar	0,0075 m <sup>3</sup> /s por pessoa	ANVISA (2003)
HVAC	<i>Ideal load</i>	<i>Set point</i> - 18°C à 24°C	CB3E (2017)

Fonte: Indicadas na tabela.

Figura 30: *Schedule* de funcionamento da edificação nos dias de semana



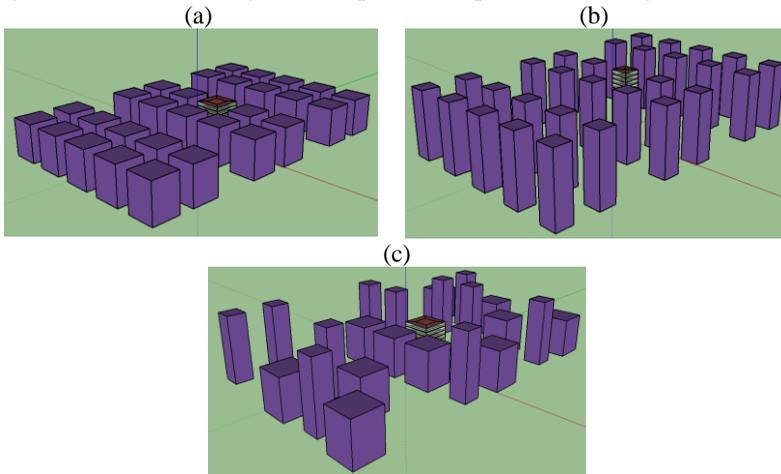
Fonte: Elaborado com base no CB3E (2017).

### 3.1.2 Entorno

A partir da definição das características das edificações de análise das tipologias 1 e 2 e de sua localização nos lotes N ou S, foram definidos os entornos em que estas edificações seriam simuladas. Foram definidos três tipologias de entorno: I, II e III.

O entorno I é caracterizado pela ausência de edificações do entorno urbano. No entorno II todas as edificações do entorno urbano possuem as mesmas dimensões da edificação de análise, caracterizando um entorno homogêneo (Figura 31 – a e b). Já no entorno III, caracterizado como heterogêneo, o entorno urbano possui edificações de dimensões do tipo 1 e 2, além de lotes desocupados (Figura 31 – c), apresentado em detalhes no APÊNDICE A. Dessa forma, os cenários com entorno II e III podem ser considerados cenários urbanos.

Figura 31: Entorno homogêneo do tipo 1 (a) e tipo 2 (b) e heterogêneo



É importante ressaltar que as edificações de entorno foram modeladas como elementos de sombreamento, considerando-se valores de refletância da área opaca, porcentagem de área envidraçada e tipo de vidro de acordo com características dos cenários apresentados a seguir.

### 3.1.3 Cenários de análise

Os cenários de análise são o resultado da combinação entre os tipos da edificação de análise (tipo 1 e 2) e os tipos de entorno (I, II e

III). É importante ressaltar ainda que nos cenários urbanos com entorno homogêneo (II) e heterogêneo (III) as simulações foram realizadas para os lotes de análise N e S, totalizando 10 cenários, apresentados no Quadro 4 referente à tipologia 1 e no Quadro 5 referente à tipologia 2.

Quadro 4: Cenários para simulação computacional referentes à tipologia 1

Nomenclatura	Edificação de análise	Lote de análise	Entorno urbano	Planta Baixa
<b>T1 I</b>	Tipo 1 (edificação 20x20m e 9 pavimentos)	-	I (Sem entorno)	
<b>T1 N II-50RM</b>	Tipo 1 (edificação 20x20m e 9 pavimentos)	N (Norte como fachada principal)	II (Entorno Homogêneo)	
<b>T1 S II-50RM</b>	Tipo 1 (edificação 20x20m e 9 pavimentos)	S (Sul como fachada principal)	II (Entorno Homogêneo)	
<b>T1 N III</b>	Tipo 1 (edificação 20x20m e 9 pavimentos)	N (Norte como fachada principal)	III (Entorno Heterogêneo)	
<b>T1 S III</b>	Tipo 1 (edificação 20x20m e 9 pavimentos)	S (Sul como fachada principal)	III (Entorno Heterogêneo)	

Quadro 5: Cenários para simulação computacional referentes à tipologia 2

Nomenclatura	Edificação de análise	Lote de análise	Entorno urbano	Planta Baixa
<b>T2 I</b>	Tipo 2 (edificação 12x12m e 15 pavimentos)	-	I (Sem entorno)	
<b>T2 N II-50RM</b>	Tipo 2 (edificação 12x12m e 15 pavimentos)	N (Norte como fachada principal)	II (Entorno Homogêneo)	
<b>T2 S II-50RM</b>	Tipo 2 (edificação 12x12m e 15 pavimentos)	S (Sul como fachada principal)	II (Entorno Homogêneo)	
<b>T2 N III</b>	Tipo 2 (edificação 12x12m e 15 pavimentos)	N (Norte como fachada principal)	III (Entorno Heterogêneo)	
<b>T2 S III</b>	Tipo 2 (edificação 12x12m e 15 pavimentos)	S (Sul como fachada principal)	III (Entorno Heterogêneo)	

Fonte: Autora (2018).

Nos cenários I (sem entorno) a edificação de análise possui grande influência das radiações direta e difusa, pois não possui nenhum tipo de obstrução no seu entorno, além de possuir também a influência

da radiação refletida pelo solo. O arquivo climático utilizado nas simulações desse cenário foi o EPW INMET 2016. Dessa forma, esse cenário representa as simulações termo-energéticas como comumente são realizadas, ou seja, sem levar em conta o entorno urbano tanto em relação e sua geometria quanto em relação às modificações climáticas.

Para os cenários II e III (homogêneo e heterogêneo) foram realizadas as modificações do arquivo climático EPW INMET 2016 de acordo com o contexto urbano de cada cenário, resultando em três novos arquivos climáticos para a cidade de Maceió, denominados UWG 1, UWG 2 e UWG 3, referentes aos cenários T1 N/S II, T2 N/S II e T1/2 N/S III, respectivamente.

Os cenários II e III (urbanos) representam o tipo de simulação proposto no presente estudo como mais adequado para simulações termo-energéticas de edificações dentro de contextos urbanos, pois abrangem as modificações climáticas, obtidas a partir das modificações dos arquivos climáticos, e as modificações no padrão da radiação solar, resultantes da inserção da geometria das edificações do entorno urbano.

O homogêneo (II) representa uma situação extrema em que todos os lotes estão ocupados com edificações de iguais dimensões à edificação de análise. A partir dele foram realizadas as modificações paramétricas no envelope apenas das edificações de entorno, para observar a influência da refletância e sombreamento na carga térmica. As modificações paramétricas dizem respeito a três características: refletância dos elementos opacos, refletância dos vidros e porcentagem de área envidraçada. No entanto, as refletâncias dos elementos opacos e translúcidos variam entre baixa, média e alta de maneira correlacionada, enquanto a porcentagem de área envidraçada varia entre 20%, 50% e 80%, resultando em 9 possibilidades de cenários para os quatro cenários homogêneos. As 9 combinações possíveis para os cenários T1 N II, T1 S II, T2 N II e T2 S II são apresentadas no Quadro 6.

Já a variação da taxa de refletância das superfícies verticais foram classificadas de acordo com o intervalo apresentado a seguir: refletância baixa ( $<0,3$ ), média ( $0,3-0,6$ ) e alta ( $>0,60$ ). Para representar os três tipos de refletância desejada foram selecionadas para corresponder às pinturas das fachadas das edificações de entorno as cores: cinza (referência 22), terra (referência 55) e branco (referência 38) com refletância de 0,13, 0,45 e 0,73, respectivamente (BRASIL, 2016). Os vidros adotados também seguiram a variação da refletância de acordo com os intervalos apresentados, visando a redução do número de variáveis da simulação computacional. Os vidros Parsol Grey 6mm monolítico (BRASIL, 2016), SNL 37 clear 8mm laminado (BRASIL,

2016) e SGG COOL-LITE XTREME 6mm duplo (SAINT-GOBAIN, 2017) de refletância 0,053, 0,4 e 0,62, respectivamente, foram selecionados para representar a refletância baixa, média e alta.

Já a necessidade de variação da porcentagem de área envidraçada, de 20%, 60% e 80%, surgiu em razão da reflexão proporcionada por estes elementos verticais se comportarem de maneira distinta a depender do tipo da superfície, sendo considerada difusa quando provenientes de paredes e direta quando provenientes de vidros no *software* EnergyPlus.

Quadro 6: Variação paramétrica das características do envelope das edificações de entorno dos cenários homogêneos

Nomenclatura	% de área envidraçada	Refletância parede	Refletância vidro	Fachada por pavimento
<b>20RB</b>	20%	Baixa (0,13)	Baixa (0,053)	
<b>20RM</b>	20%	Média (0,45)	Média (0,4)	
<b>20RA</b>	20%	Alta (0,73)	Alta (0,62)	
<b>50RB</b>	50%	Baixa (0,13)	Baixa (0,053)	
<b>50RM</b>	50%	Média (0,45)	Média (0,4)	
<b>50RA</b>	50%	Alta (0,73)	Alta (0,62)	
<b>80RB</b>	80%	Baixa (0,13)	Baixa (0,053)	
<b>80RM</b>	80%	Média (0,45)	Média (0,4)	
<b>80RA</b>	80%	Alta (0,73)	Alta (0,62)	

Fonte: Autora (2018).

A partir das variações relativas à refletância dos elementos verticais e de sua porcentagem de área envidraçada espera-se possibilitar a análise da influência da radiação solar refletida de elementos verticais dentro do contexto urbano no desempenho energético das edificações. A análise da influência do sombreamento pode ser observada a partir da comparação entre as diferentes tipologias de entorno propostas.

Já o cenário III (heterogêneo) representa uma situação de transição entre os cenários sem entorno e com entorno homogêneo, resultando em um desenho urbano mais provável no contexto atual, no qual as tipologias das edificações de entorno foram implantadas de maneira aleatória, assim como as refletâncias (baixa, média ou alta) e áreas envidraçadas (20%, 50% e 80%) referentes a cada fachada. A aleatoriedade das edificações em cada lote (detalhada no APÊNDICE A) foi definida através de sorteio no *software* Excel, enquanto a definição aleatória da refletância e porcentagem de área envidraçada de cada fachada foi obtido a partir do *software* EPlusPlus que permite uma simulação randômica de acordo com parâmetros pré-estabelecidos.

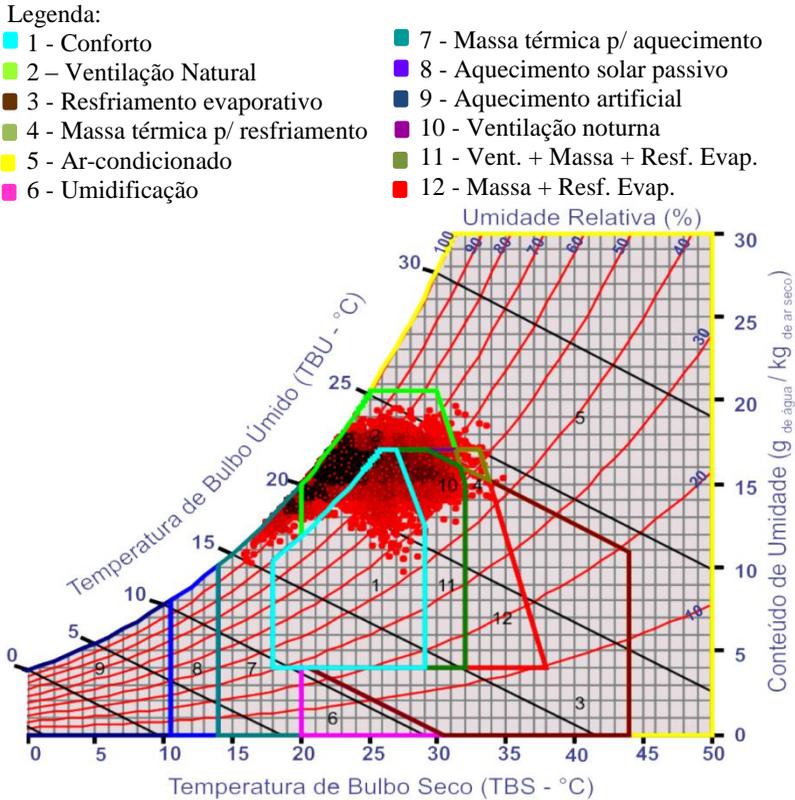
Dessa forma, ficaram definidos 10 cenários iniciais de simulação, apresentados no Quadro 4 e Quadro 5, e em relação aos cenários T1 N II, T1 S II, T2 N II e T2 S II existe ainda uma combinação de variáveis referente ao envelope do entorno urbano que geram 9 cenários para cada cenário homogêneo (Quadro 6), resultando no total de 42 cenários.

### 3.1.4 Contexto climático

A cidade de Maceió, com latitude de  $-9^{\circ}67'$  e longitude de  $-35^{\circ}74'$ , localiza-se na região Nordeste do Brasil e é a capital do estado de Alagoas. Seu clima, segundo classificação de Koppen, é classificado como tropical quente e úmido do tipo  $As^{\circ}$ , ou seja, possui apenas duas estações bem definidas, sendo o verão mais seco e inverno chuvoso. No zoneamento bioclimático brasileiro está inserida na ZB-8, que apresenta a ventilação natural e o sombreamento como principais estratégias construtivas (ABNT, 2003).

A carta bioclimática, apresentada em Lamberts, Dutra e Pereira (2014), indica que em apenas 17% das horas do ano existe conforto e que grande parte do desconforto (76%) é causado por calor, em razão das altas temperaturas e umidades do ar. Mais uma vez, a ventilação natural é destacada como importante estratégia de projeto, indicada para 60% das horas do ano.

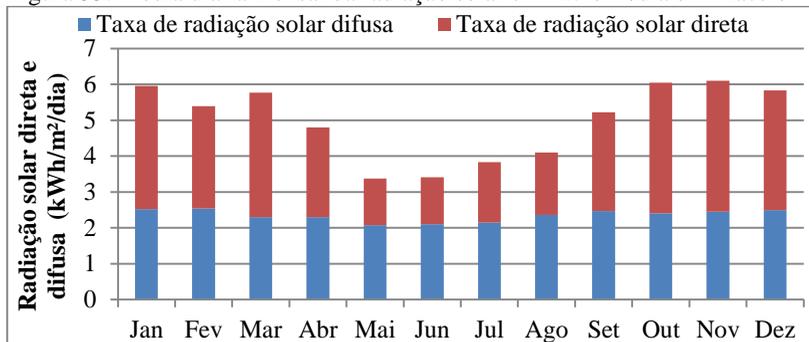
Figura 32: Carta bioclimática da cidade de Maceió



Fonte: Lamberts, Dutra e Pereira (2014)

Devido à baixa latitude da cidade a radiação solar total (direta e difusa) é intensa ao longo de todo o ano com média mínima de 3,3 kWh/m<sup>2</sup> ao dia em maio e máxima de 6,1 kWh/m<sup>2</sup> ao dia em novembro. Na Figura 33 é possível observar ainda que a radiação solar difusa se mantém entre 2 e 2,5 kWh/m<sup>2</sup> ao dia ao longo de todo o ano, enquanto a radiação solar direta é responsável pela variação da intensidade de radiação total de 2,3 kWh/m<sup>2</sup>/dia ao longo do ano. A alta radiação solar confirma a necessidade de sombreamento, principalmente entre setembro e abril, que são os meses que apresentam maiores valores e a radiação direta é mais significativa que a difusa, enquanto entre maio e agosto a porcentagem de radiação difusa torna-se mais alta que a direta.

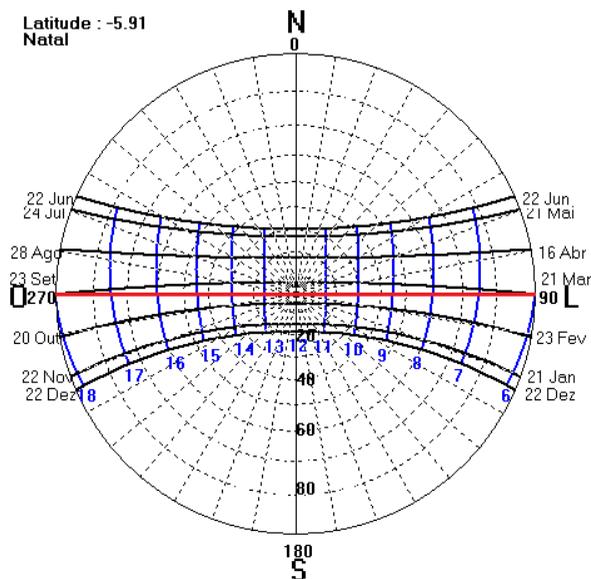
Figura 33: Média diária mensal da radiação solar em kWh/m<sup>2</sup>/dia em Maceió



Fonte: Arquivo climático EPW INMET 2016.

Ainda devido a sua proximidade com a linha do equador a quantidade de horas de sol mantém-se praticamente constante ao longo do ano entre às 6h e 18h e a trajetória solar indica uma exposição à radiação direta por uma quantidade de horas de sol próximas entre a fachada Norte e a Sul, sendo a Norte a mais exposta recebendo radiação direta em 60% das horas de sol ao longo do ano (Figura 34).

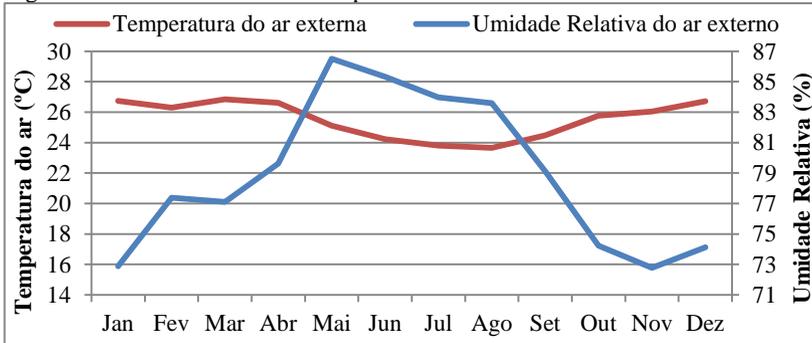
Figura 34: Carta solar de Maceió



Fonte: Software SOL-AR.

A temperatura média anual é de 25,5°C, com mínima média mensal de 23,6°C em agosto e máxima média mensal de 26,8° C em março. A Figura 35 (eixo 1) demonstra as médias mensais de temperatura ao longo do ano, indicando uma baixa amplitude térmica anual de 3,2°C. Já a umidade relativa média anual é de 78,8% e mantém-se alta ao longo do ano, com mínima média de 72,7% em novembro e máxima média de 86,5% em maio (Figura 35 – eixo 2).

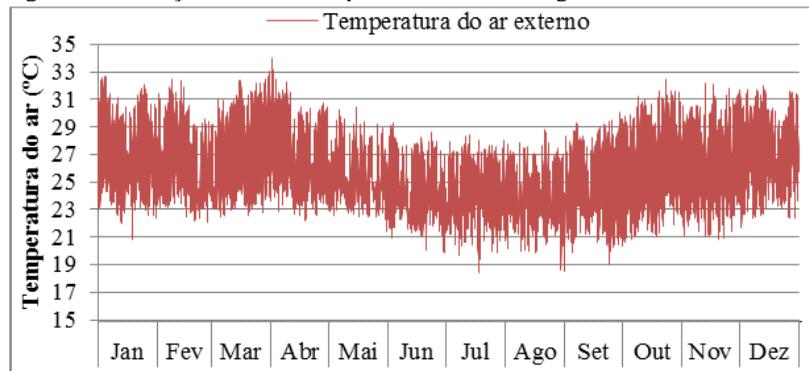
Figura 35: Médias mensais de temperatura e umidade do ar no ano em Maceió



Fonte: Arquivo climático EPW INMET 2016.

A baixa amplitude térmica anual e baixa variação de umidade relativa são acompanhadas por uma baixa amplitude térmica diária de em média 6,9°C. Na Figura 36 é possível observar que durante grande parte do ano as temperaturas concentram-se entre 22,0°C e 30,0°C, com máxima de 34,0°C em abril e mínima de 18,4°C em julho.

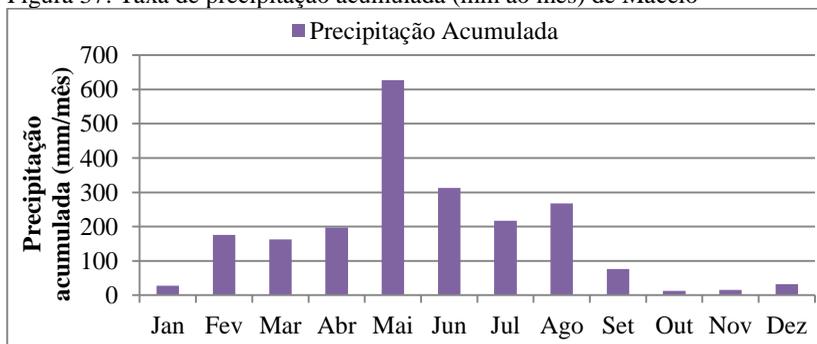
Figura 36: Variação diária de temperatura do ar ao longo do ano em Maceió



Fonte: Arquivo climático EPW INMET 2016

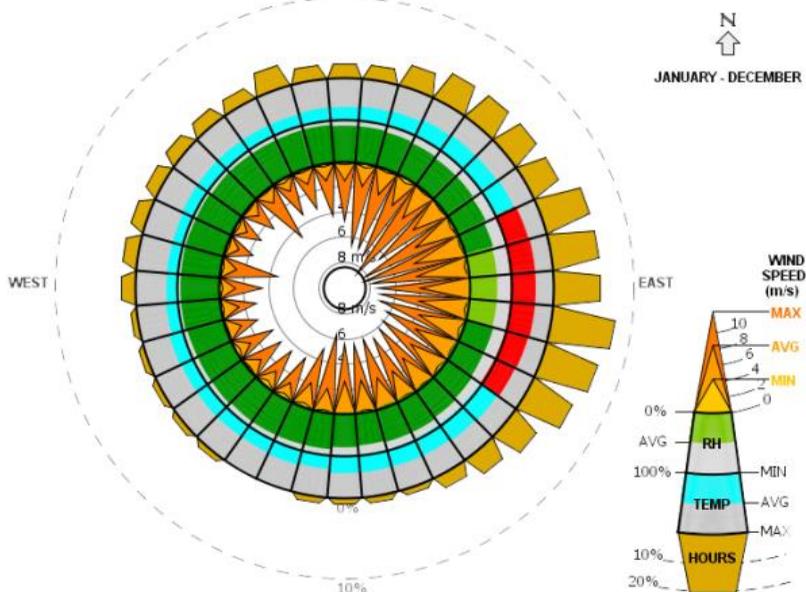
A taxa de precipitação acumulada demonstra que os meses menos chuvosos (precipitação abaixo de 100mm ao mês) são entre Setembro e Janeiro. De fevereiro a agosto os valores mantêm-se entre 150mm e 300mm, com exceção de maio, que apresentou valor discrepante de 626mm ao mês, o dobro do segundo mês com maior precipitação.

Figura 37: Taxa de precipitação acumulada (mm ao mês) de Maceió



Fonte: Arquivo climático EPW INMET 2016.

Figura 38: Diagrama de velocidade, umidade, temperatura e frequência de ocorrência de ventos em Maceió elaborado no *software Climate Consultant*



Fonte: Arquivo climático EPW INMET 2016

Em relação aos ventos observa-se que as maiores velocidades médias, que atingem entre 2,0 e 4,0m/s, localizam-se no quadrante leste (nordeste, leste e sudeste) e sul. A velocidade máxima alcançada de 8,0m/s advém da orientação nordeste. As principais ocorrências são observadas também no quadrante leste, porém é nesta direção que as temperaturas encontram-se mais altas ao longo do ano, acima de 27°C, o que deve ser tratado com precaução diante da necessidade de ventilação durante todo o ano (Figura 38).

## 3.2 SIMULAÇÕES COMPUTACIONAIS

### 3.2.1 Simulação termo-energética – EnergyPlus

Desenvolvido para o Escritório de Tecnologia das Edificações (BTO) do Departamento Americano de Energia (DOE) o EnergyPlus é um programa de livre acesso, amplamente utilizado para prever consumo de energia (para aquecimento, resfriamento, ventilação, iluminação e outras cargas) e uso de água em edificações (DOE, 2017).

Para a simulação na versão 8.6 o programa requer a construção de um arquivo IDF, formado por um conjunto de informações sobre o modelo que será analisado e dos dados de saída desejados, além de um arquivo climático em formato EPW. Para o presente estudo foram utilizados o arquivo climático EPW INMET 2016, medido em campo aberto, para os cenários sem entorno (I) e os 3 arquivos climáticos simulados pelo UWG de acordo com os 3 cenários urbanos propostos (T1 N/S II, T2 N/S II e T1/2 N/S III), com finalidade de levar em conta na análise energética o efeito do fenômeno ilha de calor urbano.

O arquivo climático EPW INMET 2016 está disponível para *download* no site do Laboratório de Eficiência Energética da UFSC é resultado das correções realizadas nos arquivos climáticos INMET 2012. Os 411 arquivos climáticos EPW INMET 2012 existentes para as cidades brasileiras foram elaborados pelo Prof. Maurício Roriz, com base em estações meteorológicas automáticas do INMET entre os anos de 2000 e 2010 (RORIZ, 2012).

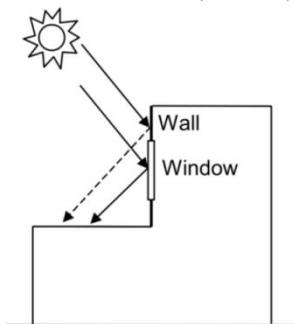
Em relação ao conjunto de informações sobre o modelo foram utilizados na simulação os dados já apresentados no tópico 3.1 (Definição dos parâmetros do modelo) em relação à edificação de análise (tópico 3.1.1) e em relação ao entorno (tópico 3.1.2), de acordo com os cenários apresentados no tópico 3.1.3, presentes no Quadro 4, Quadro 5 e Quadro 6.

A geometria foi elaborada com o auxílio do *plug-in OpenStudio* para o *software Sketchup*, sendo que edificações de entorno foram modeladas apenas como elementos de sombreamento. A inserção das características referentes a estes elementos de sombreamento (entorno urbano) foram realizadas na classe *Shading Property: Reflectance*. Os objetos requeridos nessa classe são: nome da superfície de sombreamento, refletância solar difusa das áreas opacas, refletância visível difusa das áreas opacas, fração de área envidraçada e nome do elemento de construção da área envidraçada.

Nas simulações atribuiu-se que o edifício do modelo estava dentro de uma cidade (*Terrain: City*), o que afeta a forma como o vento atinge o prédio. Os dados de vento disponíveis nos arquivos climáticos, na grande maioria das vezes, foram medidos em áreas rurais, ou seja, em cenários diferentes daquele onde o edifício estudado encontra-se inserido (área urbana), e por essa razão devem ser corrigidos para uma aplicação prática. Dessa forma, no EnergyPlus as velocidades de vento são corrigidas em relação à diferença de rugosidade do entorno da estação meteorológica e da edificação, que no presente estudo foi considerada dentro de um centro urbano (*City*) (VERSAGE, 2009).

Admitiu-se também uma distribuição de radiação solar completa no interior e exterior das edificações (*Solar distribution: Full Interior And Exterior With Reflections*). É importante ressaltar que o *software* considera, para o cálculo da radiação solar refletida por elementos do entorno, que as superfícies opacas do edifício refletem a radiação de forma difusa (paredes, por exemplo) e de forma especular se forem elementos translúcidos (janelas ou portas de vidro, por exemplo).

Figura 39: Reflexão solar direta refletida por um elemento opaco (*Wall*) de forma difusa e por um elemento translúcido (*Window*) de forma especular



Fonte: EnergyPlus (2015)

O contato com o solo foi modelado por diferenças finitas de acordo com o manual de simulação *Ground Domain* (MAZZAFERRO; MELO; LAMBERTS, 2015).

### 3.2.2 Simulação para modificações de arquivo climático - UWG

Desenvolvido pelo Programa de Tecnologia da Construção do MIT, o UWG é um modelo de cânion urbano que serve para fornecer valores de temperatura do ar e umidade relativa específicos para determinada geometria da cidade e uso do solo a partir de dados climáticos obtidos em estações meteorológicas rurais de referência, localizadas de forma geral em campo aberto (NAKANO et al., 2015). O *software*, cujo funcionamento é apresentado no APÊNDICE B', trata-se de um modelo computacional que prevê as modificações da temperatura e umidade do ar no nível do cânion urbano destinado a arquitetos, planejadores e engenheiros (BUENO; NAKANO; NORFORD, 2015). Desta forma, o modelo pode constituir-se de uma interessante ferramenta para definições de zoneamento, altura das construções, tipologia de uso e densidades construídas, por exemplo.

A simulação fornece como output um arquivo climático modificado (temperatura do ar e umidade relativa) de formato EPW. Esse é gerado a partir de um arquivo climático EPW de estação meteorológica rural e de um arquivo de extensão XML (*Extensible Markup Language*) que descreve as características urbanas do local da edificação de análise e as características rurais da localização da estação meteorológica (NAKANO et al., 2015).

Este tipo de arquivo (EPW) fornecido como dado de saída pelo modelo permite a sua utilização em conjunto com *softwares* de simulação de energia complexos, possibilitando que o UWG seja utilizado também como ferramenta destinada a previsões de consumo de energia de edifícios inseridos no meio urbano. Essas previsões são mais precisas quando comparadas com aquelas que utilizam o arquivo climático de estações meteorológicas rurais, que já não refletem as condições atuais climáticas dos ambientes urbanos. Logo, o arquivo climático modificado será utilizado de forma acoplada ao EnergyPlus.

Para o presente estudo foram realizadas três simulações de arquivos climáticos de acordo com os cenários urbanos da tipologia 1 homogêneo, da tipologia 2 homogêneo e da tipologia 1/2 heterogêneo. Foi utilizado o arquivo climático EPW referente à cidade de Maceió (EPW INMET 2016). Já os arquivos de extensão XML foram elaborados de acordo com os parâmetros do modelo apresentados no

tópico 3.1. Uma tabela com todos os dados de entrada exigidos no UWG, assim como seu valor adotado na simulação e sua fonte pode ser observada no APÊNDICE C.

Nakano et al. (2015) indica que as simplificações e suposições do modelo impedem a captura de efeitos microclimáticos muito específicos do local, porém mantendo-se ainda robusto o suficiente para produzir valores coerentes de modificação de temperatura e umidade do ar que representem a ilha de calor urbano (escala mesoclimática) de acordo com as validações realizadas em quatro contextos climáticos - Toulouse/França, Basel/Suíça (BUENO et al., 2013), Singapura (BUENO et al., 2014), e Boston/EUA (NAKANO, 2015) - e diferentes contextos urbanos.

Dessa forma, foi realizado um teste no UWG para entender se as variações de refletância de áreas opacas, porcentagem de área envidraçada e tipo de vidro utilizado nas edificações de entorno seriam capturadas pelo modelo ou se seriam consideradas muito específicas, atuando apenas na escala microclimática, a ponto de não alterar significativamente os resultados, uma vez que esse atua principalmente na escala mesoclimática. Os resultados do teste, apresentados no APÊNDICE D, demonstraram uma variação muito sutil para os diferentes arquivos climáticos simulados de acordo com as variações propostas no Quadro 6.

Por esse motivo, e visando a redução do tempo despendido nas simulações, nos novos arquivos climáticos UWG 1 e UWG 2 não foram levadas em conta as variações do envelope do entorno em relação à refletância, porcentagem de área e tipo de vidro adotado. Em todos os modelos adotou-se os valores de refletância média para parede e vidro e 50% de área envidraçada.

Por fim, a simulação dos arquivos climáticos dos três cenários urbanos serviu não só como dado de entrada para as simulações energéticas realizadas com o *software* EnergyPlus, mas também como base de dados para observação do comportamento do UWG frente ao efeito ilha de calor urbano em uma cidade de clima quente e úmido. Os resultados gerais referentes às alterações de temperatura entre o arquivo climático medido em campo aberto (EPW INMET 2016) e os arquivos climáticos simulados estão presentes no tópico 4 (Resultados e Discussões), porém uma análise detalhada dos resultados é apresentada no APÊNDICE E.

### **3.2.3 Simulação de iluminação natural - DaySim**

Desenvolvido pelo *Nacional Research Concil Canada* e o *Fraunhofer Intitute for Solar Energy Systems Germany*, o Daysim é um *software* de análise de iluminação natural que usa os algoritmos do RADIANCE para calcular valores anuais de iluminância e luminância com base em um arquivo climático sob todas as condições do céu de um ano. Para manter um baixo tempo de simulação o *software* utiliza o algoritmo de radiação combinado com conceito *Daylight Coefficients* (REINHART, 2006).

No *software* EnergyPlus, utilizado nos estudos apresentados no tópico 2.1.3, é possível realizar simulações para a análise da iluminação natural também com o conceito *Daylight Coefficients*. Porém a partir de análises comparativas entre os dois *softwares* foi constatado que o EnergyPlus possui limitações quanto ao calculo de iluminação natural, superestimando a existência de luz natural nos ambientes (DIDONÉ; PEREIRA, 2010).

Visando uma análise do desempenho energético de edificações que levassem em conta o impacto da iluminação natural de forma mais coerente, diversos estudos propuseram a realização de simulações energéticas acoplando-se os *softwares* DaySim (versão3.1) e EnergyPlus para a análise de iluminação anual e do desempenho energético, respectivamente (DIDONÉ; PEREIRA, 2010; RAMOS; GHISI, 2010; RUPP; GHISI, 2013; VERSAGE; MELO; LAMBERTS, 2010).

O método de acoplamento consiste em obter, a partir da simulação com o DaySim, o relatório horário do controle da iluminação artificial (arquivo \*.CSV), com valores entre 0 (iluminação artificial desligada) e 1 (a iluminação artificial é ligada na potência máxima), para as zonas que possuem o aproveitamento da iluminação natural e utilizar o arquivo \*.CSV como dado de entrada no EnergyPlus, anexando-o como schedule de funcionamento da iluminação artificial no objeto *Schedule:File*. Em seguida, no objeto Lights utiliza-se a *Schedule:File* para as zonas simuladas anteriormente, enquanto as zonas que não utilizam iluminação natural utilizam a schedule de ocupação, com ativação das 8h às 18h. Esse procedimento deve ser realizado para cada zona com aproveitamento de iluminação natural do modelo.

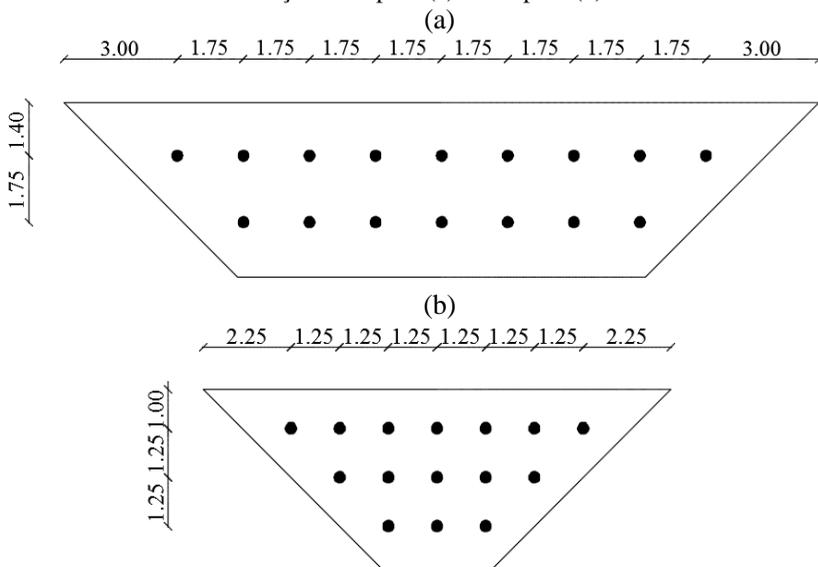
É importante ressaltar que para o presente estudo apenas as zonas perimetrais (ZN, ZS, ZL, ZO) foram selecionadas para aproveitamento de iluminação natural devido a sua proximidade com as aberturas para as áreas externas e que a simulação do impacto da utilização de iluminação natural foi avaliado apenas nos cenários sem entorno e nos cenários urbanos homogêneos T1/2 N/S II-RM50 da parte inicial da análise dos resultados (tópico 4.1.1). Nos demais cenários e análises,

visando à redução de tempo despendido em simulações, será adotada a utilização de iluminação apenas artificial em todas as zonas do modelo.

Para as simulações foi utilizado o arquivo climático EPW INMET 2016 e as geometrias foram modeladas no Sketchup e importadas para o DaySim no formato \*.3DS. As refletâncias adotadas foram de 50%, 30% e 80% para a parede, piso e teto, respectivamente, e nas edificações de entorno foi adotada a refletância média (45%). A malha de pontos dos sensores de iluminância (Figura 40) foi de 1,75m para o tipo 1 e de 1,25m para o tipo 2 e foi determinada de acordo com a ISO 8995 (ABNT, 2013). Os sensores estão presentes em todos os pavimentos, a uma altura de 0,75m do piso, voltados para cima, e regulados para garantir o nível de iluminância mínimo de 500lux a partir de um sistema dimerizável.

Como dados gerais da simulação utilizou-se os parâmetros referentes à *Scene Complexity 1*, ou seja, um modelo sem sistemas complexos de iluminação natural. O padrão de ocupação do edifício, a densidade de potência instalada e a área de cada zona foram os mesmos apresentados no tópico 3.1 e utilizados nas simulações computacionais com o EnergyPlus.

Figura 40: Localização dos sensores de iluminação nas zonas perimetrais das edificações de tipo 1 (a) e de tipo 2 (b)



Fonte: Autora (2018).

### 3.3 TRATAMENTO DE DADOS

O tratamento dos dados foram realizados visando responder às quatro perguntas de pesquisa apresentadas a seguir (a, b, c e d). É importante ressaltar que as análises foram realizadas sempre comparando os resultados dos cenários urbanos, maneira proposta como simulação mais precisa de edificações dentro de contextos urbanos, com os cenários sem entorno, maneira como as simulações termo-energéticas são corriqueiramente realizadas.

#### 3.3.1 Comparação do desempenho energético – Carga térmica

A análise referente ao desempenho energético foi realizada apenas a partir dos dados de carga térmica (parâmetro de desempenho), desconsiderando-se as cargas referentes aos equipamentos e iluminação artificial, já que foram simulados como constantes para todos os cenários (com exceção dos resultados referentes ao tópico 4.1.1 onde os impactos da iluminação natural foram investigados).

Optou-se por analisar os resultados em formato de carga térmica (kWh/m<sup>2</sup>) visando uma redução de número de variáveis a partir da utilização de um sistema “ideal” de condicionadores de ar (*ideal load*) capaz de manter a temperatura do ar interna entre 18°C e 24°C. Para transformar os valores de carga para consumo de uma maneira genérica seria possível fazer a divisão do resultado da carga por 2,6 que é o valor de referência de COP para sistemas condicionadores de ar da tabela de referência para edificações de escritórios (CB3E, 2017), resultando no valor de consumo. Porém, como o COP pode variar dependendo do sistema adotado, optou-se por manter a análise de desempenho energético utilizando-se apenas os valores de carga térmica em kWh/m<sup>2</sup>.

A partir da comparação entre os valores dos cenários urbanos com os cenários sem entorno foi possível observar as consequências de se levar em conta ou não o contexto urbano nas simulações computacionais termo-energéticas. Já a partir da comparação apenas entre valores resultantes dos cenários urbanos foi possível observar quais variáveis de entorno, dentre as propostas para análise, possuem um maior impacto no desempenho energético das edificações e se a dimensão desses efeitos é variável de acordo com o mês do ano, pavimento ou orientação.

Dessa forma, a análise da carga térmica foi dividida em dois principais tópicos: carga térmica geral anual e carga térmica detalhada (mês, pavimento e orientação). No tópico carga térmica geral anual (4.1) são apresentados primeiramente apenas os resultados dos cenários sem

entorno e com entorno homogêneo T1/2 N/S II-RM50 (tópico 4.1.1) para uma análise comparativa inicial e depois são apresentados os resultados de todos os 42 cenários simulados (tópico 4.1.2). Ambas as análises apresentam valores em kWh/m<sup>2</sup>/ano para o edifício por inteiro e buscam, respectivamente, responder duas principais questões:

- a) Qual fator resultante da consideração do contexto urbano, dentre os analisados, possui maior influência na predição de carga térmica das edificações?

A questão foi respondida no tópico 4.1.1 (Influência da consideração do contexto urbano nas simulações) a partir da comparação gráfica entre os valores de carga anual do cenário homogêneo (T1/2 N/S II-50RM) e do cenário sem entorno, observando também a influência separadamente da modificação do arquivo climático, da consideração da geometria do entorno (sombreamento e reflexão) e da consideração da iluminação natural.

- b) Qual característica do envelope dos edifícios do entorno urbano possui maior influência na predição de carga térmica das edificações?

A fim de responder a questão, os resultados dos diferentes contextos urbanos referentes aos cenários homogêneos e heterogêneos são apresentados no tópico 4.1.2, observando se há diferença da influência da refletância e da porcentagem de área envidraçada na carga térmica anual.

Já no tópico carga térmica detalhada (4.2) foram apresentados os resultados dos cenários sem entorno e dos cenários urbanos homogêneos extremos (20RA e 80RB) para uma análise mais aprofundada, analisando a carga térmica em cada mês do ano, cada pavimento e cada zona. Esse tópico visa responder principalmente a seguinte questão:

- c) Existem alterações no comportamento dos resultados ou nas diferenças entre o cenário sem entorno e os cenários urbanos homogêneos nos diferentes meses do ano, diferentes pavimentos ou diferentes zonas?

Esta análise mais aprofundada visa entender os pontos que os resultados referentes à carga anual não conseguem explicar de forma satisfatória.

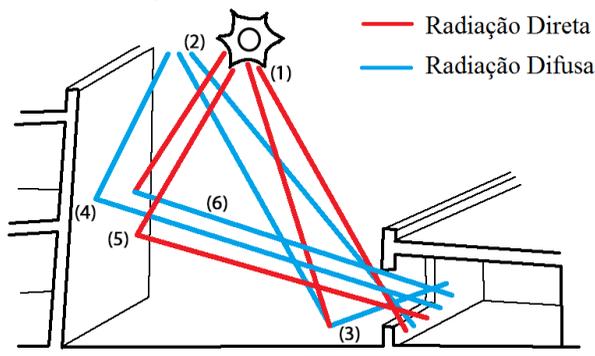
### 3.3.2 Comparação da radiação incidente nas aberturas

Para o melhor entendimento do desempenho energético da edificação de análise e dos fenômenos da reflexão solar e sombreamento provenientes dos edifícios de entorno o *software* EnergyPlus permite uma análise detalhada da radiação incidente em uma superfície. Nele, é possível obter o valor total de radiação incidente em uma determinada superfície (*Variable: Surface Outside Face Incident Solar Radiation*), ou ainda o valor de cada componente de radiação que resulta na radiação total incidente. Os resultados referentes à radiação solar incidente são apresentados no tópico 4.3 como uma média anual do total diário em kWh/m<sup>2</sup>/dia.

A Figura 41 indica a trajetória das seis formas de incidência de radiação solar possíveis em uma superfície que somadas resultam na total, sendo elas: a radiação solar direta do sol (1) (*Variable: Surface Outside Face Incident Beam Solar Radiation*), difusa do céu (2) (*Variable: Surface Outside Face Incident Sky Diffuse Solar Radiation*), direta e difusa refletida do solo de forma difusa (3) (*Variable: Surface Outside Face Incident Ground Diffuse Solar Radiation*), difusa refletida da edificação de entorno de forma difusa (4) (*Variable: Surface Outside Face Incident Sky Diffuse Surface Reflected Solar Radiation*), direta refletida da edificação de entorno de forma direta (5) (*Variable: Surface Outside Face Incident Beam To Beam Surface Reflected Solar Radiation*) e direta refletida da edificação de entorno de forma difusa (6) (*Variable: Surface Outside Face Incident Beam To Diffuse Surface Reflected Solar Radiation*). As linhas em vermelho indicam o caminho percorrido pela radiação direta e as linhas em azul são referentes à radiação difusa.

Foram analisados nesse tópico os valores de radiação incidente total nas aberturas envidraçadas referentes ao edifício de análise, que representam 50% das fachadas, pois esses são os elementos que promovem maior contato e troca de calor com o ambiente externo. Para a análise detalhada das seis componentes da radiação total, buscando evidenciar as diferenças nos padrões de reflexão frente às diferentes características adotadas para o entorno urbano neste tópico foram analisados novamente os resultados referentes aos cenários sem entorno e dos cenários urbanos homogêneos extremos (20RA e 80RB).

Figura 41: Representação dos tipos de radiação que compõem a radiação solar total incidente em uma superfície urbana



Fonte: Autora (2018).

É importante ressaltar que as análises foram realizadas para as quatro principais orientações separadamente, referentes às zonas perimetrais, devido à diferença dos padrões de incidência solar de cada fachada. As análises foram realizadas também em diferentes níveis de altura, buscando observar o padrão de alteração da radiação incidente nos diferentes pavimentos. Para auxiliar esta análise apresentaram-se no tópico 4.3 também as máscaras de sombra dos diferentes pavimentos, elaboradas com o *software* Apolux, desenvolvido no laboratório de conforto ambiental da UFSC.

Em relação aos diferentes níveis de análise, foram definidos três pavimentos de estudo, sendo eles o pavimento inferior (acima do pavimento térreo), o pavimento central (pavimento do meio do edifício) e pavimento superior (pavimento abaixo do pavimento da cobertura). Dessa forma, para a tipologia 1 analisou-se os pavimentos 2, 5 e 8, e para a tipologia 2 analisou-se os pavimentos 2, 8 e 14. Os pavimentos térreo e da cobertura não foram incluídos na análise devido ao seu contato com o solo e contato da cobertura com o exterior, respectivamente, que resultariam em influência significativa na carga, mascarando a correlação entre os valores de radiação incidente e carga. Dessa forma, esse tópico visa responder principalmente a seguinte questão:

- d) A diferença na incidência de radiação solar de cada cenário acompanha a diferença na carga térmica?

Aqui são comparadas as diferenças dos valores de incidência de radiação solar e carga térmica em diferentes pavimentos, com o auxílio também de máscaras solares para auxiliar na análise.

## 4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste capítulo são apresentados os resultados obtidos a partir das simulações computacionais e realizadas as discussões acerca desses. Os modelos virtuais simulados correspondem àqueles propostos como cenários de análise (Quadro 4, Quadro 5 e Quadro 6) para o contexto climático de Maceió. Os resultados foram divididos em três tópicos, no qual no primeiro apresentam-se os resultados de carga térmica geral anual do edifício, no segundo estão os resultados de carga térmica de maneira detalhada, ou seja, por mês do ano, por pavimento e por orientação, e por fim são apresentados os resultados referentes à radiação incidente nas aberturas.

É importante ressaltar que os resultados correspondem apenas à carga necessária para resfriamento, já que devido ao clima da cidade de Maceió a carga para aquecimento é inexistente ao longo de todo o ano.

Nos resultados referentes à carga térmica, os valores referentes às simulações como geralmente são realizadas, ou seja, sem modelagem do entorno nem modificação do arquivo climático (T1/2 N/S I) são apresentados na cor verde. Os resultados das simulações como o presente estudo propõe para edificações dentro de contextos urbanos são apresentados em vermelho (T1 N II), azul (T1 S II), laranja (T2 N II) e roxo (T2 S II). Já os resultados referentes à radiação incidente nas aberturas apresentam para a cor vermelha a radiação direta do sol, a cor azul a radiação difusa do céu, a cor verde a radiação refletida do solo, a cor roxa a radiação difusa do céu refletida de forma difusa por uma superfície opaca, a cor amarela a radiação direta do sol refletida de forma direta por uma superfície translúcida e a cor laranja a radiação direta do sol refletida de forma difusa por uma superfície opaca.

### 4.1 CARGA TÉRMICA GERAL ANUAL

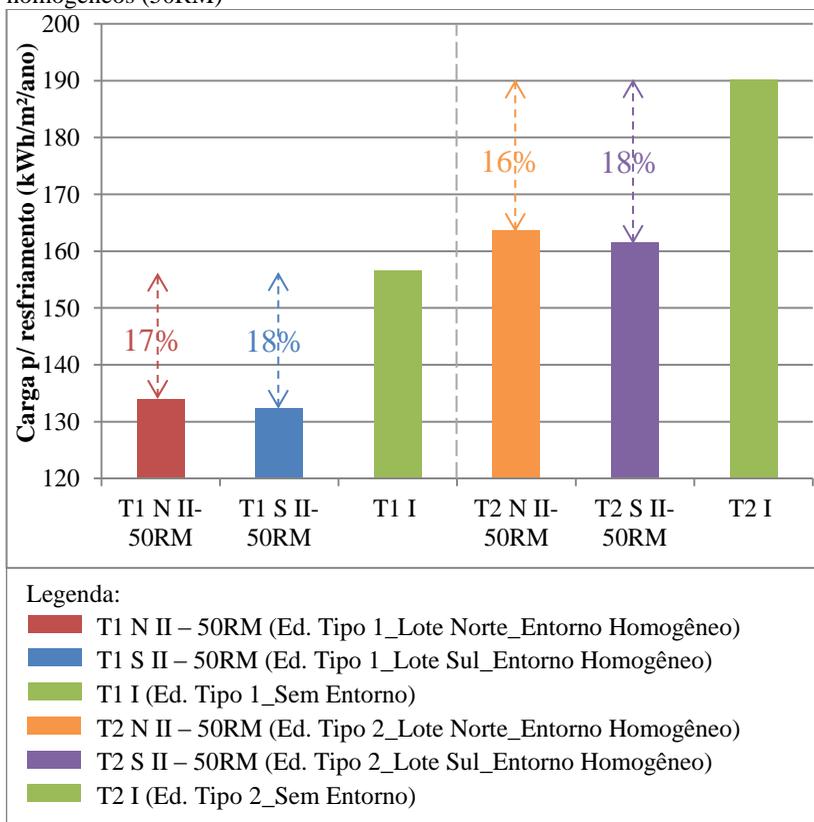
#### 4.1.1 Influência da consideração do contexto urbano nas simulações computacionais

Nos resultados foram analisadas primeiramente as modificações resultantes das diferentes formas de simulação para obtenção de carga térmica de edificações localizadas dentro de áreas urbanas. Destaca-se que neste primeiro tópico (4.1.1), para facilitar a comparação entre as diferentes formas de simulação, considerou-se apenas os cenários sem entorno (T1/2 N/S I – em verde) e os cenários urbanos com entorno homogêneo com 50% de área envidraçada e refletância média dos

elementos opacos e translúcidos (T1/2 N/S II – 50RM). Os gráficos apresentam sempre em ordem os resultados referentes aos cenários T1 N (vermelho), T1 S (azul), T2 N (laranja) e T2 S (roxo).

Na Figura 42 apresentam-se os resultados das simulações como o presente estudo propõe (modelando o entorno e utilizando o arquivo climático modificado, como os estudos apresentados no tópico 2.2.3 da revisão de literatura), para o caso do entorno homogêneo (T1/2 N/S II – 50RM), e os resultados das simulações consideradas mais convencionais, no qual o edifício de análise é simulado sem a presença de entorno e com o arquivo climático de estação meteorológica em campo aberto (T1/2 I).

Figura 42: Carga térmica anual dos cenários sem entorno e cenários homogêneos (50RM)



Comparando-se na Figura 42 os casos referentes à simulação de entorno homogêneo com os casos sem entorno, como as simulações são rotineiramente realizadas, observa-se que o valor do segundo é significativamente mais alto, entre 16% e 18%, tanto nos cenários referentes à tipologia 1 N ou S quanto à tipologia 2 N ou S. Essa diferença se dá pela existência da geometria do entorno na simulação termo-energética e pela utilização de um arquivo climático modificado de acordo com as características urbanas daquele local nos casos considerados como Base (T1 ou 2, N ou S, II).

Em seguida, para que fosse possível observar separadamente o impacto das três principais modificações resultantes da consideração do contexto urbano na carga térmica das edificações, de acordo com a revisão de literatura, apresentou-se os resultados de cada modificação de forma desagregada.

A Figura 43 apresenta os resultados referentes aos cenários com entorno homogêneo (T1/2 N/S II – 50RM), como base de comparação, e os resultados desse desconsiderando-se a modelagem do entorno (T1/2 N/S – sem entorno), para observar seu impacto isoladamente, como nos estudos apresentados no tópico 2.2.1.

A Figura 44 apresenta os resultados referentes aos cenários com entorno homogêneo (T1/2 N/S II – 50RM), como base de comparação, e os resultados desse desconsiderando-se a modificação do arquivo climático (T1/2 N/S - Sem UHI), ou seja, utilizando o arquivo EPW INMET 2016 ao invés do EPW UWG, para observar o impacto da ilha de calor isoladamente, como nos estudos apresentados no tópico 2.2.2.

Já a Figura 45 apresenta os resultados referentes aos cenários com entorno homogêneo (T1/2 N/S II – 50RM), como base de comparação, e os resultados desse considerando-se o aproveitamento da iluminação natural (T1/2 N/S - com iluminação) para observar seu impacto isoladamente. É importante ressaltar que a consideração do impacto do aproveitamento da iluminação natural na carga térmica foi analisada apenas aqui, uma vez que a obtenção dos resultados demanda significativo tempo de simulação e que o principal impacto da iluminação, segundo a revisão de literatura, é na carga para iluminação artificial e não na carga térmica, elemento analisado no presente trabalho. Dessa forma, nas demais análises a iluminação artificial foi considerada totalmente ligada nos horários de ocupação.

Figura 43: Carga térmica anual dos cenários homogêneos (50RM) e das simulações desses sem a modelagem da geometria de entorno

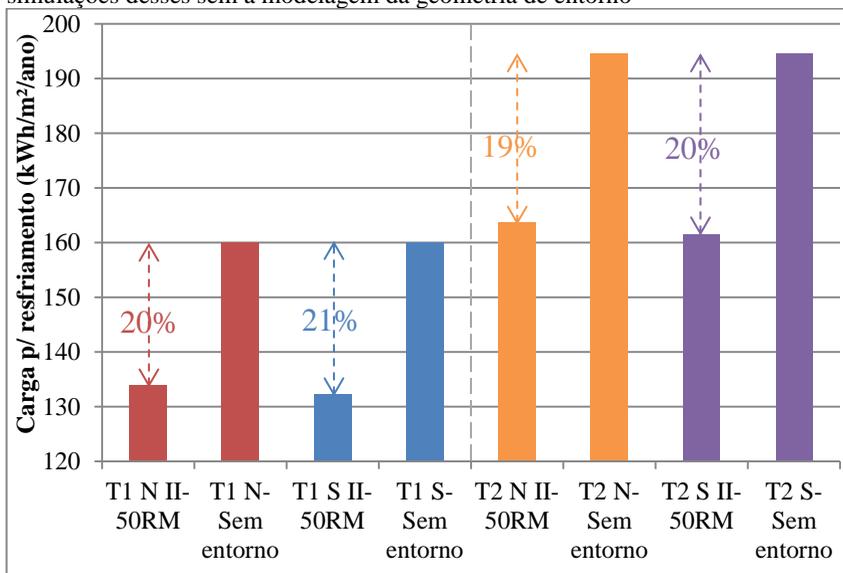


Figura 44: Carga térmica anual dos cenários homogêneos (50RM) e das simulações desses sem considerar as modificações do UWG

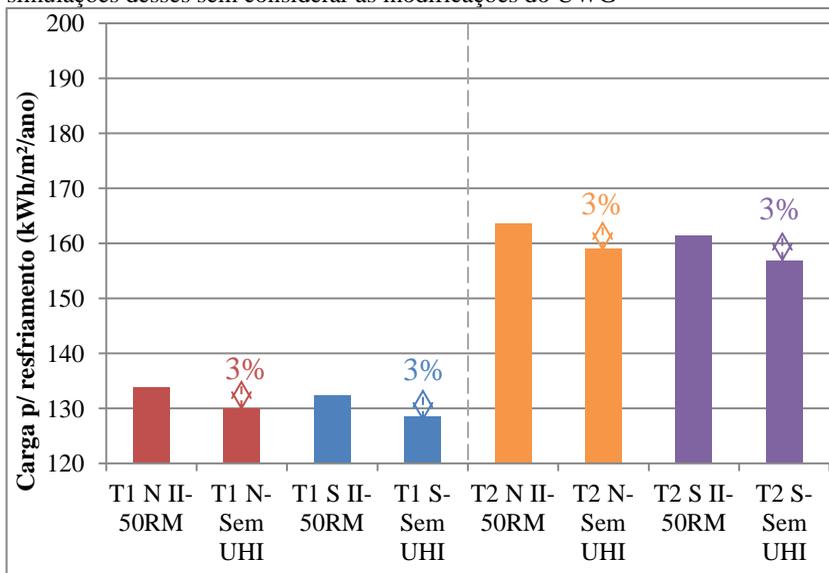
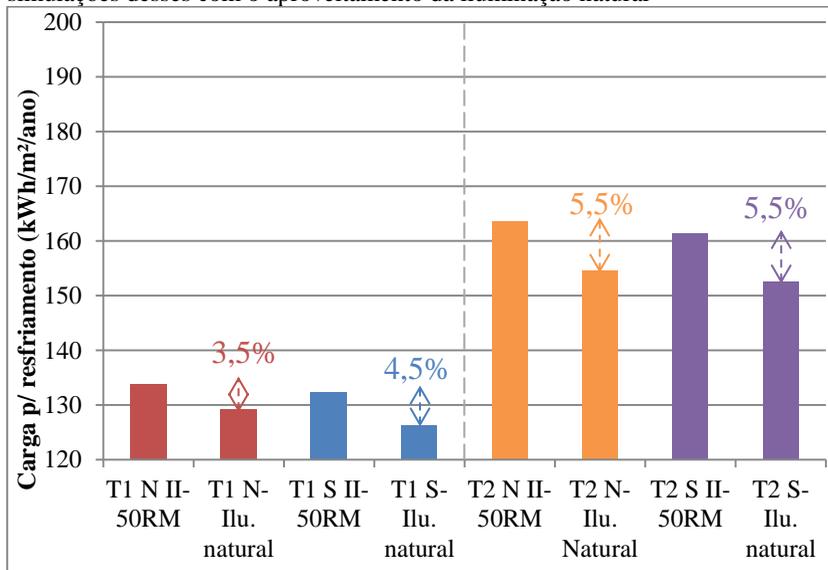


Figura 45: Carga térmica anual dos cenários homogêneos (50RM) e das simulações desses com o aproveitamento da iluminação natural



Ao analisar as três principais modificações resultantes da inserção do contexto urbano nas simulações observa-se que a modelagem do entorno como elemento de sombreamento (Figura 43) teve uma influência muito maior que a modificação do arquivo climático (Figura 44) e o aproveitamento da iluminação natural (Figura 45). A influência da inserção do entorno na modelagem das simulações resultou em uma redução entre 19% e 21% na carga, enquanto a utilização do arquivo climático urbano resultou em um aumento na carga de em média 3% apenas e a modificação da carga referente ao aproveitamento da iluminação natural resultou em uma redução entre 3,5% e 5,5%.

A alteração de em média 20% na carga quando se adota a modelagem do contexto urbano como elemento de sombreamento nas simulações (Figura 43) é resultado principalmente do sombreamento provocado pelo entorno na edificação de análise e da reflexão proveniente dos elementos verticais do entorno (HAN; TAYLOR; PISELLO, 2015; PISELLO et al., 2012, 2014). Buscando entender qual a influência do sombreamento e da reflexão separadamente foram realizadas simulações visando desagregar esses dois parâmetros, a partir dos valores dos cenários Base (T1 ou 2, N ou S, II). Para a observação da influência apenas da reflexão solar adotou-se o valor de 0 na

refletância dos elementos de entorno. Já para avaliar apenas a influência do sombreamento proporcionado por esses elementos, adotou-se uma transmitância igual a 1 para as superfícies dos elementos de entorno, tornando-os “transparentes” ao efeito do sombreamento, mas mantendo suas características de refletância na análise de acordo com a metodologia proposta por Han, Taylor e Pisello (2015).

Os resultados apresentados na Tabela 2 indicam a diferença em porcentagem entre o valor obtido sem a influência separadamente do sombreamento e reflexão e o valor do cenário Base referente a cada tipo de edificação de análise e localização de lote de análise. Foi possível observar que a influência do sombreamento é superior à influência da reflexão na carga térmica, pois enquanto a não consideração do sombreamento provoca um aumento (sinal positivo) entre 14% e 16% na carga térmica total anual, a não consideração da reflexão solar dos elementos de entorno promovem uma redução (sinal negativo) entre 3% e 4% apenas. Destaca-se também que o impacto do sombreamento foi mais significativo na tipologia mais adensada (tipologia 1), enquanto o impacto da reflexão solar foi mais significativo na tipologia menos adensada (tipologia 2) em relação à tipologia 1.

Tabela 2: Diferença entre o valor de carga anual dos cenários homogêneos e desses sem a influência, separadamente, do sombreamento e da reflexão

	<b>T1 N II</b>	<b>T1 S II</b>	<b>T2 N II</b>	<b>T2 S II</b>
<b>Sem Sombreamento</b>	15%	16%	14%	15%
<b>Sem reflexão</b>	-3%	-3%	-4%	-4%

Em relação à utilização dos dois diferentes arquivos climáticos (Figura 44), a diferença entre as simulações com o EPW INMET e o EPW UWG foi de 3% em todas as tipologias e lotes aqui analisados. Esta baixa diferença pode indicar que ainda que o adensamento urbano provoque o efeito ilha de calor urbano noturna, como pôde ser constatado na Figura 46 e Figura 47 e mais detalhadamente no APÊNDICE E, para o clima e níveis de densidade estudados, esse não se mostrou tão prejudicial do ponto de vista da carga térmica. Isso ocorreu devido ao fato do fenômeno ocorrer em maior escala durante a noite e a madrugada (quando a edificação em questão não está sendo utilizada), e diante do fato de que durante o período da manhã, que representa metade do horário de funcionamento do edifício, a temperatura urbana apresentar-se um pouco abaixo daquelas medidas em campo aberto (em razão da existência de sombreamento).

O edifício de análise possui características de uma edificação comercial de escritórios, que tem funcionamento das 8 às 18h e metade do horário de funcionamento os valores de temperatura do UWG apresentam-se abaixo dos valores do INMET, não impactando tão negativamente na carga térmica. É provável que o efeito ilha de calor noturna tenha impacto mais significativo em edificações com utilização de condicionadores de ar durante todo o dia, como estabelecimentos comerciais de 24h e em edificações que o utilizem principalmente durante o período da noite e madrugada, como edificações residenciais. Isso porque além dos valores do EPW UWG estarem sempre acima do EPW INMET entre o período da tarde e início da manhã, é durante o horário da noite e madrugada que existem os maiores picos dessa diferença, de até 3,0°C, como apresentado no APÊNDICE E.

Os resultados de temperatura do EPW UWG comparado ao EPW INMET 2016 apresentaram-se em concordância com os estudos apresentados na revisão de literatura. Assim como no presente estudo, Liu et al. (2017) demonstram que o efeito ilha de calor urbano resulta em maiores médias mensais de temperatura na área urbana, já Unzeta, Norford e Britter (2009) corroboram que o maior aumento da temperatura na área urbana ocorre na madrugada e Pyrgou et al. (2017) confirmaram que a temperatura urbana pode se apresentar mais baixa que a rural durante o dia, em razão do sombreamento da cidade.

Figura 46: Diferença de temperatura média mensal por hora entre o arquivo climático UWG 1 e o EPW INMET 2016 de Maceió

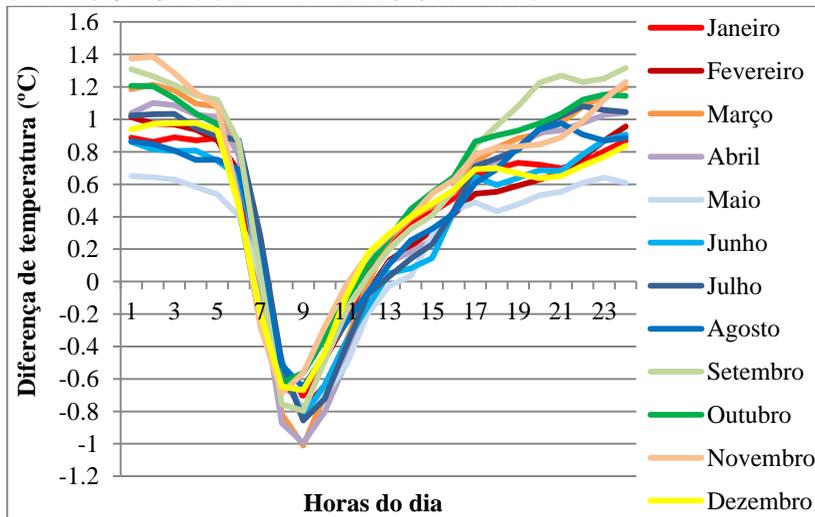
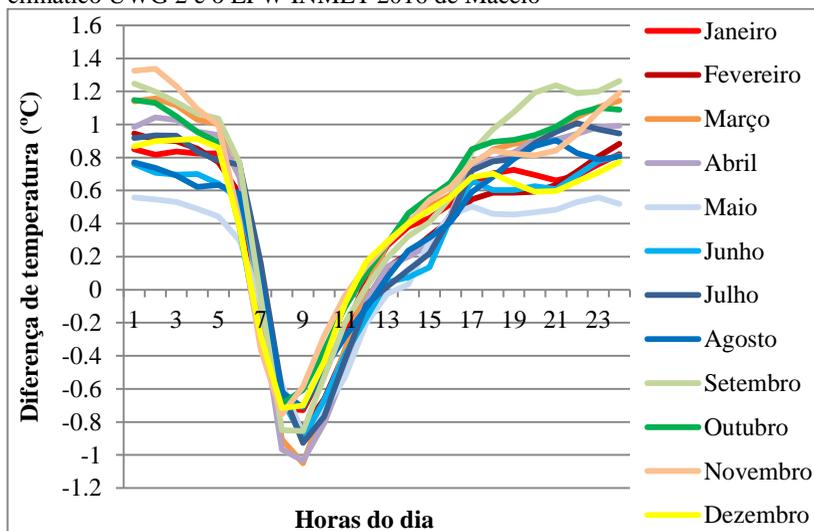


Figura 47: Diferença de temperatura média mensal por hora entre o arquivo climático UWG 2 e o EPW INMET 2016 de Maceió



Os resultados referentes à utilização da iluminação natural (Figura 45) demonstraram uma redução na carga anual para resfriamento de 3,5% a 5,5%. As maiores diferenças foram observadas para o tipo 2, já que é o que apresenta maiores afastamentos entre os edifícios urbanos, permitindo assim um maior aproveitamento da iluminação natural durante o ano. É importante ressaltar que os impactos da iluminação são maiores na carga para iluminação artificial que na carga térmica, e que para uma análise de consumo energético total de uma edificação é importante que o impacto na carga térmica e na carga para iluminação artificial sejam analisados conjuntamente.

Em relação às diferenças entre a tipologia 1 e 2 na Figura 43, Figura 44 e Figura 45 observa-se que os valores de carga para resfriamento são de até 35 kWh/m<sup>2</sup> ao ano maiores na tipologia 2. Existem dois fatores que justificam o valor de carga maior: o primeiro é o maior afastamento entre os edifícios da tipologia 2 em relação aos da tipologia 1, o que permite uma maior incidência de radiação solar e promove menor sombreamento. O segundo é o fato de, apesar de ambas as tipologias possuírem praticamente a mesma área superficial externa (igual nas superfícies verticais), a influência da área superficial externa é maior na tipologia 2. Na tipologia 1 as zonas perimetrais, que possuem influência direta do meio externo, correspondem a 70% da área de cada

pavimento. Já na tipologia 2 as zonas perimetrais correspondem a 95% da área de cada pavimento, tendo maior influência do meio externo.

Apesar da significativa diferença de carga entre a tipologia 1 e 2, quando compara-se as diferentes formas de simulação para obtenção de carga térmica de edificações localizadas dentro de áreas urbanas, em termos relativos, os valores das diferenças foram bem semelhantes entre os variados cenários de cada tipologia.

Em relação às diferenças referentes aos cenários localizados nos lotes N ou S, os valores do caso S apresentaram-se um pouco inferiores ao caso N tanto na tipologia 1 quanto na tipologia 2. Apesar da pouca diferença é importante ressaltar que a fachada Norte recebe insolação direta em 60% das horas do ano, enquanto a fachada Sul recebe insolação direta em 40% das horas do ano. Dessa forma, como nos lotes B as fachadas Norte, Leste e Oeste do edifício de análise estão mais protegidas, essa localização necessita de uma carga um pouco menor que os cenários de lote N, que possuem as fachadas Sul, Leste e Oeste bem sombreadas, porém a fachada Norte, que recebe sol em uma maior parte do ano, está menos obstruída.

#### **4.1.2 Influência das características do envelope do contexto urbano nas simulações computacionais**

A Figura 48 e Figura 49 a seguir apresentam os resultados anuais de carga térmica de todos os cenários do presente estudo. É importante ressaltar que os cenários sem entorno (I) foram simulados com o arquivo climático EPW INMET 2016 enquanto os cenários urbanos (II e III) foram simulados com seus respectivos arquivos climáticos modificados de acordo com seu entorno, ou seja, os cenários T1 N ou S II e T2 N ou S II foram simulados com os arquivos climáticos UWG 1 e 2, respectivamente. Já os cenários T1 N ou S III e T2 N ou S III foram simulados com o arquivo climático UWG 3.

Comparando-se os valores de carga dos cenários com entorno homogêneo (II) com os cenários sem entorno (I) (considerando cada tipo de edificação de análise - 1 ou 2 - e lote - N ou S) nota-se uma diferença máxima entre 20% e 22% no caso de 80% de área envidraçada com refletância baixa, e uma diferença mínima de entre 10% e 13% para o caso de 20% de área envidraçada com refletância alta. A diferença média, considerando todas as simulações paramétricas dos cenários homogêneos, se manteve entre 16% e 18% nas edificações localizadas nos lotes N e S, respectivamente. A diferença entre os cenários de entorno heterogêneo (III) e sem entorno (I) foram menores, entre 10% e

15%, devido ao menor sombreamento provocado pelo entorno e consequentemente maior incidência de radiação solar, já que o contexto urbano apresenta-se menos denso que os dos cenários homogêneos.

Figura 48: Carga térmica anual dos cenários da tipologia 1

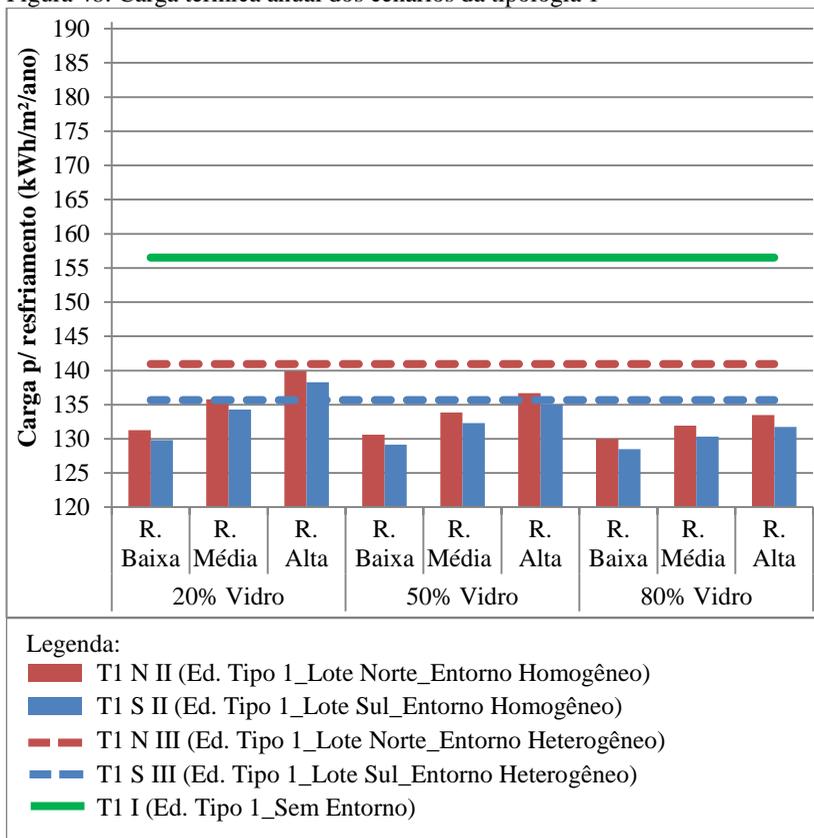
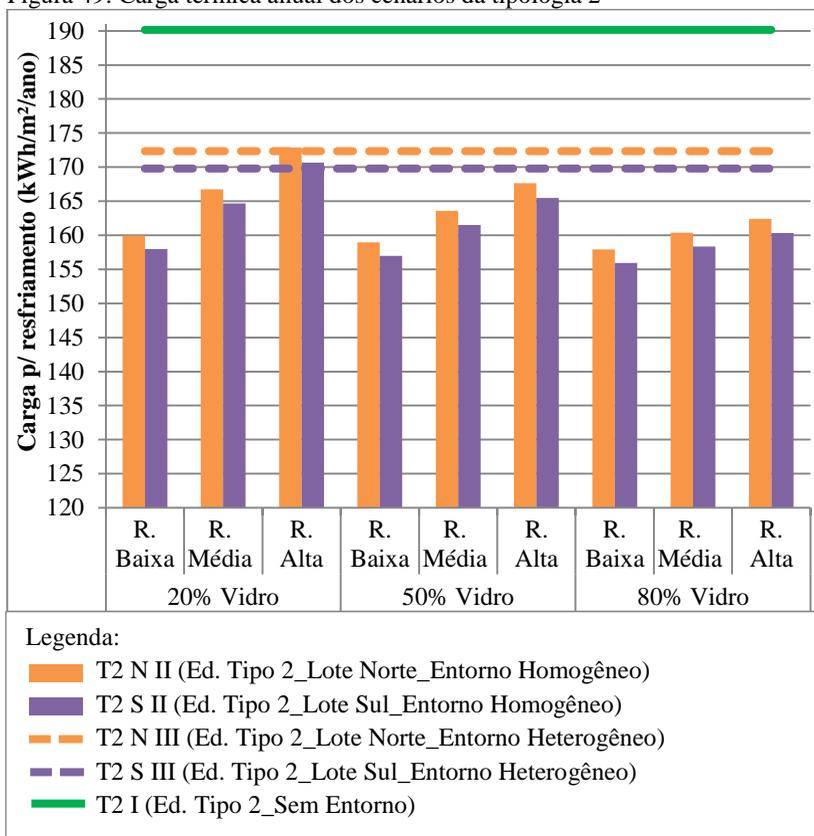


Figura 49: Carga térmica anual dos cenários da tipologia 2



Comparando-se os resultados da edificação de análise nos lotes N e S constatou-se que não houve grande diferença nos resultados. Apesar do lote N (fachada principal voltada para o Norte) ter apresentado valor um pouco acima dos valores do lote S (fachada principal voltada para o Sul), não é possível dizer do ponto de vista da carga térmica anual que a localização do lote S seja significativamente melhor que o N considerando a baixa diferença entre eles. Esta baixa diferença pode ser resultado da proximidade da cidade com a linha do equador, no qual as orientações Norte e Sul recebem radiação direta por uma quantidade de horas semelhante ao longo do ano.

Os resultados dos cenários com entorno homogêneo (II) indicam que quanto menor a área envidraçada e maior a refletância do entorno, maiores são os valores de carga da edificação de análise. Já quanto

maior a área envidraçada e menor a refletância do entorno, menor os valores de carga. A maior diferença obtida foi de 8%. No entanto, aqui é importante ressaltar que o EnergyPlus não contabiliza a radiação de onda longa proveniente dos edifícios de entorno. Com a contabilização dessa é provável que a diferença seja menor que 8%, uma vez que a carga para os cenários provavelmente seriam um pouco superiores as simuladas e as referentes aos cenários de baixa refletância (cargas mais baixas atualmente) possuiriam um aumento mais significativo que as de alta refletância, devido a maior quantidade de radiação de onda longa.

Observou-se também que quanto menor a porcentagem de área envidraçada, maior a diferença entre os casos com diferentes refletâncias, e quanto maior a refletância, maior a diferença entre os casos com diferentes porcentagens de área envidraçada. É importante destacar que a variação da refletância possui maior impacto nos resultados de carga quando comparado à variação da porcentagem de área envidraçada. Isso porque a maior variação de carga entre diferente refletâncias, considerando igual porcentagem de área envidraçada (20%), foi de 8,5kWh/m<sup>2</sup>/ano para a tipologia 1 e 12,7kWh/m<sup>2</sup>/ano para a tipologia 2, enquanto a maior diferença de carga entre os diferentes valores de área envidraçada, considerando uma mesma refletância (alta) foi de 6,4W/m<sup>2</sup>/ano para a tipologia 1 e de 10,4kWh/m<sup>2</sup>/ano para a 2.

Considerando-se os valores máximos e mínimos alcançados com a simulação dos cenários urbanos homogêneos em todas as tipologias, foram selecionados o caso com 20% de área envidraçada e alta refletância (maior carga anual e menor diferença em relação ao cenário sem entorno) e o caso de 80% de área envidraçada com baixa refletância (menor carga anual e maior diferença em relação ao cenário sem entorno) para análises mais detalhadas da carga térmica, para cada mês, por pavimento e por orientação. Estas análises são apresentadas no tópico 4.2. É importante ressaltar que a variação de carga entre os cenários II-20RA e II 80-RB foi de em média 8%

Como a menor carga necessária para resfriamento da edificação de análise resultou da combinação do entorno de baixa refletância e 80% de área envidraçada e a maior carga da combinação de alta refletância e 20% de área envidraçada é importante salientar que este resultado não indica que as edificações dentro de contextos urbanos devam adotar envelopes de baixa refletância e alta área envidraçada. Este resultado indica apenas que as características do entorno urbano, como cor e porcentagem de área envidraçada, possuem significativa influência na análise de carga de edificações dentro de contextos urbanos, e por isso devem ser levadas em consideração nas simulações termo-energéticas.

De modo geral, envelopes com baixa refletância e alta porcentagem de área envidraçada não são recomendados para edifícios localizados em cidades de clima quente e úmido, pois podem aumentar o desconforto térmico tanto nos ambientes internos da edificação quanto nos ambientes urbanos que a circundam, além de promover um aumento na carga térmica do edifício que adota tais características.

As análises da carga térmica anual demonstraram que a consideração do entorno é indispensável e ressaltaram a grande importância do sombreamento na carga para resfriamento.

## 4.2 CARGA TÉRMICA DETALHADA

### 4.2.1 Carga térmica mensal

A Figura 50 e Figura 51 representam os resultados de carga mensal para resfriamento os cenários T1 N/S II a para T2 N/S II, respectivamente. Nessas é possível observar novamente a maior carga em todos os meses do cenário II-20RA comparado ao II-80RB, o do cenário sem entorno comparado aos cenários urbanos.

Figura 50: Carga térmica mensal para cenários da tipologia 1

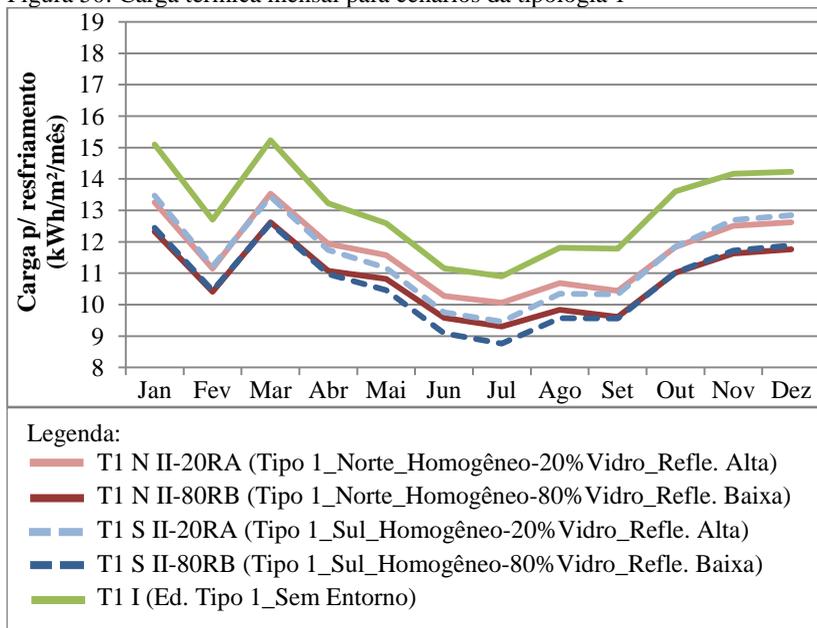
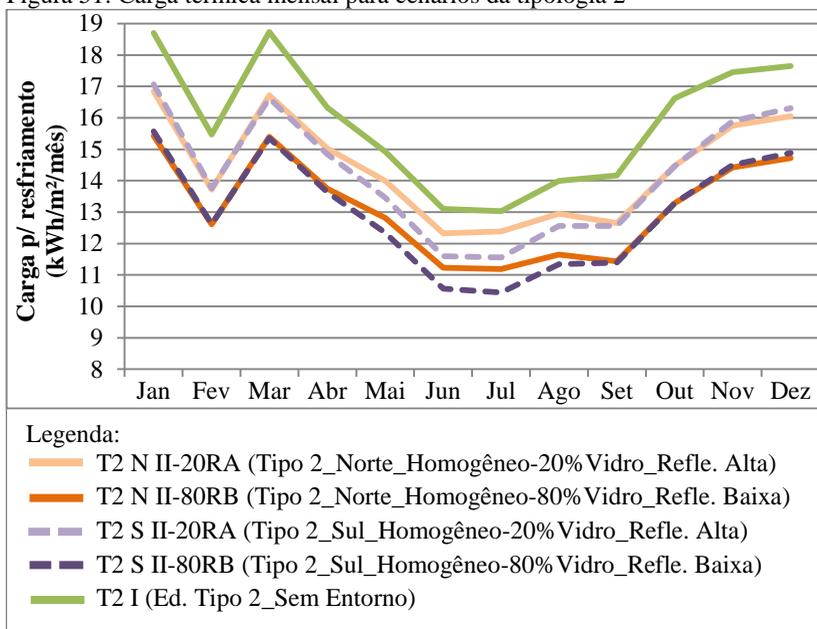


Figura 51: Carga térmica mensal para cenários da tipologia 2



É possível observar também que a carga nos meses mais quentes (entre outubro e maio) é superior ao período de inverno, caracterizado na cidade pelo período de chuvas. O mês de fevereiro apresentou uma queda acentuada no valor da carga em todos os cenários. Uma conjunção de fatores é responsável por este resultado: a temperatura do ar medida em campo aberto (Figura 35) e a radiação direta (Figura 33) foram um pouco menor no mês de fevereiro quando comparada ao mês de janeiro e março. Além disso, o fato do mês de fevereiro possuir uma quantidade menor de dias em relação aos demais meses, resulta também na redução da carga mensal necessária para resfriamento.

A diferença de carga entre o verão e inverno, todavia é mais acentuada nos gráficos referentes à tipologia 2, alcançando uma diferença máxima de 4,5 kWh/m<sup>2</sup>/mês entre os meses de julho e janeiro, enquanto na tipologia 1 essa diferença máxima foi de 3,0 kWh/m<sup>2</sup>/mês.

Comparando-se os valores do cenário homogêneo com maior (20RA) e menor carga (80RB) com o valor do cenário sem entorno (T2 I), na cor verde, observa-se que as diferenças nos cenários N são sempre menores no inverno, enquanto nos cenários S as diferenças são sempre menores nos meses de verão, como pode ser constatado na Tabela 3.

Tabela 3: Porcentagem de redução da carga térmica resultante da diferença entre os cenários sem entorno e os cenários com entorno (homogêneos)

Mês	T1 N II		T1 S II		T2 N II		T2 S II	
	20RA	80RB	20RA	80RB	20RA	80RB	20RA	80RB
<b>Janeiro</b>	14%	22%	<b>12%</b>	<b>21%</b>	11%	21%	<b>9%</b>	<b>20%</b>
Fevereiro	14%	22%	13%	22%	13%	23%	12%	22%
Março	13%	21%	13%	21%	12%	22%	13%	22%
Abril	11%	19%	13%	21%	9%	19%	10%	20%
<b>Mai</b>	<b>9%</b>	<b>16%</b>	13%	20%	<b>7%</b>	<b>16%</b>	11%	21%
<b>Junho</b>	<b>9%</b>	<b>16%</b>	14%	23%	<b>6%</b>	<b>17%</b>	13%	24%
<b>Julho</b>	<b>8%</b>	<b>17%</b>	15%	25%	<b>5%</b>	<b>16%</b>	13%	25%
Agosto	11%	20%	14%	23%	8%	20%	11%	23%
Setembro	13%	23%	14%	23%	12%	24%	13%	24%
Outubro	15%	24%	15%	23%	15%	25%	15%	25%
<b>Novembro</b>	13%	22%	<b>12%</b>	<b>21%</b>	11%	21%	<b>10%</b>	<b>20%</b>
<b>Dezembro</b>	13%	21%	<b>11%</b>	<b>20%</b>	10%	20%	<b>8%</b>	<b>18%</b>

Estes valores demonstram a importância da radiação incidente na carga necessária para resfriamento. Nos cenários N as fachadas Leste, Oeste e Sul estão significativamente mais obstruídas que a fachada Norte. A fachada Norte, sem obstruções, recebe 60% da radiação direta ao longo do ano, concentrados principalmente nos meses de inverno. Dessa forma, nos meses de inverno, as cargas dos cenários N apresentam-se mais próximas dos cenários sem entorno (I) que nos meses de verão, pois no inverno a quantidade de radiação que incide na edificação de análise nos cenários N é mais parecida com a sem entorno (I), enquanto no verão esta diferença torna-se maior devido ao fato da fachada Sul, que recebe mais insolação nesta época, estar mais obstruída.

Lógica semelhante pode ser aplicada para explicar as menores diferenças no verão para cenários S em relação ao cenário sem entorno. Como a fachada Sul, que recebe insolação durante o verão e é a menos obstruída no verão, os valores de carga nesses meses são mais próximos que aqueles obtidos nos cenários sem entorno.

É possível observar também que, considerando-se o mesmo entorno urbano (com idêntico valor de refletância e porcentagem de área envidraçada), as cargas do cenário N em relação às do cenário S são maiores apenas durante o inverno. Isto significa que a diferença de carga

anual entre os lotes N e S é resultado apenas da diferença relativa aos meses de inverno, e por essa razão não são tão significativas ao se observar apenas a carga anual. Enquanto a diferença máxima anual entre os cenários N e S com um mesmo entorno urbano foi de 1%, a diferença máxima mensal foi de 7% em julho.

Dessa forma, a análise mensal demonstrou-se importante por salientar que a baixa diferença anual entre os valores de carga dos cenários N e S, considerando o mesmo entorno urbano, não é constante durante todo o ano. A diferença apresenta-se significativa apenas no período do inverno, na qual as cargas referentes ao cenário N aumentam devido à incidência de radiação direta na fachada Norte.

#### 4.2.2 Carga térmica anual por pavimento

Para o entendimento mais aprofundado da inserção do contexto urbano nas simulações termo-energéticas foi realizada também uma análise da carga anual de resfriamento por pavimento para a tipologia T1 N e S II a para T2 N e S II, respectivamente, correspondentes à Figura 52 e Figura 53.

Figura 52: Carga por pavimento referente à Tipologia 1

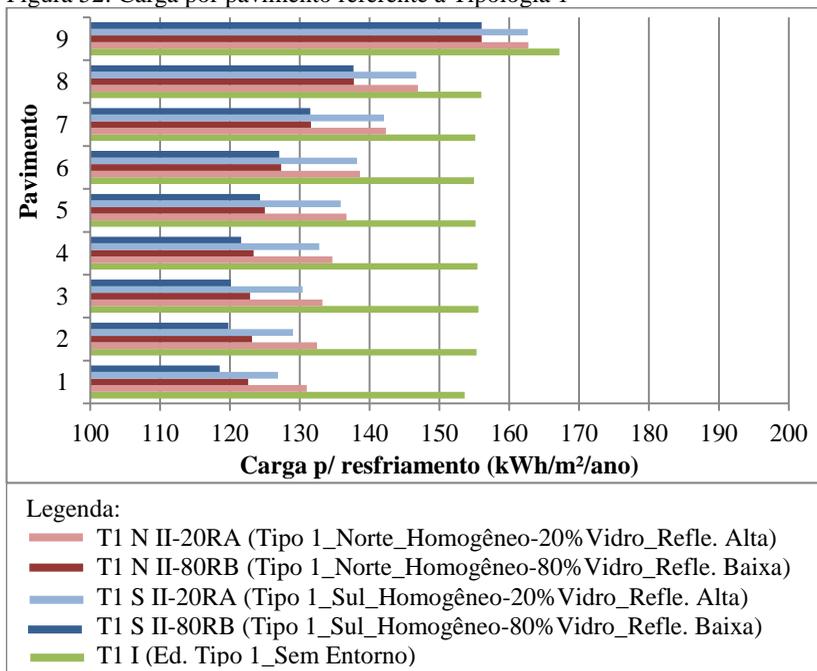
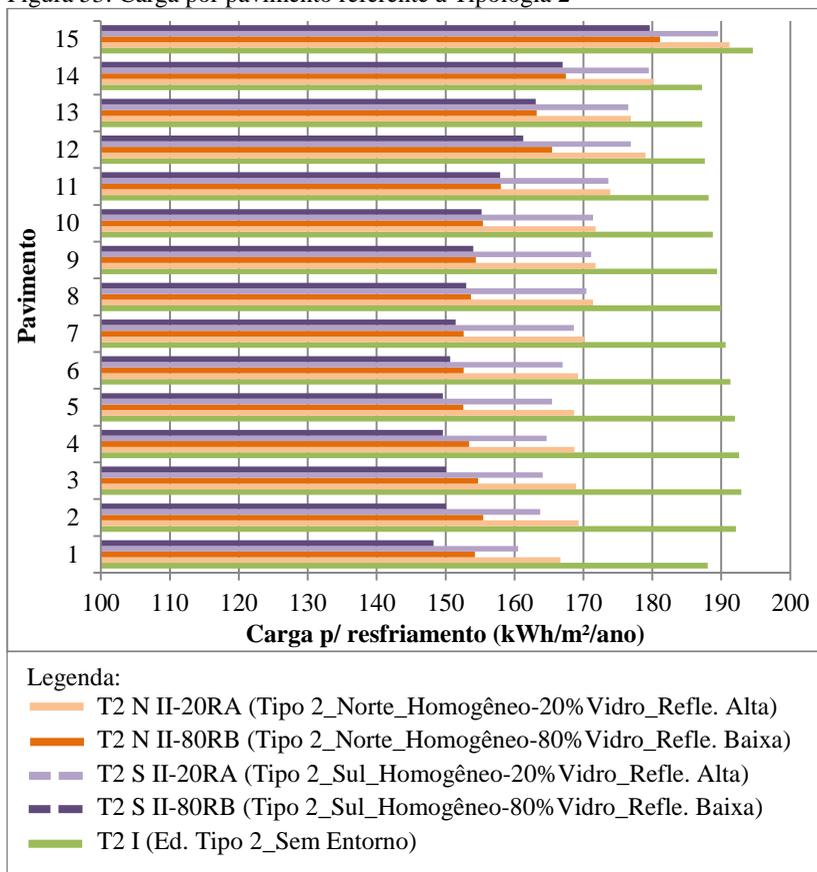


Figura 53: Carga por pavimento referente à Tipologia 2



Primeiramente destaca-se a grande influência do sombreamento na análise da carga por pavimentos. Enquanto no cenário sem entorno (I) a carga mantém-se bastante similar entre os diferentes pavimentos (exceto no último que tem influência da cobertura exposta), nos cenários urbanos há uma variação entre 13% e 24% entre os diferentes pavimentos. Nos cenários urbanos os pavimentos superiores possuem sempre a maior carga e a menor diferença em relação ao cenário sem entorno, e essa diferença é crescente quanto mais baixo o pavimento, resultante da maior obstrução da radiação nos pavimentos mais baixos e consequentemente menor carga necessária para resfriamento. No último pavimento a variação entre os cenários urbanos e o cenário sem entorno é de apenas 2% à 8% a depender do cenário urbano, enquanto no

primeiro pavimento essa variação alcança de 13% à 25%. Ressalta-se que as menores diferenças são sempre referentes aos cenários urbanos homogêneos 20RA e as maiores diferenças são sempre referentes aos cenários homogêneos 80RB, uma vez que as cargas do cenário com alta refletância (20RA) são mais altas, ficando mais próximas das cargas do cenário sem entorno.

Em relação às diferentes características do envelope do entorno (80RB e 20RA), a diferença entre ambos foi similar entre os diferentes pavimentos, de em média 8%, assim como na análise anual. Já a diferença das cargas dos cenários urbanos N e S em cada tipologia foram baixas em todos os pavimentos e foram ainda reduzindo com o aumento da altura dos pavimentos. Enquanto as diferenças dos valores entre os cenários N e S foram de 3% em média no primeiro pavimento, no último pavimento essa variação reduziu-se à quase 0%. As maiores diferenças considerando-se os cenários N e S em relação ao cenário sem entorno apresentam-se nos cenários S.

Esses resultados ressaltam a importância da consideração do entorno urbano nas simulações termo-energéticas uma vez que demonstra uma diferença de até 25% em determinados pavimentos em relação às simulações comumente realizadas (sem consideração do contexto urbano) dependendo das características do entorno e do pavimento em análise e uma diferença de até 24% entre os diferentes pavimentos de uma edificação que leva em conta o entorno urbano. A análise dos resultados de carga por pavimento ressaltam a importância de se levar em conta o sombreamento de entorno principalmente na análise dos pavimentos mais próximos ao solo, onde existe grande obstrução, o que interfere diretamente na carga térmica de edificações dentro de cidades com clima quente e úmido.

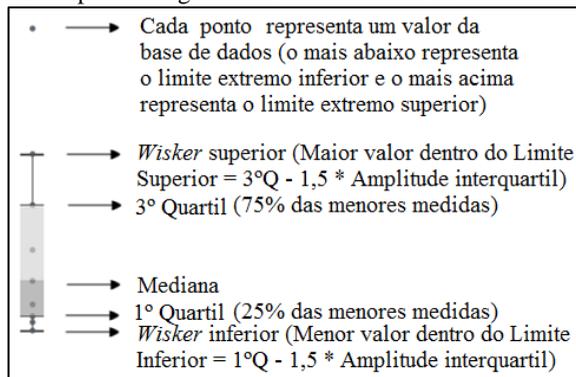
### **4.2.3 Carga térmica anual por orientação**

A análise por orientação foi realizada a partir dos valores de carga (kWh/m<sup>2</sup>/ano) obtidos para cada zona perimetral (ZN, ZS, ZL e ZO) em cada pavimento. Os resultados foram apresentados em forma de gráfico *boxplot* referente à tipologia 1 (Figura 55) e à tipologia 2 (Figura 56) por zona (eixo horizontal superior) e por cenário (I, II-20RA e II-80RB – eixo horizontal inferior). No gráfico cada caixa representa as medidas descritas na Figura 54.

É importante ressaltar que os pontos fora dos limites dos *whisker* (limite superior e inferior do elemento da barra) são considerados

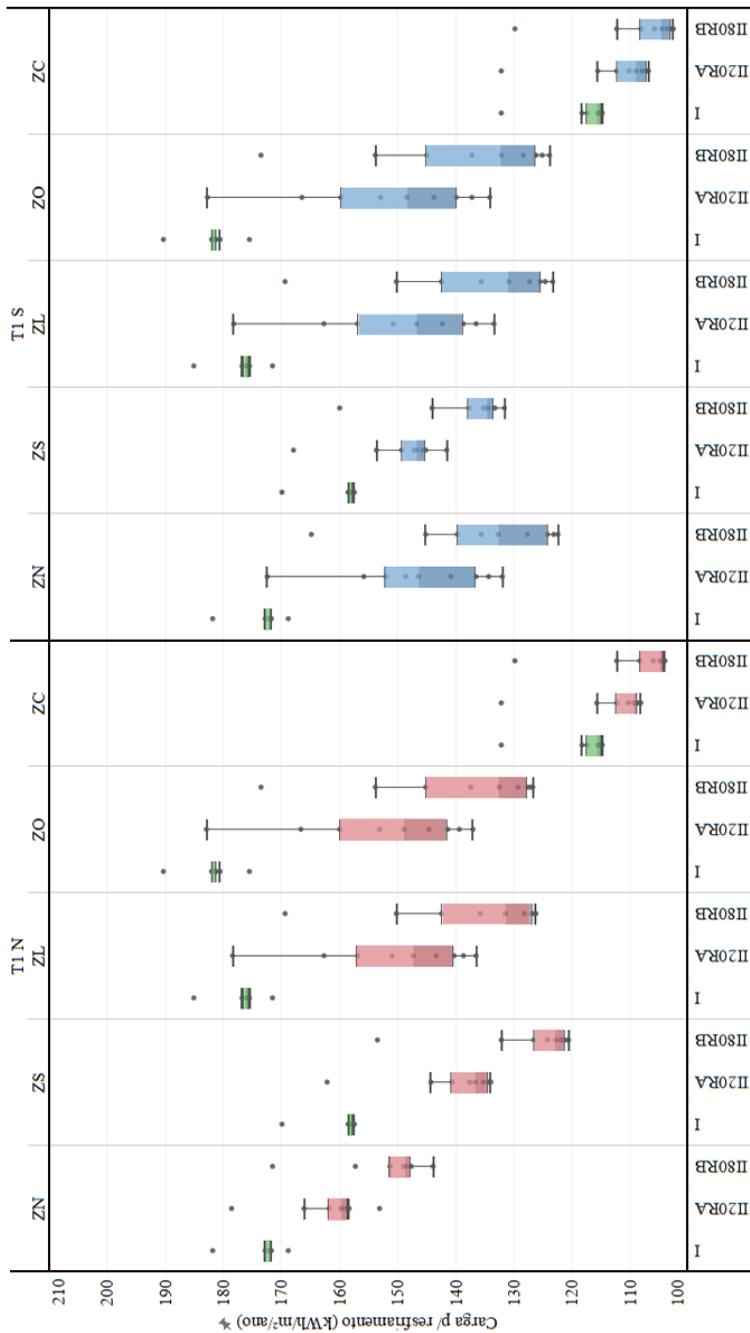
valores atípicos e que a amplitude interquartil é resultado da diferença entre o 3º quartil e o 1º quartil, indicando o grau de dispersão dos dados.

Figura 54: Exemplo de diagrama de caixa utilizado na análise dos resultados



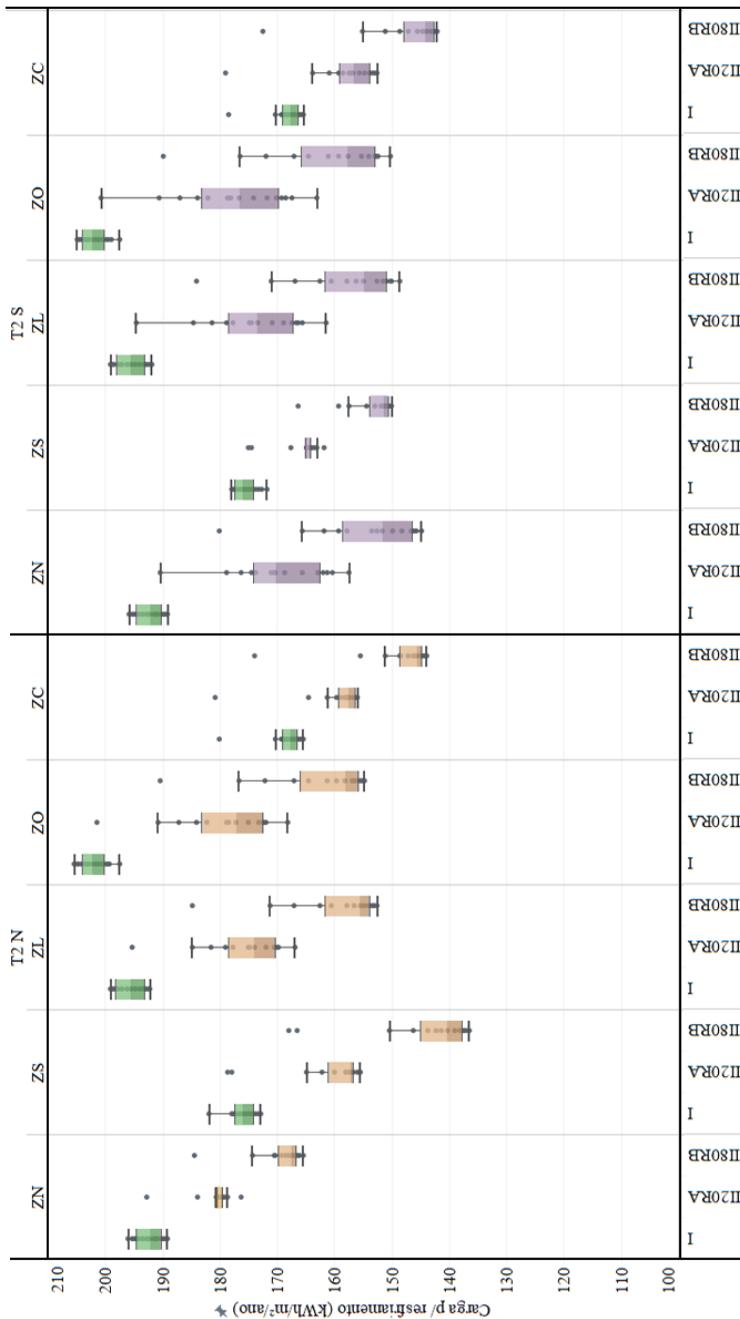
Em ambas as tipologias 1 e 2 e todas as orientações é possível observar a baixa variação da carga térmica do cenário sem entorno (I) entre os diferentes pavimentos. Esta variação é excepcionalmente baixa (1% a 2% para T1 N e S II e 2% a 4% para T2 N e S II) quando não se leva em conta os espúrios, caracterizados pelo valor de carga do primeiro pavimento, que sofre influência da temperatura mais amena do solo, e do último pavimento, que sofre a influência da radiação recebida a partir da cobertura. Quando ambos são levados em consideração essa variação entre os diferentes pavimentos do cenário isolado passa a ser 8% para T1 N e S II e 4% a 9% para T2 N e S II.

Figura 55: Carga térmica por orientação referente à tipologia I



- T1 N/S I (Ed. Tipo 1 ou 2\_Sem entorno)
- T1 N II (Ed. Tipo 1\_Norte\_Entorno Homogêneo) – 20RA (20% Vidro\_Refle. Alta) ou 80RB (80% Vidro\_Refle. Alta)
- T1 S II (Ed. Tipo 1\_Sul\_Entorno Homogêneo) – 20RA (20% Vidro\_Refle. Alta) ou 80RB (80% Vidro\_Refle. Alta)

Figura 56: Carga térmica por orientação referente à tipologia 2



- T2 N/S I (Ed. Tipo 1 ou 2\_Sem entorno)
- T2 N II (Ed. Tipo 2\_Norte\_Entorno Homogêneo) – 20RA (20% Vidro\_Refle. Alta) ou 80RB (80% Vidro\_Refle. Alta)
- T2 S II (Ed. Tipo 2\_Sul\_Entorno Homogêneo) – 20RA (20% Vidro\_Refle. Alta) ou 80RB (80% Vidro\_Refle. Alta)

É importante ressaltar também que os valores do cenário sem entorno (em verde) em cada orientação estão sempre acima dos valores referentes aos cenários urbanos, isso porque esse não considera o sombreamento proporcionado pelo entorno urbano, diferentemente dos cenários urbanos.

Outro resultado comum a todas as tipologias foi a baixa variação de carga entre os pavimentos na zona central em todos os cenários, inclusive os urbanos. A zona central é a única entre as cinco zonas que não possui contato direto com o meio exterior e dessa forma necessitam de menor carga para resfriamento, já que não possui contato direto com a radiação (exceto no pavimento da cobertura). Ainda assim percebe-se que os valores de carga da zona central dos cenários urbanos são sempre abaixo dos valores do cenário sem entorno. Isso porque as zonas perimetrais possuem certa influência na zona central, e quanto mais quentes, mais calor será transferido para o centro.

É possível observar também que considerando cada orientação separadamente houve maior variação de carga entre os pavimentos na tipologia 1 (até 37%) em relação à tipologia 2 (até 23%), principalmente nas zonas com fachadas mais obstruídas. A maior variação pode ser explicada devido ao fato da tipologia 1 ser mais adensada, e dessa forma possuir maior diferença entre os valores de carga dos pavimentos mais baixos, com bastante obstrução, para os pavimentos mais altos, com menor obstrução. Já a tipologia 2, que possui maior afastamento entre as edificações, possui uma diferença menor de obstrução entre os diferentes pavimentos. A maior variação ocorre nas fachadas Leste e Oeste, pois são as fachadas mais obstruídas, seguidas pela fachada sul, para os cenários N ou para a fachada Norte, para os cenários S.

Dessa forma conclui-se que quanto mais obstruída as fachadas, ou seja, quanto mais adensado o contexto urbano, maior é diferença de carga entre os pavimentos de zonas com a mesma orientação. Esta diferença é menor, no entanto, nas fachadas principais dos edifícios, voltadas para a rua, pois possuem maior afastamento em relação ao seu entorno.

### 4.3 RADIAÇÃO INCIDENTE NAS ABERTURAS

Nos resultados referentes à carga para resfriamento foi possível observar a grande influência da radiação solar em seus valores. Dessa forma, aqui se apresentam os valores de radiação incidente nas aberturas, locais que representam a maior transferência de calor da edificação, para o 2º, 5º e 8º pavimento para a tipologia 1 e 2º, 8º e 14º

pavimento para a tipologia 2. O objetivo é demonstrar a variação da incidência de radiação no pavimento inferior, superior e intermediário, sem a influência da temperatura do solo e da cobertura.

O resultado de radiação incidente é apresentado em seu valor total nos gráficos de barras, subdividido pelas seis componentes de radiação que resultam nesse valor: (1) radiação direta do sol (vermelho), (2) radiação difusa do céu (azul), (3) radiação direta e difusa do céu refletida de forma difusa pelo solo (verde), (4) radiação difusa do céu refletida de forma difusa por uma superfície opaca (roxo), (5) radiação direta do céu refletida de forma direta por uma superfície translúcida (amarelo) e (6) radiação direta do céu refletida de forma difusa por uma superfície opaca (laranja). Estes valores são representados na Figura 57 (T1 N), Figura 58 (T1 S), Figura 59 (T2 N) e Figura 60 (T2 S) divididos no eixo horizontal inferior por zona (ZN, ZS, ZL e ZO), por pavimento (2°, 5° e 8° ou 2°, 8° e 14°) e por cenário (I, II-20RA e II-80RB).

Nas figuras foi possível observar que os valores de radiação incidente nos casos sem entorno são muito próximos entre os diferentes pavimentos para cada uma das orientações e que seus valores são sempre significativamente superiores que os valores de incidência dos cenários urbanos, ressaltando assim a falta de fidelidade de uma simulação que não leva em conta o entorno urbano.

Já quando os cenários urbanos são analisados separadamente, é possível observar uma crescente incidência de radiação total em todas as orientações com o aumento da altura do andar do pavimento. Este crescimento é provocado pelo aumento principalmente das radiações direta e difusa do céu. É importante ressaltar que, entre as radiações que compõem a radiação solar total, apenas a refletida do solo sofre uma redução de incidência com o aumento do andar dos pavimentos nos contextos urbanos.

Quanto mais alto o pavimento nos casos urbanos, mais perto dos valores do cenário sem entorno, porém com a composição de radiação diferente. Na comparação entre cenários sem entorno e urbanos, apenas a radiação direta possui valor semelhante entre eles. A radiação difusa e do solo são bem menores nos cenários urbanos que no sem entorno e nos cenários com entorno com 20% de área envidraçada e alta refletância é possível notar também a existência dos demais tipos de radiação (direta e difusa refletida por uma superfície), provenientes das superfícies de entorno, que tornam o valor total mais próximos do cenário sem entorno. Ou seja, mesmo nos pavimentos mais altos o entorno faz diferença significativa na radiação incidente, e na forma em que esta é proveniente.

Figura 57: Radiação incidente nas aberturas referente à tipologia 1 N

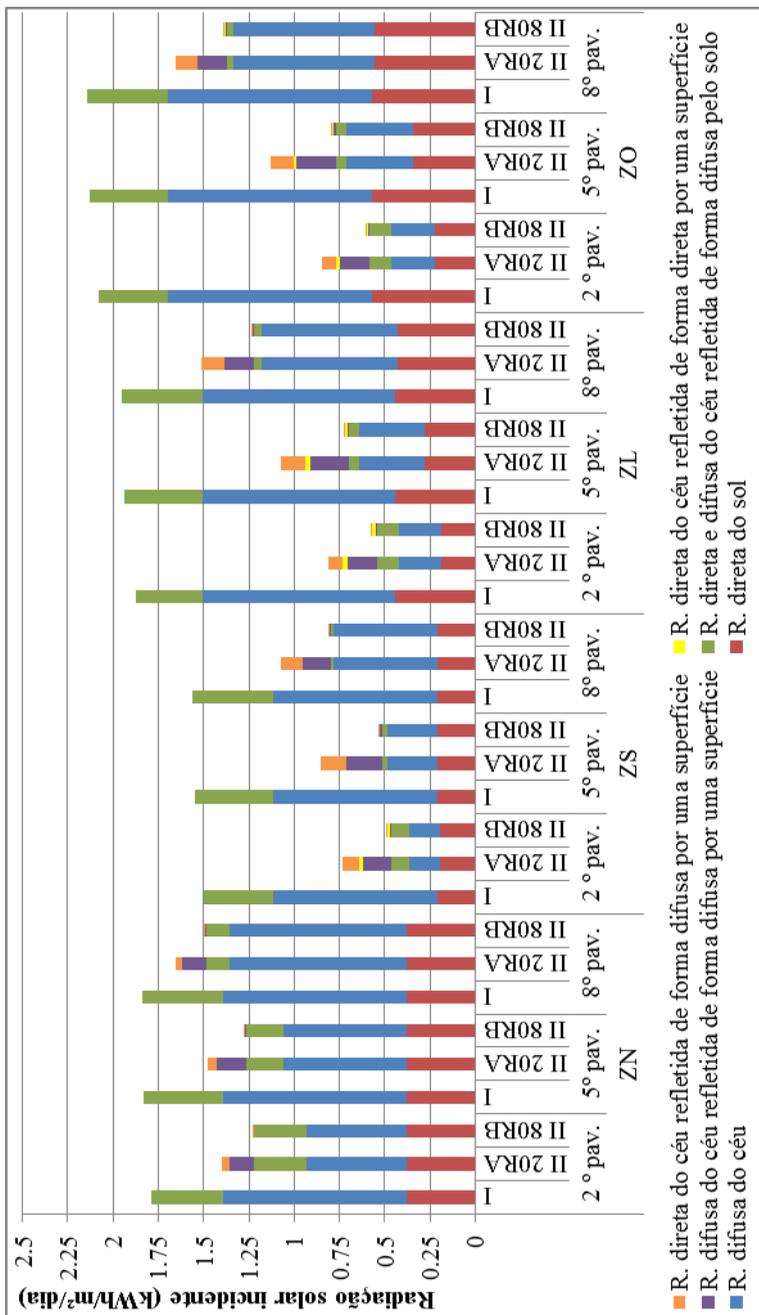


Figura 58: Radiação incidente nas aberturas referente à tipologia 1 S

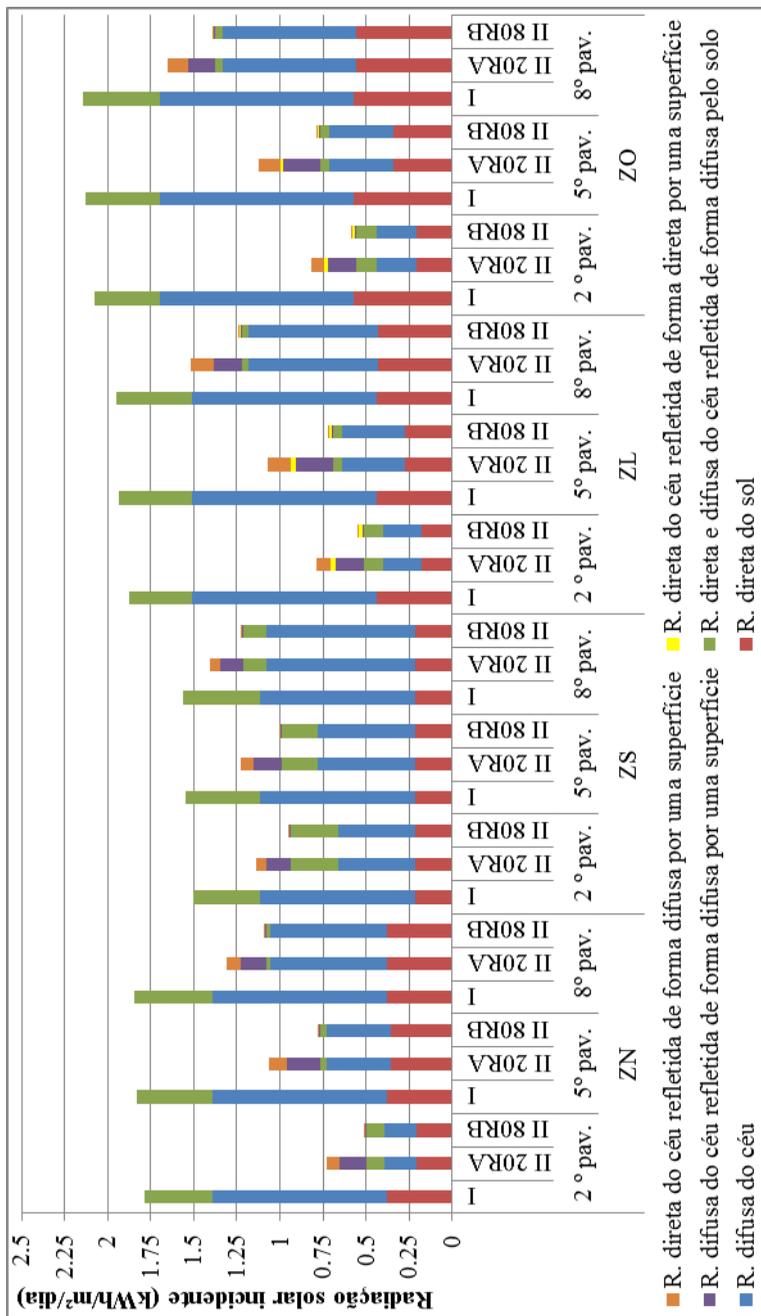
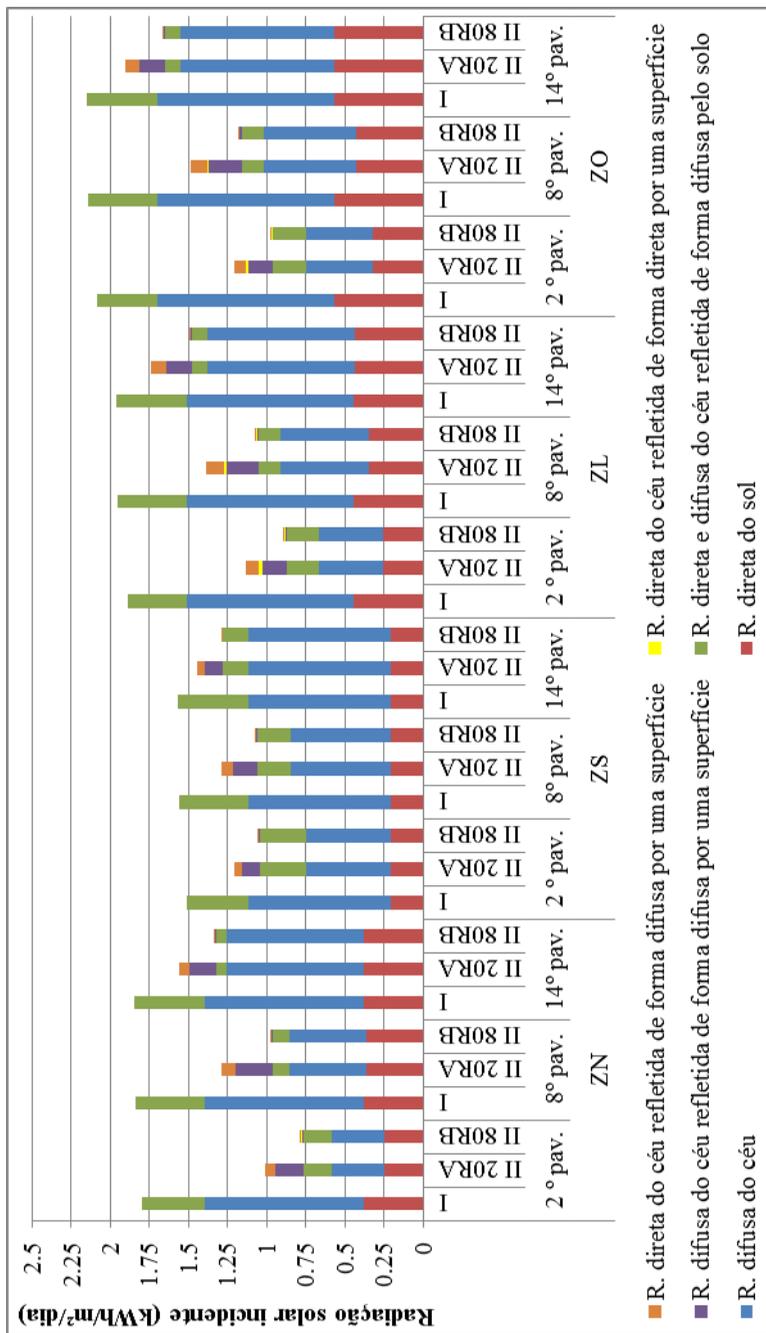




Figura 60: Radiação incidente nas aberturas referente à tipologia 2 S



É importante ressaltar também que em todos os cenários, zonas e pavimentos a radiação difusa teve maior influência que os demais tipos de radiação, inclusive maior que a radiação direta, principalmente nos casos sem entorno (I). Estes resultados demonstram também a necessidade de prestar atenção não só na radiação direta, pois esta, em todos os contextos estudados, representou entre 22 e 34% do total, enquanto a radiação difusa representou entre 42% e 56%.

Comparando-se os dois contextos urbanos homogêneos (II), observa-se valores idênticos referentes à radiação direta, difusa e refletida do solo. A diferença da 20RA e 80RB se dá pela presença de radiação refletida por superfícies do entorno na primeira (radiação direta e difusa refletida de forma direta), resultante de sua maior refletância, enquanto na segunda grande parte da radiação que atinge as superfícies verticais do entorno está sendo absorvida. Este resultado não indica que deverão ser utilizadas cores de baixa refletância em cidades de clima quente para que se reduza a radiação incidente nas edificações do entorno, e sim que diferentes características do contexto urbano provocam diferentes valores de radiação incidente e conseqüentemente carga.

A diferença na radiação incidente entre os dois contextos urbanos pode ser observado na Tabela 4. Na tipologia 1 as diferenças foram superiores às diferenças da tipologia 2 indicando que em um contexto mais adensado a modificação das características dos envelope das edificações de entorno possuem maior impacto na quantidade de radiação solar incidente nas aberturas. Já a geometria da tipologia 2 possui maiores afastamentos entre os edifícios e conseqüentemente o impacto da radiação incidente das superfícies de entorno é menor.

Nos resultados referentes aos cenários N foi possível observar uma menor diferença entre os valores dos cenários urbanos na fachada norte e nos cenários S foram observadas menores diferenças na fachada Sul (menores resultados destacados em negrito). Este resultado é também devido ao maior afastamento desta fachada em relação ao entorno (presença da rua) considerando a maior proximidade das demais fachadas que possuem lotes e edificações adjacentes. Ainda por essa razão nos cenários N as menores incidências ocorram na zona sul, enquanto nos cenários S as menores incidências ocorrem na zona norte.

Tabela 4: Diferença de incidência da radiação solar entre os cenários urbanos homogêneos II 20RA e II 80RB considerando os três pavimentos de análise

	<b>T1 N</b>	<b>T1 S</b>	<b>T2 N</b>	<b>T2 S</b>
<b>ZN</b>	<b>14%</b>	33%	<b>11%</b>	26%
<b>ZS</b>	47%	<b>20%</b>	36%	<b>16%</b>
<b>ZL</b>	38%	38%	24%	24%
<b>ZO</b>	34%	34%	21%	21%

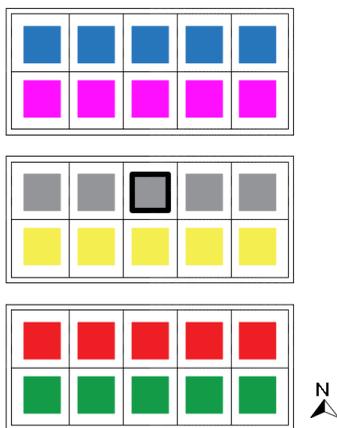
Para o auxílio da análise da radiação solar incidente foram elaboradas no *software* Apolux as máscaras de sombra para cada abertura nas orientações e pavimentos de análise, para a tipologia 1 N (Quadro 7) e 2 N (Quadro 8). A altura utilizada como base foi de 1,5m a partir do piso de cada pavimento analisado e a localização do observado no centro da largura da abertura, que se estende por toda a fachada do edifício. As cartas para as tipologias 1 S e 2 S não foram elaboradas uma vez que representam os mesmos sombreamentos, apenas invertendo-se a fachada Norte pela Sul e vice-versa.

A Figura 61 indica as cores referentes nas máscaras de sombra do Quadro 7 de cada fileira de edifícios do entorno urbano, com destaque em preto para a edificação de análise, a partir da qual foram realizadas as máscaras apresentadas em seguida. Já a Figura 62 é referente às máscaras apresentadas no Quadro 8.

A partir das cartas foi possível entender a ocorrência de fenômenos diferentes em cada fachada. Nas fachadas Norte e Sul, em que é possível observar que as obstruções não atingem ou atingem pouco as linhas de trajetória do sol, a radiação incidente direta é igual em todos os pavimentos tanto dos cenários urbanos quanto nos pavimentos do cenário sem entorno. Já nas orientações Leste e Oeste é possível observar que o sombreamento atinge as horas de sol com radiação direta e esse sombreamento é reduzido com o aumento da altura dos pavimentos. No pavimento superior a radiação direta incidente já é praticamente igual ao cenário sem entorno.

Este fato explica a maior variação de incidência e conseqüentemente de carga entre os pavimentos inferiores e superiores das orientações Leste e Oeste em relação às demais, observados nos resultados de incidência apresentados anteriormente e nos resultados de carga por orientação apresentados no tópico 4.2.3.

Figura 61: Indicação de cores referentes às máscaras de sombra para tipologia 1



Quadro 7: Máscaras de sombra do cenário T1 N

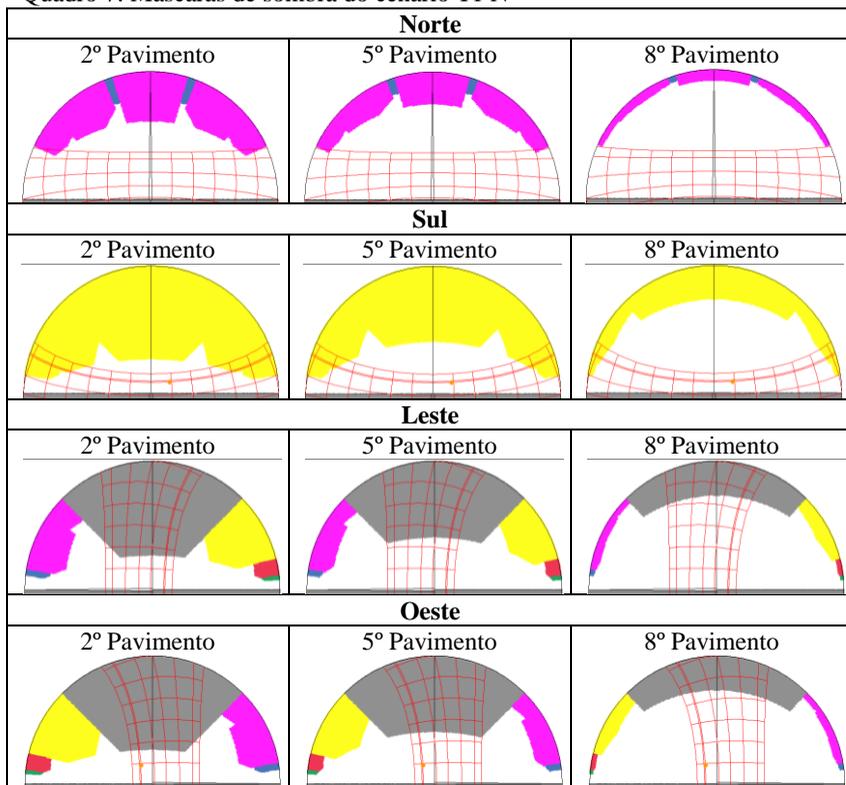
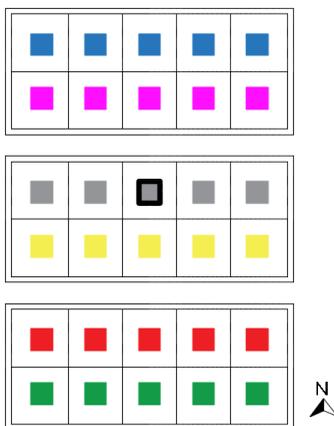
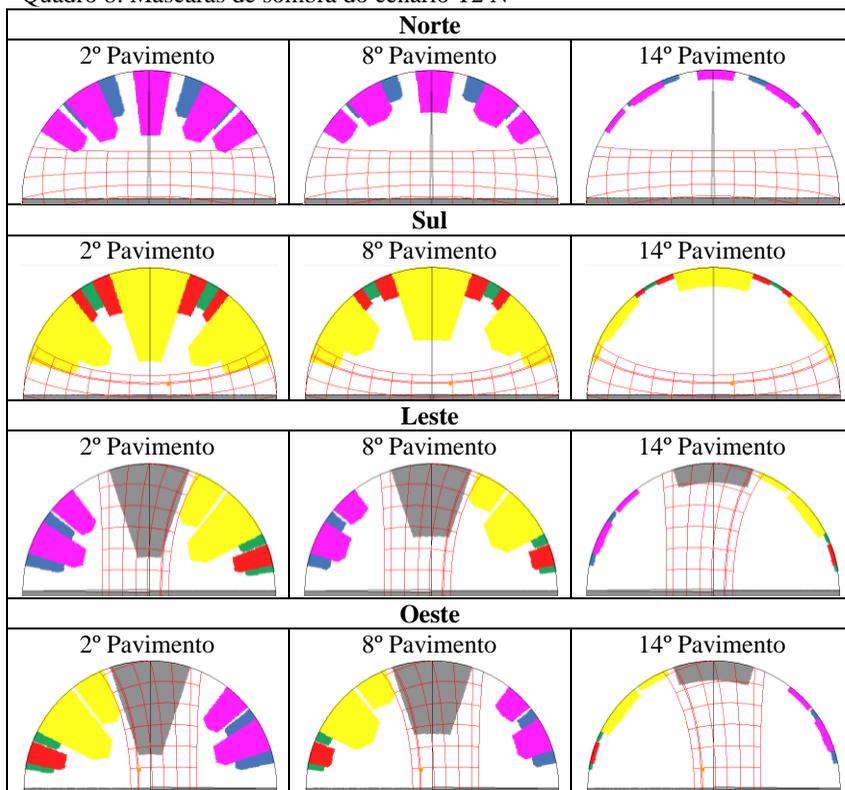


Figura 62: Indicação de cores referentes às máscaras de sombra para tipologia 2



Quadro 8: Máscaras de sombra do cenário T2 N



Em relação à radiação difusa, essa é crescente com a altura dos pavimentos em todos os cenários urbanos, porém apenas na fachada Norte (ou fachada Sul quando se considera os cenários S) a radiação difusa consegue se igualar com a difusa do cenário sem entorno no pavimento superior. Nas demais orientações, nas quais a proximidade entre os prédios é maior, mesmo nos pavimentos superiores a radiação difusa é superior no cenário sem entorno devido ao sombreamento ainda existente até nesses andares nos cenários urbanos.

A radiação refletida do solo, que varia bem pouco nos diferentes pavimentos do cenário sem entorno (como a difusa e direta) é decrescente nos cenários urbanos com o aumento da altura dos pavimentos e seu valor é bem menor quando comparado ao cenário sem entorno. Essa é igual entre ambos os cenários urbanos para todos os pavimentos e orientações uma vez que cada pavimento de cada orientação de ambos os cenários urbanos “enxergam” igual quantidade de solo e a refletância do solo é igual em todos os casos.

Os demais tipos de radiação são inexistentes no cenário sem entorno e praticamente constantes nos diferentes pavimentos de cada orientação dos cenários urbanos, sendo muito baixas no cenário 20RB e significativa no cenário 80RA. A existência desses 3 tipos de radiação no cenário 80RA e inexistência no cenário 20RB possui bastante influência na diferença de carga entre esses dois cenários urbanos, uma vez que as demais radiações (direta, difusa e refletida do solo) são iguais entre eles, já que a geometria do entorno é igual. A diferença de radiação entre esses dois cenários urbanos é de em média 28%, enquanto a diferença na carga anual é de 33%, indicando uma relação entre a radiação incidente e a carga térmica.

Para melhor entendimento dessa relação foram elaborados gráficos de dois eixos, um indicando a radiação total incidente e outro indicando a carga térmica, em que é possível observar a grande correlação entre ambas nos diferentes pavimentos, orientações e cenários de análise.

Todos os padrões da radiação incidente total como aumento e redução, variação entre os cenários em cada pavimento e valor de uma orientação em relação à outra existiram também na carga térmica, e podem ser observados no APÊNDICE F.

Observa-se então que a análise da radiação incidente nas aberturas demonstrou a grande correlação entre essa e a carga térmica para cidade com clima quente e úmido, tanto nas avaliações de cenários sem entorno quanto nos cenários urbanos. A análise dos diferentes tipos

de radiação que compõem a radiação total foi capaz de demonstrar detalhadamente a razão das diferenças de carga entre os diferentes cenários e orientações, ressaltando as diferenças de radiação direta do sol, difusa do céu e refletida do solo entre os cenários sem entorno e urbanos, e destacando a presença de radiação refletida dos elementos verticais para cenários urbanos com edificações de envelope com alta refletância. Já as máscaras de sombra foram essenciais para o entendimento da variação da radiação incidente em cada orientação.



## 5 CONCLUSÕES

Neste capítulo são apresentadas as conclusões obtidas a partir das análises dos resultados da presente pesquisa, assim como serão apontadas as limitações do estudo e sugestões para futuros trabalhos.

Algumas conclusões apresentadas a seguir puderam ser feitas a partir das simulações computacionais realizadas considerando edificações de uso comercial, especificamente de escritórios, dentro de diferentes contextos urbanos na cidade de Maceió, caracterizada pelo clima tropical quente e úmido.

Primeiramente destaca-se a importância da consideração das diferentes mudanças proporcionadas pela presença de entorno urbano nas simulações computacionais, sejam elas climáticas (variáveis ambientais), referentes à geometria ou referentes ao aproveitamento da luz natural, já que os resultados demonstraram uma redução entre 16% e 18% na carga para resfriamento dos cenários urbanos homogêneos em relação aos cenários sem entorno (como as simulações termo-energéticas são comumente realizadas), uma vez que este conjunto de modificações é considerado na simulação.

Concluiu-se ainda que as modificações referentes à geometria do entorno urbano possuíram maior impacto na carga térmica anual (redução média de 20%) comparada à modificação climática (aumento de 3%) e a modificação referente ao aproveitamento de luz natural (redução média de 4,5%), e que quanto mais adensado o contexto urbano maior a influência da geometria em relação as demais modificações. A análise detalhada do impacto da geometria demonstrou ainda que o sombreamento resultante da inserção da geometria do entorno no modelo possuiu grande impacto na alteração da carga térmica (14% a 16%), enquanto o impacto da reflexão solar limitou-se entre 3% e 4%.

Os resultados da modificação climática indicaram que o efeito ilha de calor urbano, do ponto de vista energético, não acarretou em um grande aumento de carga para resfriamento, pois o horário de funcionamento do edifício (8h às 18h) não coincide com o horário de maiores diferenças de temperatura entre o EPW INMET 2016 e o EPW UWG (urbano). Já as modificações resultantes do aproveitamento de iluminação natural resultaram em uma redução de 3,5% a 5,5% na carga térmica, onde a maior diferença ocorreu no cenário com menor densidade e maiores afastamentos, como esperado.

Os cenários de análise foram compostos foram quatro variáveis: (i) tipo da edificação de análise, (ii) localização do lote da edificação de

análise, (iii) tipo de entorno e (iv) características do envelope das edificações de entorno (apenas para os cenários com entorno homogêneo).

A partir dos resultados de carga térmica anual foi possível concluir em relação à variável (i) que a edificação de análise do tipo 1 (que possui 9 pavimentos, maior ocupação no terreno e menores afastamentos) apresentou cargas significativamente mais baixas que a do tipo 2 (que possui 15 pavimentos, menor ocupação no terreno e maiores afastamentos), pois apesar de ambas as tipologias possuírem semelhante área superficial externa, a sua influência é maior no tipo 2, pois suas zonas perimetrais correspondem a 95% da área de cada pavimento e correspondem à apenas 70% no tipo 1. Já em relação à variável (ii) não houveram diferenças muito significativas de carga entre a localização N (que possui fachada principal voltada para o Norte) ou S (que possui fachada principal voltada para o Sul) da edificação de análise, sendo que as cargas das edificações localizadas no lote N foram sempre um pouco superiores uma vez que a fachada Norte recebe radiação direta em 60% das horas do ano enquanto a fachada Sul recebe radiação direta em 40% das horas do ano. Ressalta-se também que, apesar da pouca diferença na carga anual, a análise mensal demonstrou uma diferença de até 7% no mês de julho. Os resultados do tipo de entorno (iii) demonstraram que quanto mais adensado o entorno urbano, menor é a carga necessária para resfriamento já que o sombreamento é um fator de grande influência na carga térmica como visto anteriormente.

Considerando a variação paramétrica das características do envelope das edificações de entorno realizadas a partir dos cenários homogêneos (iv), foi possível observar que: quanto maior a refletância das edificações de entorno maior a carga térmica da edificação de análise e que, quanto maior a porcentagem de área envidraçada do entorno menor a carga térmica do edifício de análise. Dessa forma, a menor carga necessária para resfriamento da edificação de análise resultou da combinação do entorno de baixa refletância e 80% de área envidraçada e a maior carga da combinação de alta refletância e 20% de área envidraçada. A diferença na carga entre esses dois extremos foi de 8% ( $10\text{kWh/m}^2/\text{ano}$  %) para a tipologia mais adensada (1) e de 9% ( $15\text{kWh/m}^2/\text{ano}$ ) para a tipologia 2.

É importante salientar que este resultado é limitado pela não consideração da radiação de onda longa dos edifícios de entorno e pela baixa variação da refletância adotada entre a parede e o vidro. Além disso, esses não indicam que as edificações dentro de contextos urbanos devam adotar envelopes de baixa refletância e alta área envidraçada,

indica apenas que as características do entorno urbano, como no caso cor e porcentagem de área envidraçada, possuem influência da análise de carga de edificações dentro de contextos urbanos, e por isso devem ser levadas em consideração nas simulações termo-energéticas.

De modo geral, envelopes caracterizados por baixa refletância a alta porcentagem de área envidraçada nas fachadas não são recomendados para edifícios localizados em cidades de clima quente e úmido, pois podem aumentar o desconforto térmico tanto nos ambientes internos da edificação quanto para os ambientes urbanos que a circundam, além de promover um aumento na carga térmica do edifício que adota tais características. Dessa forma, como indicado na revisão de literatura, a utilização de cores claras no envelope dos edifícios é incentivada, desde que não resulte em um efeito negativo para o espaço exterior (FROTA; SCHIFFER, 2001; GIVONI, 1998; ROMERO, 2001).

Os resultados referentes à carga térmica analisada de forma detalhada por mês do ano, por pavimento e por zona foram importantes para destacar a grande influência da radiação solar incidente nas superfícies verticais de cenários urbanos, ressaltando a importância e necessidade de consideração do entorno urbano nas simulações termo-energéticas de edificações dentro de centros urbanos.

A análise mensal demonstrou-se importante por salientar que a baixa diferença anual (1%) entre os valores de carga dos cenários de localização N e S do lote considerando o mesmo entorno urbano, não é constante durante todo o ano. Nos resultados mensais a diferença apresenta-se significativa apenas no período do inverno, no qual as cargas referentes ao cenário N aumentam devido à incidência de radiação direta na fachada Norte, alcançando uma diferença de até 7% em relação ao cenário S no mês de julho. Dessa forma, destaca-se que entre maio e julho a diferença de carga será sim significativa entre os cenários N e S de igual entorno urbano.

Na análise por pavimentos constatou-se a grande influência do sombreamento provocado pelo entorno urbano na carga térmica da edificação de análise uma vez que a carga térmica necessária para cada pavimento dos cenários urbanos foi crescente quanto mais alto o pavimento, enquanto nos cenários sem entorno foi praticamente constante entre os diferentes pavimentos. A diferença de até 25% em determinados pavimentos em relação às simulações comumente realizadas (sem consideração do contexto urbano) dependendo das características do entorno e do pavimento em análise ressaltam a importância de se levar em conta o sombreamento de entorno

principalmente na análise dos pavimentos mais próximos ao solo, em que existe grande obstrução.

A diferença máxima entre os pavimentos dos cenários urbanos, considerando toda a edificação, foi de 24%, enquanto a diferença máxima entre os pavimentos referente aos cenários sem entorno foi de 8%. Este fato foi ainda reforçado de acordo com os resultados por orientação, que indicou uma baixa variação dos resultados de carga entre os diferentes pavimentos de cada orientação do cenário sem entorno, de 1% quando são desconsiderados espúrios referentes ao pavimento térreo em contato com o solo e ao último pavimento com cobertura exposta, enquanto nos cenários urbanos esta variação alcançou 25%, também se desconsiderando os espúrios e até 37% considerando-os para a orientação Oeste.

A variação de carga térmica entre os diferentes pavimentos da edificação foram superiores nos cenários da tipologia 1 em relação aos cenários da tipologia 2 uma vez que a diferença de obstrução do pavimento térreo em relação ao pavimento superior é muito maior na tipologia 1. Este resultado, mais uma vez, ressalta a necessidade de modelagem do entorno urbano, uma vez que a sua adoção resultará em uma carga mais realista considerando cada pavimento.

Já em relação aos resultados de carga por orientação também observou-se que, como esperado, a zona central apontou a menor carga em relação às zonas perimetrais, e que essa possui pouca diferença de carga entre os diferentes pavimentos. Dessa forma é importante ressaltar que, quando não há aproveitamento de iluminação natural, uma solução de projeto visando um menor consumo de carga térmica pode ser o deslocamento da área de circulação vertical da área central do edifício, onde comumente são localizadas, para uma área perimetral, já essas são áreas de baixa permanência que não demandam condicionamento artificial, já que as áreas perimetrais demandariam mais carga térmica que a área central.

Além disso, a análise das cargas por diferentes orientações foram importantes para observar que quanto mais obstruída as fachadas, ou seja, quanto mais adensado o contexto urbano, maior a diferença de carga entre os pavimentos mais altos e mais baixos. Esta diferença é menor, no entanto, nas fachadas principais dos edifícios, voltadas para a rua, pois possuem maior afastamento em relação ao seu entorno. De forma geral, as diferenças entre os pavimentos são maiores nas orientações leste e oeste em relação às orientações norte e sul uma vez que o sombreamento proporcionado pelo entorno altera a radiação direta

do sol, quanto no norte e sul atinge praticamente apenas a radiação difusa do céu.

Já os resultados de radiação solar incidente a as máscaras de sombra elaboradas serviram principalmente para auxiliar o entendimento das variações de carga térmica entre os diferentes cenários, pavimentos e orientação de análise. Esta análise demonstrou a grande correlação entre a radiação solar incidente e a carga térmica tanto nas avaliações de cenários sem entorno quanto nos cenários urbanos. A análise dos diferentes tipos de radiação que compõem a radiação total foi capaz de demonstrar detalhadamente a razão das diferenças de carga entre os diferentes cenários e orientações, ressaltando as diferenças de radiação direta do sol, difusa do céu e refletida do solo entre os cenários sem entorno e urbanos, e destacando a presença de radiação refletida dos elementos verticais para cenários urbanos com edificações de envelope com alta refletância. Já as máscaras de sombra foram essenciais para o entendimento da variação da radiação incidente em cada orientação.

Dessa forma, verifica-se o grande impacto da radiação solar nas análises termo-energéticas de simulações que consideram o contexto urbano e destaca-se a grande importância do papel do sombreamento nas cidades de clima quente, que é um elemento que influi positivamente no conforto dos usuários neste clima e ainda reduz a necessidade de carga para resfriamento.

Por fim, considerando todas as análises apresentadas no presente trabalho se conclui que não se pode dispensar o entorno nas simulações computacionais termo-energéticas de edificações dentro de contextos urbanos e se evidencia a falta de *softwares* e, conseqüentemente, de análises que agreguem todas as modificações causadas pelo contexto urbano. Além disso, concluiu-se que considerando o contexto climático e os cenários de análise, o adensamento urbano, do ponto de vista energético, pode ser considerado uma boa estratégia urbana visando à redução da carga térmica de edificações comerciais com horário de funcionamento diurno.

## 5.1 LIMITAÇÕES

Por tratar-se de uma análise anual da carga térmica, o impacto da modificação da ventilação natural a da radiação de onda longa resultantes da inserção do entorno urbano foram as principais limitações do presente estudo, uma vez que o *software* de simulação termo-energética utilizado (EnergyPlus) ainda não captura esses efeitos de forma apropriada e os *softwares* capazes de realiza-los simulam

resultados para apenas poucos dias do ano devido ao alto tempo de simulação demandado, inviabilizando uma análise anual.

Visando à redução dessas limitações que envolvem a análise anual da energia levando em conta o contexto urbano algumas atualizações estão sendo implantadas nos programas computacionais. O *software* UWG em sua nova versão (4.1) realiza, além da modificação de temperatura e umidade do ar, a modificação também da velocidade do vento que atinge as superfícies urbanas para o cálculo da transferência de calor convectivo sensível entre as paredes externas e o ar do cânion. Já o *software* EnergyPlus, a partir da versão 8.8, passou a permitir a inserção da temperatura e fator visão de céu das superfícies de entorno, visando a consideração da radiação de onda longa, ainda que de forma inicialmente limitada em relação ao número de superfícies de entorno. Estas atualizações indicam um avanço na análise do impacto da inserção do contexto urbano nas simulações termo-energéticas dinâmicas.

O comportamento dos usuários também é apontado como uma limitação, uma vez que sua interação com o meio pode alterar os resultados de uma simulação computacional.

## 5.2 SUGESTÕES PARA FUTUROS TRABALHOS

Primeiramente, propõe-se para futuros trabalhos a investigação da influência das duas principais limitações (ventilação e onda longa) em conjunto com as demais modificações proporcionadas pelo entorno urbano no desempenho energético das edificações.

Em relação às modificações na geometria, essas foram limitadas ao desenho urbano de uma porção da cidade de Maceió. Dessa forma, novas tipologias de entorno urbano poderiam ser avaliadas como, por exemplo, com maior ou menor densidade, diferentes relações entre lotes e vias ou diferentes tipologias de topografia, buscando um maior banco de dados para agregar ao presente estudo.

Futuros estudos poderiam ser realizados ainda em outras cidades do país, abrangendo regiões climáticas com diferentes padrões de variáveis como: temperatura, umidade, velocidade do vento, precipitação e nebulosidade.

Seria interessante também a realização de medições em campo paralelamente às simulações do *software* UWG, visando à comparação dos valores de ambos, para observar a precisão dos dados simulados. As medições *in loco* poderiam servir ainda como dado de entrada para as simulações termo-energéticas para uma análise comparativa entre seus

resultados de carga térmica e os resultados referentes às simulações do UWG.

Além disso, propõe-se também uma análise mais aprofundada em relação ao impacto do aproveitamento de iluminação natural na carga térmica dos edifícios analisados, assim como uma análise integrada do impacto do aproveitamento da iluminação natural no consumo energético total da edificação, avaliando-se seu impacto tanto na carga térmica quanto na carga para iluminação artificial.

A presente pesquisa analisou o impacto da inserção do contexto urbano em simulações computacionais apenas do ponto de vista do desempenho energético da edificação. De forma complementar poderiam ser realizadas também análises desse impacto no conforto térmico dos usuários tanto do interior da edificação quanto do ambiente externo urbano.



## REFERÊNCIAS

ABNT. NBR 15220-3 - Desempenho térmico de edificações parte 3: Zoneamento bioclimático brasileiro e diretrizes construtivas para habitações unifamiliares de interesse social. **Associação Brasileira de Normas Técnicas**, p. 23, 2003.

ABNT. NBR 16401 - Instalações de ar-condicionado - Sistemas centrais e unitários. **Associação Brasileira de Normas Técnicas**, 2008.

ABNT. NBR ISO/CIE 8995-1: Iluminação de ambientes de trabalho. **Associação Brasileira de Normas Técnicas**, p. 54, 2013.

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

ALVES, C. A.; DUARTE, D. H. S.; GONÇALVES, F. L. T. **Resiliência das edificações às mudanças climáticas na região metropolitana de São Paulo. Parte 1: revisão crítica e contextualização**. XII Encontro Nacional e IX Encontro Latino-americano de Conforto no Ambiente Construído. ENCAC. **Anais...2015**

ANVISA. **Resolução - RE nº 9, de 16 de janeiro de 2003**, 2003.

ASHRAE. **STANDARD 90.1. Energy standard for buildings except low-rise residential buildings**, 2004.

ASHRAE. **STANDARD 55. Thermal Environmental Conditions for Human Occupancy**, 2013.

BARBIRATO, G.; TORRES, S.; BARBOSA, R. Espaços Livres E Morfologia Urbana : Discussões Sobre Influências Na Qualidade Climática E Sustentabilidade Urbana a Partir De Estudos Em Cidades. **Paisagem e ambiente: Ensaios**, v. 36, p. 49–68, 2015.

BARBOSA, K. H.; GUIZI, E. **Proposta de calibração de um modelo computacional de uma tipologia de residência unifamiliar em Goiânia**. Encontro Nacional de conforto no ambiente construído. XIV ENCAC. **Anais...2017**

BECK, L. M.; PEREIRA, F. O. R.; SCALCO, V. A. **Análise da iluminação natural em ambientes internos inseridos em cenários urbanos virtuais**. XIV Encontro Nacional e X Encontro Latino-americano de Conforto no Ambiente Construído. ENCAC. **Anais...2017**

BITTENCOURT, L.; CÂNDIDO, C. **Introdução à ventilação natural**. 4ª ed. Maceió: Edufal, 2015.

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

BRASIL. **Portaria n.º 50, de 01 de fevereiro de 2013. Requisitos de Avaliação da Conformidade para Eficiência Energética de**

**Edificações do RTQ-C.** Disponível em: <[http://www.pbeedifica.com.br/sites/default/files/projetos/etiquetagem/RTAC001961\\_2.pdf](http://www.pbeedifica.com.br/sites/default/files/projetos/etiquetagem/RTAC001961_2.pdf)>. Acesso em: 1 nov. 2016.

BUENO, B. et al. Combining a Detailed Building Energy Model with a Physically-Based Urban Canopy Model. **Boundary-Layer Meteorology**, p. 471–489, 2011.

BUENO, B. et al. Model Development Development and evaluation of a building energy model integrated in the TEB scheme. **Geoscientific Model Development**, v. 5, p. 433–448, 2012.

BUENO, B. et al. The urban weather generator. **Journal of Building Performance Simulation**, v. 6, p. 269–281, 2013.

BUENO, B. et al. Computationally efficient prediction of canopy level urban air temperature at the neighbourhood scale. **Urban Climate**, v. 9, p. 35–53, 2014.

BUENO, B.; NAKANO, A.; NORFORD, L. **Urban weather generator: a method to predict neighborhood-specific urban temperatures for use in building energy simulations.** ICUC9 - 9th International Conference on Urban Climate jointly with 12th Symposium on the Urban Environment. **Anais...2015**

CALLEJAS, I. J. A. **Avaliação temporal do balanço de energia em ambientes urbanos na cidade de Cuiabá-MT.** [s.l.] Universidade Federal de Mato Grosso, 2012.

CARVALHO, E. DE. Cidades brasileiras, crescimento e desigualdade social. **Org & Demo**, v. 3, p. 45–53, 2002.

CAVALCANTE, M. et al. **Microclima e planejamento: O caso da taxa de permeabilidade do solo.** XIV Encontro Nacional e X Encontro Latino-americano de Conforto no Ambiente Construído. ENCAC. **Anais...2017**

CB3E. **Proposta em desenvolvimento de métodos para avaliação da eficiência energética - Edificações Comerciais.** Disponível em: <[http://cb3e.ufsc.br/sites/default/files/Texto final %28nova proposta de método edificações comerciais%2C serviços e públicas%29\\_0.pdf](http://cb3e.ufsc.br/sites/default/files/Texto%20final%20nova%20proposta%20de%20m%C3%A9todo%20edifica%C3%A7%C3%B5es%20comerciais%20e%20p%C3%BAblicas%2029_0.pdf)>. Acesso em: 1 jul. 2017.

CEC. Building Energy Efficiency Standards for Residential and Nonresidential Buildings. **California Energy Commission**, 2016.

CRAWLEY, D. B. Estimating the impacts of climate change and urbanization on building performance. **Journal of Building Performance Simulation**, v. 1, n. 2, p. 91–115, 2008.

DEÁK, C.; SCHIFFER, S. T. R. **O processo de urbanização no Brasil.** São Paulo: FUPAM, 2004.

DEBIAZI, P. R.; SOUZA, L. C. L. DE. Contribuição de parâmetros do entorno urbano sobre o ambiente térmico de um campus universitário. **Ambiente Construído**, v. 17, n. 4, p. 215–232, 2017.

DIDONÉ, E. L.; PEREIRA, F. O. R. Simulação computacional integrada para a consideração da luz natural na avaliação do desempenho energético de edificações. **Ambiente Construído**, v. 10, n. 4, p. 139–154, 2010.

DOE. **EnergyPlus**. Disponível em: <<https://energyplus.net/>>. Acesso em: 1 mar. 2017.

DUARTE, D. H. S. et al. The impact of vegetation on urban microclimate to counterbalance built density in a subtropical changing climate. **Urban Climate**, v. 14, p. 224–239, 2015.

ENERGYPLUS. **Input Output Reference8.6**, 2015. Disponível em: <<http://bigladdersoftware.com/epx/docs/8-3/input-output-reference/index.html>>

FERREIRA, D.; ASSIS, E. **Simulações de vento e sua aplicação no planejamento urbano**. 6º Congresso luso-brasileiro para planejamento urbano, regional, integrado e sustentável. PLURIS. **Anais...**2016

FERREIRA, D. G.; ASSIS, E. . A influência da cidade sobre os padrões locais de vento analisada a partir de simulação dinâmica do clima. **Fórum Patrimônio**, v. 3, n. 2, p. 1–14, 2010.

FRAYSSINET, L. et al. Modeling the heating and cooling energy demand of urban buildings at city scale. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 81, p. 2318–2327, 2018.

FROTA, A. B.; SCHIFFER, S. R. **Manual de Conforto Térmico**. 5. ed. São Paulo: Studio Nobel, 2001.

GAVIRIA, L. R.; PEREIRA, F. O. R.; MIZGIER, M. O. Influência da configuração urbana na geração fotovoltaica com sistemas integrados às fachadas. **Ambiente Construído**, v. 13, n. 4, p. 07–23, 2013.

GIVONI, B. **Climate considerations in building and urban design**. 1. ed. [s.l.] Van Nostrand Reinhold, 1998.

GONÇALVES, J. C. S. et al. Adensamento urbano e desempenho ambiental no centro da cidade de São Paulo. **XI Encontro Nacional e VII Encontro Latino-americano de Conforto no Ambiente Construído. ENCAC**, n. 1, p. 1–10, 2011.

GUSSON, C. S.; DUARTE, D. H. S. Effects of Built Density and Urban Morphology on Urban Microclimate - Calibration of the Model ENVI-met V4 for the Subtropical Sao Paulo, Brazil. **Procedia Engineering**, v. 169, p. 2–10, 2016.

HAN, Y.; TAYLOR, J. E.; PISELLO, A. L. Exploring mutual shading and mutual reflection inter-building effects on building energy performance. **Applied Energy**, 2015.

HASSID, S. et al. Effect of the Athens heat island on air conditioning load. **Energy and Buildings**, v. 32, n. 2, p. 131–141, 2000.

HIRANO, Y.; FUJITA, T. Evaluation of the impact of the urban heat island on residential and commercial energy consumption in Tokyo.

**Energy**, v. 37, n. 1, p. 371–383, 2012.

IBGE. **Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística**. Disponível em: <<http://www.ibge.gov.br/home/>>.

IEA. **Transition to Sustainable Buildings: Strategies and Opportunities to 2050**. Disponível em: <<https://www.iea.org/Textbase/npsum/building2013SUM.pdf>>.

JUSUF, S. K.; WONG, N. H. Development of Empirical Models for Estate-Level Air Temperature Prediction in Singapore. **Journal of Heat Island Institute International**, v. 7, n. 2, p. 111–125, 2012.

LABEEE. **Arquivos climáticos INMET 2016**. Disponível em: <<http://labeee.ufsc.br/downloads/arquivos-climaticos/inmet2016>>.

LAMBERTS, R.; DUTRA, L.; PEREIRA, F. O. R. **Eficiência Energética na Arquitetura**. 3. ed. Rio de Janeiro: ELETROBRAS/PROCEL, 2014.

LEITE, R. C. V; FROTA, A. B. **Adensamento urbano e condições ambientais internas: a influência da morfologia urbana sobre a radiação solar e o vento para o conforto no ambiente construído**. ENCONTRO NACIONAL DE TECNOLOGIA DO AMBIENTE CONSTRUÍDO. **Anais...**São Paulo: 2016

LI, C. et al. Interaction between urban microclimate and electric air-conditioning energy consumption during high temperature season. **Applied Energy**, v. 117, p. 149–156, 2014.

LI, D. H. W.; WONG, S. L. Daylighting and energy implications due to shading effects from nearby buildings. **Applied Energy**, v. 84, n. 12, p. 1199–1209, 2007.

LIU, Y. et al. Comparing micro-scale weather data to building energy consumption in Singapore. **Energy and Buildings**, v. 152, p. 776–791, 2017.

MACEIÓ, A. Prefeitura Municipal de Maceió. **Código de Urbanismo e Edificações de Maceió**, 2007.

MAO, J. et al. Global sensitivity analysis of an urban microclimate system under uncertainty: Design and case study. **Building and Environment**, v. 124, p. 153–170, 2017.

MARRA, N.; MORILLE, B.; ASSIS, E. **Influência da vegetação no conforto térmico em conjunto habitacional de interesse social**. XIV Encontro Nacional e X Encontro Latino-americano de Conforto no Ambiente Construído. ENCAC. **Anais...**2017

MARTIN, M. et al. Estimation of urban temperature and humidity using a lumped parameter model coupled with an EnergyPlus model. **Energy and Buildings**, v. 96, p. 221–235, 2015.

MARTINS, T. A. DE L. **De condicionantes solares à oportunidades de desenho urbano: Otimização de tipo-morfologias urbanas em contexto de clima tropical**. [s.l.] Universidade Federal do Rio

de Janeiro, 2014.

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, p. 213–233, 2013.

MASIERO, E.; SOUZA, L. C. L. DE. Variação de umidade absoluta e temperatura do ar intraurbano nos arredores de um corpo d'água. **Ambiente Construído**, v. 13, n. 4, p. 25–39, 2013.

MASSON, V. A physically-based scheme for the urban energy budget in atmospheric models. **Boundary-Layer Meteorology**, v. 94, p. 357–397, 2000.

MAZZAFERRO, L.; MELO, A. P.; LAMBERTS, R. **Manual de simulação computacional de edifícios com o uso do objeto Ground Domain no programa EnergyPlus**. Disponível em: <[http://www.labee.ufsc.br/sites/default/files/disciplinas/Manual\\_Ground\\_Domain.pdf](http://www.labee.ufsc.br/sites/default/files/disciplinas/Manual_Ground_Domain.pdf)>. Acesso em: 1 jan. 2016.

NAKANO, A. et al. Urban weather generator - A novel workflow for integrating urban heat island effect within urban design process. **14th International Conference of IBPSA - Building Simulation 2015, BS 2015, Conference Proceedings**, v. 1, n. 2014, 2015.

NAKANO, A. **Urban Weather Generator User Interface Development: Towards a usable tool for integrating urban heat island effect within urban design process**. [s.l.] Massachusetts Institute of Technology, 2015.

NAKATA-OSAKI, C. M.; SOUZA, L. C. L. DE. 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**, p. 73–87, 2016.

NAKATA, C. M.; DE SOUZA, L. C. L. Verification of the influence of urban geometry on the nocturnal heat island intensity. **Journal of Urban and Environmental Engineering**, v. 7, n. 2, p. 286–292, 2013.

OKE, T. R. Street design and urban canopy layer climate. **Energy and Buildings**, v. 11, n. 1, p. 103–113, 1988.

OKE, T. R. **Boundary Layer Climates**. 2. ed. [s.l.] Taylor & Francis e-Library, 2002.

PASSOS, I.; SACRAMENTO, A.; BARBIRATO, G. **Ventilação natural urbana: Análise de cenário futuro em zona residencial em expansão na cidade de Maceió-AL**. 6º Congresso luso-brasileiro para planejamento urbano, regional, integrado e sustentável. PLURIS. **Anais...2016** Disponível em: <<https://academic.oup.com/jhmas/article-lookup/doi/10.1093/jhmas/jrs046>>

PISELLO, A. L. et al. Inter-building effect: Simulating the impact of a network of buildings on the accuracy of building energy performance

predictions. **Building and Environment**, v. 58, p. 37–45, 2012.

PISELLO, A. L. et al. Expanding Inter-Building Effect modeling to examine primary energy for lighting. **Energy and Buildings**, v. 76, p. 513–523, 2014.

PYRGOU, A. et al. Differentiating responses of weather files and local climate change to explain variations in building thermal-energy performance simulations. **Solar Energy**, v. 153, p. 224–237, 2017.

RAMOS, G.; GHISI, E. Analysis of daylight calculated using the EnergyPlus programme. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 14, n. 7, p. 1948–1958, 2010.

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

REINHART, F. C. Tutorial on the Use of Daysim Simulations for Sustainable Design. **National Research Council Canada, Ottawa, Ont., K1A 0R6, Canada**, 2006.

ROCHA, L.; SOUZA, L.; CASTILHO, F. Ocupação do solo e ilha de calor noturna em avenidas marginais a um córrego urbano. **Ambiente Construído**, v. 11, n. 3, p. 161–175, 2011.

ROMERO, M. A. B. **A arquitetura bioclimática do espaço público**. Brasília: Editora UnB, 2001.

RORIZ, M. **Arquivos Climáticos de Municípios Brasileiros**, 2012. Disponível em: <<http://www.labee.ufsc.br/>>

ROTACH, M. W. et al. BUBBLE – an Urban Boundary Layer Meteorology Project. **Theoretical and Applied Climatology**, v. 81, p. 231–261, 2005.

RUPP, R. F.; GHISI, E. Potencial de economia de energia elétrica através do uso da luz natural e da ventilação híbrida em edifícios comerciais em Florianópolis. **Ambiente Construído**, v. 13, n. 4, p. 75–86, 2013.

SAINT-GOBAIN. **SGG COOL-LITE XTREME 50/22 II**. Disponível em: <<https://www.saint-gobain-facade-glass.com/products/ssg-cool-lite-xtreme-5022-ii>>.

SALVATI, A.; COCH, H.; MORGANTI, M. Effects of urban compactness on the building energy performance in Mediterranean climate. **Energy Procedia**, v. 122, p. 499–504, 2017.

SAMUELSON, H. et al. Parametric energy simulation in early design: High-rise residential buildings in urban contexts. **Building and Environment**, v. 101, p. 19–31, 15 maio 2016.

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

SANTAMOURIS, M. et al. On the impact of urban heat island and global warming on the power demand and electricity consumption of

buildings - A review. **Energy and Buildings**, v. 98, p. 119–124, 2015.

SANTAMOURIS, M.; PARAPONIARIS, K.; MIHALAKAKOU, G. Estimating the ecological footprint of the heat island effect over Athens, Greece. **Climatic Change**, v. 80, n. 3–4, p. 265–276, 2007.

SCALCO, V. A.; PEREIRA, F. O. R. Método para a avaliação do impacto de edificações no acesso à iluminação natural em vizinhanças urbanas aplicado em cenários virtuais. **Ambiente Construído**, v. 16, n. 2, p. 169–187, 2016.

SCALCO, V. A.; PEREIRA, F. O. R.; RIGATTI, D. Impacto de novas edificações na vizinhança: proposta de método para a análise das condições de iluminação natural e de insolação. **Ambiente Construído**, v. 10, n. 2, p. 171–187, 2010.

SILVA, C. F.; ROMERO, M. A. B. **O Desempenho Ambiental De Vias Arborizadas Na Cidade De Teresina Por Meio De Dados Sensoriais , Microclimáticos E Simulações Computacionais Com O Auxílio Do Envi-Met .** X Encontro Nacional e VII Encontro Latino Americano de Conforto no Ambiente Construído. X ENCAC. **Anais...2009**

SPANGENBERG, J. et al. Simulation of the influence of vegetation on microclimate and thermal comfort in the city of São Paulo. **Revista SBAU Piracicaba**, v. 3, n. 2, p. 1–19, 2008.

SREBRIC, J.; HEIDARINEJAD, M.; LIU, J. Building neighborhood emerging properties and their impacts on multi-scale modeling of building energy and airflows. **Building and Environment**, v. 91, p. 246–262, 2015.

STEWART, I. D.; OKE, T. R. Local climate zones for urban temperature studies. **BAMS - American Meteorological Society**, p. 1878–1900, 2012.

TORRES, S.; FREITAS, R.; BARBIRATO, G. Adensamento construtivo e qualidade climática urbana: Análises de tipologias espaciais urbanas em clima quente e seco do nordeste brasileiro. **6º Congresso luso-brasileiro para planejamento urbano, regional, integrado e sustentável. PLURIS**, p. 1450–1461, 2016.

UNZETA, B. B.; NORFORD, L. K.; BRITTER, R. **An urban weather generator coupling building simulations with a physically based urban model.** The seventh International Conference on Urban Climate. **Anais...Yokohama, Japan: 2009**

VERSAGE, R. **Ventilação natural e desempenho térmico de edifícios verticais multifamiliares em Campo Grande, MS.** [s.l.] UFSC, 2009.

VERSAGE, R.; MELO, A. P.; LAMBERTS, R. **Impact of different daylighting simulation results on the prediction of total energy consumption.** SimBuild - IBPSA. **Anais...New York: 2010**

WEBER, F. et al. **Elaboração de uma biblioteca de componentes construtivos brasileiros para o uso no programa EnergyPlus.**

Florianópolis: [s.n.]. Disponível em: <<http://labeee.ufsc.br/node/714>>.

WMO. **Guide to Meteorological Instruments and Methods of observation**. Geneva/Switzerland: [s.n.]. v. I & II

YANG, J. H. **The Curious Case of Urban Heat Island : A Systems Analysis**. [s.l.] Massachusetts Institute of Technology, 2016.

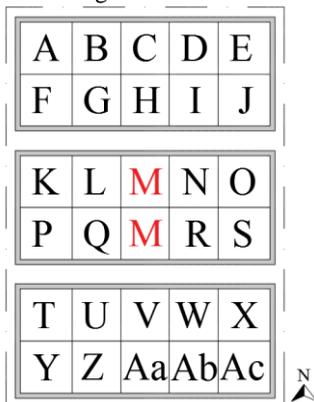
YANG, X. et al. An integrated simulation method for building energy performance assessment in urban environments. **Energy and Buildings**, v. 54, p. 243–251, 2012.

## APÊNDICE A: Método para a definição da aleatoriedade das características do entorno heterogêneo

Para a composição do entorno heterogêneo a ocupação dos lotes do entorno, assim como o valor da refletância e porcentagem de área envidraçada de cada fachada das edificações do entorno foram adotadas de maneira aleatória.

A definição da ocupação dos lotes do entorno foi realizada a partir de sorteio no *software* Excel. Os lotes foram identificados por letras de acordo com a Figura 63 e para o sorteio foram criadas duas linhas no Excel como apresentado no Quadro 9. Cada coluna da primeira linha possui a letra referente ao lote do entorno e a segunda é composta pela função Aleatório (=ALEATÓRIOENTRE(1,3)), que como resultado apresenta o valor 1, 2 ou 3. Para o valor 1 considerou-se no respectivo lote a edificação do tipo 1, para o valor 2 a edificação do tipo 2 e para o valor 3 considerou-se o lote vazio. É importante ressaltar que a letra M, em vermelho na Figura 63, está localizada no lote superior quando a edificação de análise possui a fachada principal voltada para o Sul e está localizada no lote inferior quando a edificação de análise possui a fachada principal voltada para o Norte

Figura 63: Contexto urbano simulado com as letras identificando cada lote para o sorteio referente ao entorno heterogêneo



Quadro 9: Quadro do sorteio no Excel referente à ocupação dos lotes de entorno

Lote	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O
Entorno	1	2	1	3	1	3	2	2	1	2	2	2	1	3	1

Continua

Quadro 9: Quadro do sorteio no Excel referente à ocupação dos lotes de entorno  
Continuação

Lote	P	Q	R	S	T	U	V	W	X	Y	Z	Aa	Ab	Ac
Entorno	3	1	1	2	2	3	2	1	3	2	3	1	2	1

Em relação à definição aleatória da refletância (paredes e aberturas) e porcentagem de área envidraçada de cada fachada, essa foi obtida a partir de simulação com o *software* EPlusPlus, que permite uma simulação randômica (aleatória) de acordo com parâmetros pré-estabelecidos.

Para a simulação do entorno heterogêneo estabeleceu-se que os valores de refletância e porcentagem de área envidraçada de cada superfície de entorno (modeladas como elementos de sombreamento) iriam ser definidos, de forma aleatória, de acordo com os valores estabelecidos no Quadro 10.

Quadro 10: Valores para a definição de refletância e porcentagem de área envidraçada das superfícies das edificações do entorno de forma aleatória

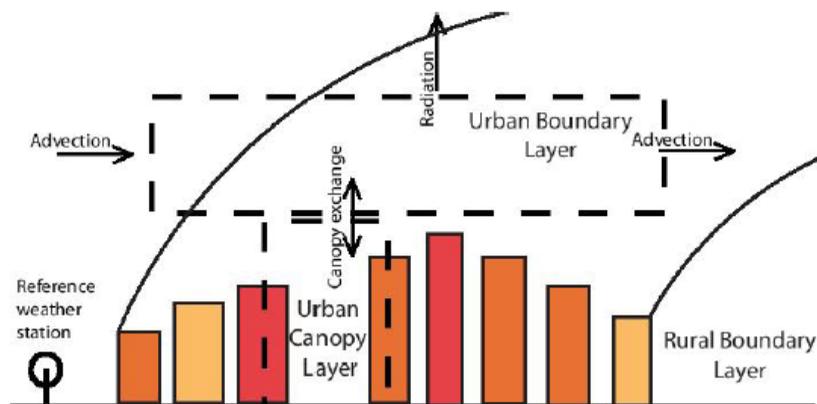
Refletância das paredes	Refletância do vidro	Porcentagem de área envidraçada
0,13 (cor cinza)	0,053 (Parsol grey 6mm)	20%
0,45 (cor terra)	0,4 (SNL 37 clear 8mm)	60%
0,73 (cor branca)	0,62 (SGG cool-lite xtreme 6mm)	80%

Dessa forma o software realizou uma combinação aleatória desses dados para cada superfície de entorno. Como parâmetro de entrada o EPlusPlus solicita o carregamento do arquivo base .IDF, de um arquivo .CSV contendo as informações de configurações a serem alteradas (Quadro 10), a escolha de um método de amostragem (Random – Aleatório), o número da amostragem (1) e o carregamento do arquivo climático .EPW (EPW UWG 3).

## APÊNDICE B: Funcionamento do modelo computacional UWG

A partir das informações meteorológicas obtidas em estações de referência o modelo estima o efeito do fenômeno ilha de calor urbano na cidade aplicando princípios de conservação de energia para controlar os volumes da camada de dossel urbano (UCL – *Urban Canopy Layer*) e da camada limite urbana (UBL – *Urban Boundary Layer*), indicados na Figura 64. Para ambos os volumes de controle considerados no UWG são possíveis indicar suas condições de contorno (BUENO; NAKANO; NORFORD, 2015).

Figura 64: Representação de uma cidade e dos volumes de controle considerados no UWG



Fonte: Bueno, Nakano e Norford (2015).

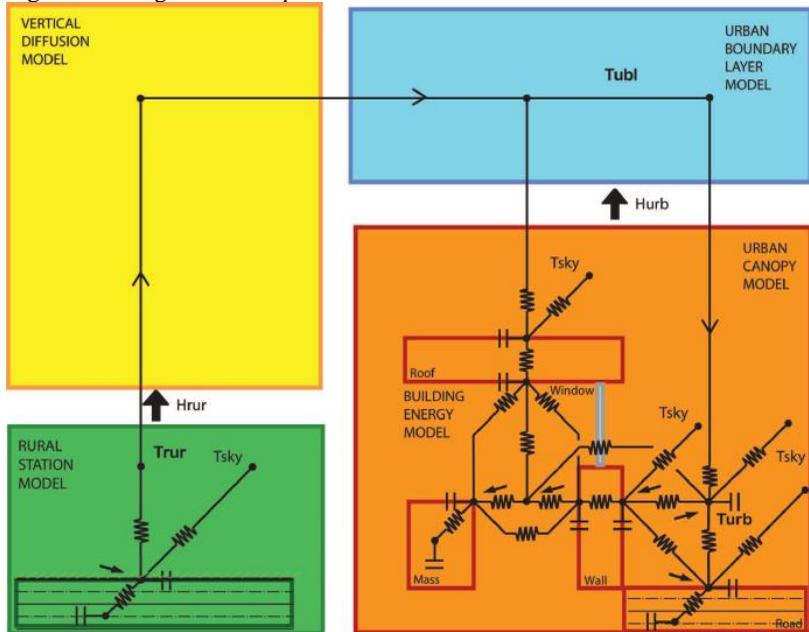
O UWG é composto por quatro módulos acoplados apresentados na Figura 65: o modelo da estação rural (RSM - *Rural Station Model*), modelo de difusão vertical (VDM - *Vertical Diffusion Model*), modelo da camada de limite urbana (UBL - *Urban Boundary Layer*) e o modelo de dossel urbano e energia do edifício (UC-BEM - *Urban Canopy and Building Energy Model*).

O RSM (módulo verde) representa um modelo de dossel urbano que “lê” os valores horários dos dados climáticos medidos em áreas rurais e calcula o fluxo de calor sensível por meio de diferenças finitas. Esse modelo é baseado em um balanço de energia com a superfície do solo.

O VDM (módulo amarelo) “lê” as temperaturas e velocidades medidas na estação climática e o fluxo de calor sensível calculado pelo

RSM e utiliza uma equação de difusão de calor para calcular condições de contorno na escala vertical referentes à temperatura do ar acima da estação climática rural, que serão depois fornecidos para o modelo UBL. A altura mais baixa utilizada para o cálculo de temperatura é a utilizada na estação climática (em média 2m) e a mais alta ocorre quando o perfil da temperatura torna-se uniforme (em média 150m).

Figura 65: Diagrama de esquema de funcionamento dos módulos do UWG



Fonte: Bueno et al. (2013).

O UBL (módulo azul) calcula as temperaturas do ar acima da camada de dossel urbana a partir dos valores de temperaturas do ar mensurada em diferentes alturas pelo VDM e dos valores de fluxo de calor sensível fornecidos pelo RSM e pelo UC-BEM. Este modelo é baseado em um balanço de energia de um determinado volume dentro do UBL e o modelo assume que a temperatura é uniforme em todo o módulo.

O UC-BEM (módulo laranja) calcula, além do fluxo de calor sensível fornecido para o UBL, a temperatura e a umidade do ar do cânion urbano a partir dos dados de radiação, precipitação, velocidade e da umidade do ar medidos na estação meteorológica e dos dados da

temperatura do ar acima da camada de dossel urbana calculada pelo modelo UBL. O modelo baseia-se no esquema de Balanço Energético da Cidade (TEB – *Town Energy Balance*) apresentado em Masson (2000) e no seu modelo energético de edificações apresentado em Bueno et al. (2012). As temperaturas do cânion urbano são calculadas através de um balanço de calor que leva em conta a sua capacidade térmica. O balanço de energia do cânion leva em conta o fluxo de calor entre as paredes, aberturas e rua, a troca de calor sensível entre o ar do cânion e a atmosfera, o fluxo de calor devido à infiltração, o calor residual de equipamentos para aquecimento, ventilação e resfriamento e outras fontes de calor antropogênico e a troca de calor radiante entre o ar do cânion e o céu. Para o cálculo da umidade no cânion urbano utiliza-se um balanço de calor latente análogo, computando os fluxos de calor latente da atmosfera, dos edifícios e da rua. O UWG assume que a umidade do ar acima dos cânions urbanos é igual aquela medida na estação meteorológica (BUENO et al., 2013).



## APÊNDICE C: Dados de entrada do modelo computacional UWG

No Quadro 11 a seguir apresentam-se os dados de entrada para as simulações com o modelo UWG dos arquivos climáticos urbanos UWG 1, 2 e 3 com base no EPW INMET 2016, correspondentes, respectivamente, ao entorno: homogêneo da tipologia 1, homogêneo da tipologia 2 e heterogêneo (similares na tipologia 1 e 2). Os parâmetros em destaque em negrito representam os principais dados de entrada de acordo com a análise de sensibilidade realizada por Nakano (2015).

Quadro 11: Dados de entrada para os arquivos climáticos urbanos UWG 1, 2 e 3

		Parâmetro	Valores	Fonte	
Construction	Wall	Albedo (-)	0,45	BRASIL (2013)	
		Emissivity (-)	0,9	ABNT (2003)	
		Materials	Parede de tijolo cerâmico 6 furos	Parede Equiv.	Calculado com base em Weber et al. (2017)
			Thermal conductivity (W/m-K)	0,7455	
			Volumetric heat capacity (J/m <sup>3</sup> -K)	996596	
			Thickness (m)	0,14	
		Vegetation coverage (-)	0	-	
		Inclination (-)	0	-	
		Inicial temperature (°C)	20	Default	
		Roof	Albedo (-)	0,3	ABNT (2003)
	Emissivity (-)		0,9	ABNT (2003)	
	Materials		Cobertura de telha de fibrocimento c/ câmara de ar	Coberta Eq.	Calculado com base em Weber et al. (2017)
			Thermal conductivity (W/m-K)	1,2755	
			Volumetric heat capacity (J/m <sup>3</sup> -K)	809238	
			Thickness (m)	0,43	
	Vegetation coverage (-)		0	-	
	Inclination (-)		1	-	
	Inicial temperature (°C)		20	Default	
	Mass		Albedo (-)	0,5	ABNT (2003)
		Emissivity (-)	0,9	ABNT (2003)	
Materials		Laje de concreto nervurada com forro de gesso	Laje Eq.	Calculado com base em Weber et al. (2017)	
		Thermal conductivity (W/m-K)	1,3607		
		Volumetric heat capacity (J/m <sup>3</sup> -K)	1060397		
		Thickness (m)	0,2625		
Vegetation coverage (-)		0	-		
Inclination (-)		1	-		
Inicial temperature (°C)		20	Default		

Continua

Quadro 11: Dados de entrada dos arquivos climáticos urbanos UWG 1, 2 e 3  
 Continuação

		Parâmetro	Valores	Fonte	
Construction	Glazing	Window to wall glazing (-)	0,5	Tópico 3.1	
		Total U-value (W/m <sup>2</sup> K)	5,67	BRASIL (2013)	
		Total solar heat gain coefficient (-)	0,29	BRASIL (2013)	
	Urban Road	Materials	Albedo (-)	0,1	ABNT (2003)
			Emissivity (-)	0,9	ABNT (2003)
		VegCov	Asfalto	Asfalto	Nakano (2015)
			Thermal conductivity (W/m-K)	1,0	
			Volumetric heat capacity (J/m <sup>3</sup> -K)	1600000	
			Thickness (m)	1,25	
		UWG 1	0,05	Tópico 3.1	
		UWG 2	0,1	Tópico 3.1	
		UWG 3	0,075	Tópico 3.1	
		Inclination (-)	1	-	
	Inicial temperature (°C)	20	Default		
	Rural (Station)	Materials	Albedo (-)	0,1	ABNT (2003)
			Emissivity (-)	0,9	ABNT (2003)
		Materials	Names	Asfalto	Nakano (2015)
			Thermal conductivity (W/m-K)	1,0	
			Volumetric heat capacity (J/m <sup>3</sup> -K)	1600000	
			Thickness (m)	1,25	
Vegetation coverage (-)		0,86	Calculado (Estação INMET)		
Inclination (-)		1	-		
Inicial temperature (°C)		20	Default		
Building	Floor height (m)		3	-	
	Nighttime internal gain (W/m <sup>2</sup> )		4,76	10% ganho do dia (ilu+equipamento)	
	Daytime internal gain (W/m <sup>2</sup> )		47,6	Tópico 3.1	
	Radiant fraction of internal heat gain (-)		0,54	Média (pessoa+ilu+equipamento)	
	Latent fraction of internal heat gain (-)		0,1	Média (pessoa+ilu+equipamento)	
	Infiltration (ACH)		0,5	-	
	Ventilation (ACH)		0,99	Previsto segundo ANVISA (2003)	
	Cooling system type (n/a)		Air	-	
	Cooling system COP (-)		2,6	CB3E (2017)	
	Amount of heat released to canyon (-)		1	Yang 2016	
	Daytime cooling setpoint (°C)		24,0	CB3E (2017)	

Continua

Quadro 11: Dados de entrada dos arquivos climáticos urbanos UWG 1, 2 e 3  
 Continuação

Parâmetro		Valores	Fonte	
Building	Nighttime cooling setpoint (°C)	50,0	-	
	Daytime heating setpoint (°C)	18,0	CB3E (2017)	
	Nighttime heating setpoint (°C)	-10,0	-	
	Cooling capacity (W/m <sup>2</sup> )	3,67	Default	
	Heating efficiency (-)	0,8	Yang 2016	
	Initial temperature (°C)	20	Default	
	Night setpoint start (hours)	18	-	
	Night setpoint end (hours)	8	-	
Urban Area	Average building height (m)	UWG 1	27	Tópico 3.1
		UWG 2	45	Tópico 3.1
		UWG 3	36	Tópico 3.1
	Horizontal building density (site coverage ratio) (-)	UWG 1	0,28	Tópico 3.1
		UWG 2	0,1	Tópico 3.1
		UWG 3	0,15	Tópico 3.1
	Vertical to horizontal urban area ratio (facade-to-site ratio) (-)	UWG 1	1,53	Tópico 3.1
		UWG 2	1,53	Tópico 3.1
		UWG 3	1,17	Tópico 3.1
	Tree coverage (-)	UWG 1	0,05	Tópico 3.1
UWG 2		0,1	Tópico 3.1	
UWG 3		0,075	Tópico 3.1	
Urban Area	<b>Non building sensible anthropogenic heat (W/m<sup>2</sup>)</b>		9,2	Callejas (2012)
	Non building latent antropog. heat (W/m <sup>2</sup> )		0,92	10% do sensível
	Char lenght (neighborhood lenght) (m)		500	Srebric, 2015
	Tree latent fraction (-)		0,7	Nakano (2015)
	Grass latent fraction (-)		0,6	Nakano (2015)
	Vegetation albedo (-)		0,2	Nakano (2015)
	Vegetation start (month)		1	-
	Vegetation end (month)		12	-
	Daytime boundary layer height (m)		1000	Oke (2002)/ Yang (2016)
	Nighttime boundary layer height (m)		50	
Reference height (m)		150		
Station	Latitude (°)		-9,67	EPW INMET 2016 (LABEEE, 2016)
	Longitude (°)		-35,74	
	Average obstacle height (m)		0,3	Previsto segundo WMO (2008)

Continua

Quadro 11: Dados de entrada dos arquivos climáticos urbanos UWG 1, 2 e 3  
 Continuação

	<b>Parâmetro</b>	<b>Valores</b>	<b>Fonte</b>
Simulation Parameters	Temperature height (m)	2	EPW INMET 2016 (LABEEE, 2016)
	Wind height (m)	10	
	Circ Coeff	1,2	Default
	Day Threshold	200	Default
	Night Threshold	50	Default
	Wind minimum (m/s)	0.1	Default
	Wind maximum (m/s)	10	Default
	WGMax (m)	0,005	Default
	Exchange Coefficient	0,3	Default
	Simulation start month (month)	1	-
	Simulation start day (day)	1	-
	Simulation duration (days)	365	-

## APÊNDICE D: Resultados do teste de variação das características do envelope dos edifícios de entorno no modelo computacional UWG

Visando observar como as variações de refletância de áreas opacas, porcentagem de área envidraçada e tipo de vidro utilizado nas edificações de entorno seriam capturadas pelo modelo UWG, foram realizadas as simulações de todos os cenários propostos no Quadro 6. Considerando-se que para cada tipologia (1 ou 2) o cenário homogêneo 50RM representaria um valor médio dos resultados em cada hora do dia, este foi escolhido como média para a realização do cálculo de desvio médio e desvio padrão, calculados a partir da diferença entre o cenário 50RM e os demais para cada hora de cada dia do ano.

Os resultados são apresentados Tabela 5 (tipologia 1) e na Tabela 6 (tipologia 2) e demonstram a baixa variação entre o cenário 50RM e os demais, com maiores desvios referentes ao cenário 20RB e menores desvios referentes ao cenário 50RA. Dessa forma, considerou-se que os desvios obtidos foram muito pequenos, utilizando-se então apenas o valor simulado para 50RM.

Tabela 5: Desvio médio e padrão dos resultados de temperatura do ar (°C) de cada cenário homogêneo em relação ao cenário homogêneo T1 N/S II - 50RM

	<b>20RB</b>	<b>20RM</b>	<b>20RA</b>	<b>50RB</b>	<b>50RA</b>	<b>80RB</b>	<b>80RM</b>	<b>80RA</b>
<b>Desvio Médio</b>	-0,12	-0,06	-0,01	-0,07	0,04	-0,02	0,06	0,09
<b>Desvio Padrão</b>	0,20	0,12	0,07	0,09	0,06	0,09	0,11	0,11

Tabela 6: Desvio médio e padrão dos resultados de temperatura do ar (°C) de cada cenário homogêneo em relação ao cenário homogêneo T2 N/S II - 50RM

	<b>20RB</b>	<b>20RM</b>	<b>20RA</b>	<b>50RB</b>	<b>50RA</b>	<b>80RB</b>	<b>80RM</b>	<b>80RA</b>
<b>Desvio Médio</b>	-0,10	-0,05	0,00	-0,07	0,03	-0,02	0,05	0,07
<b>Desvio Padrão</b>	0,16	0,09	0,06	0,08	0,06	0,08	0,09	0,09



## APÊNDICE E: Resultados da modificação do arquivo climático com o modelo computacional UWG

As simulações termo-energéticas para a obtenção da carga térmica das edificações de análises foram realizadas com o arquivo climático EPW INMET 2016 (LABEEE, 2016) da cidade de Maceió e com os arquivos climáticos urbanos modificados a partir de simulações com o modelo UWG. No UWG foram simulados três arquivos climáticos de acordo com o entorno urbano analisado, um referente ao entorno urbano homogêneo da Tipologia 1, denominado UWG 1, outro referente ao entorno homogêneo da Tipologia 2, denominado UWG 2 e por fim o referente ao entorno heterogêneo (similar para as tipologias 1 e 2), denominado UWG 3.

### Temperatura do ar

A Figura 66 e a Figura 67 apresentam os valores de temperatura dos três arquivos mencionados ao longo de uma semana abrangendo os meses de março e abril e uma semana ao longo do mês de agosto, respectivamente. Estas semanas abrangem, respectivamente, o dia mais quente do ano (1 de abril) e o dia mais ameno do ano (9 de agosto).

Figura 66: Temperatura do ar externo entre uma semana de março e abril

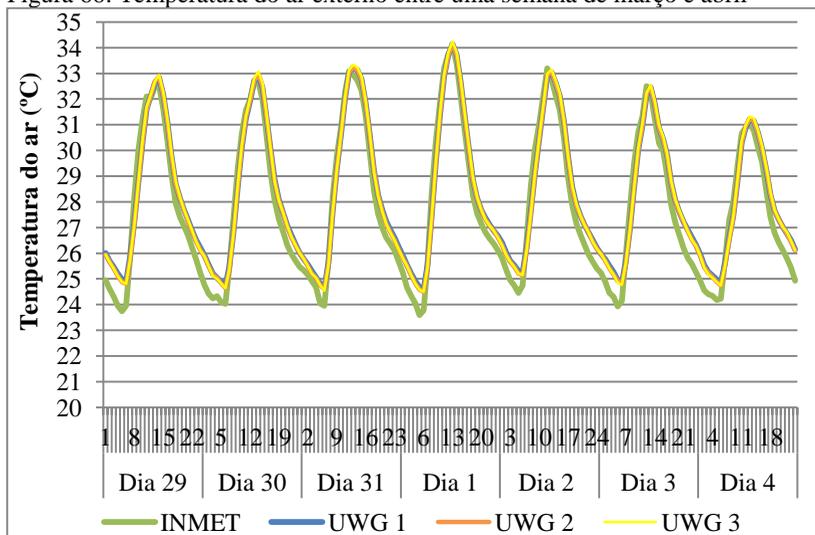
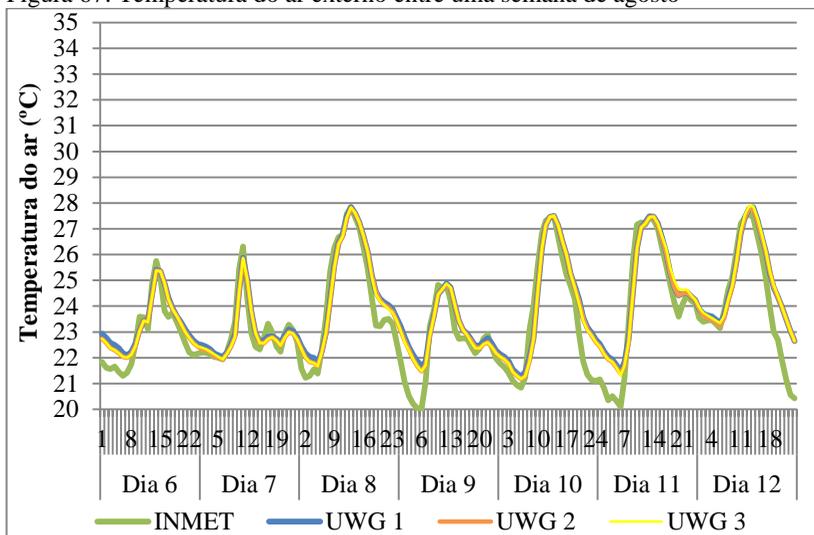


Figura 67: Temperatura do ar externo entre uma semana de agosto



Comparando-se os valores do arquivo INMET com os arquivos UWG observa-se que as maiores diferenças de temperatura ocorrem sempre no período da noite e madrugada, no qual os valores de temperatura do ar simulados pelo UWG apresentam-se sempre acima dos valores medidos pelo INMET, alcançando uma diferença máxima no dia 18 de julho de 2,8°C às 22h no UWG 1 e às 21h no UWG 2. Já no UWG 3 essa diferença máxima, também no dia 18 de julho, alcançou 3°C às 21h.

Considerando o período da manhã, no qual os valores do INMET de forma geral apresentam-se acima dos do UWG, a maior diferença alcançada foi de 2,3°C para o UWG 1, de 2,4°C para o UWG 2 e de 2,4°C para o UWG 3 no dia 1 de agosto às 9h da manhã.

É possível observar também que existe um comportamento padrão entre o arquivo climático medido e os arquivos climáticos simulados, em que os valores dos UWG estão sempre acima do valor do INMET até o início da manhã, em torno das 7h. A partir deste momento até a temperatura do ar atingir o seu pico diário, em torno das 13h, os valores do INMET apresentam-se mais altos que os do UWG. Após esse horário os valores dos arquivos simulados voltam a ficar mais altos que o do arquivo medido, atingindo a maior diferença no período da madrugada até que no início da manhã os valores medidos voltam a

apresentar-se acima dos valores simulados novamente, mantendo este padrão cíclico ao longo do ano.

Estes resultados demonstram a existência do efeito ilha de calor urbano noturna nos três diferentes contextos urbanos analisados e a necessidade da utilização de arquivos climáticos que representem mais fielmente a realidade urbana onde a edificação de análise está inserida para uma maior precisão dos dados de saída e para análises mais detalhadas do impacto do entorno, considerando que a urbanização e o adensamento urbano estão cada vez mais presente nas cidades brasileiras, modificando significativamente algumas variáveis climáticas medidas em campo aberto, principalmente a temperatura do ar, que influencia diretamente nos resultados de carga térmica que é o principal parâmetro de análise da presente pesquisa.

Comparando-se os resultados para uma semana de março/abril, que possui o dia mais quente do ano na cidade, e para uma semana de agosto, referente ao dia mais ameno, observa-se que no mês mais quente a diferença entre os valores dos arquivos climáticos UWG e INMET são menores que no mês mais ameno. Estes resultados indicam uma maior magnitude do efeito ilha de calor urbano noturna no período mais ameno do ano.

Observa-se também que a amplitude diária dos arquivos climáticos simulados é sempre menor que do arquivo medido, resultado também do efeito ilha de calor, que não permite o resfriamento noturno na cidade devido a larga utilização de materiais de alta absorção, baixa quantidade de área permeável e vegetação e geometria urbana que impede a saída das ondas longas de dentro dos cânions urbanos.

Entre os três contextos urbanos analisados (UWG 1, UWG 2 e UWG 3) não houveram grandes discrepâncias entre os resultados, o que já era esperado considerando-se que apenas cinco parâmetros de entrada foram modificados entre as simulações, sendo esses: porcentagem de cobertura vegetal urbana, altura média das edificações, porcentagem de ocupação da edificação no terreno, área de superfície vertical em relação a superfície horizontal (apenas entre UWG 1/2 e 3) e porcentagem de área arborizada, como pode ser observado no Quadro 11, e que a variação entre eles foi baixa. Vale ressaltar ainda que os parâmetros porcentagem da ocupação da edificação no terreno e área de superfície vertical em relação a superfície horizontal, dentre esses, eram os único indicado na documentação do *software* como um "parâmetro chave" ou seja, um parâmetro considerado de grande significância de acordo com a análise de sensibilidade realizada por Nakano (2015).

Buscando observar de forma mais detalhada esta diferença de temperatura entre o UWG e INMET a partir de uma média de cada hora do dia de cada mês ao longo em ambas as tipologias, apresenta-se a Figura 68 referente ao UWG 1, a Figura 69 referente ao UWG 2 e a Figura 70 referente ao UWG 3.

Como observado anteriormente os valores do INMET encontram-se acima dos valores do UWG apenas entre o início da manhã e o começo da tarde, enquanto nas demais horas do dia o valor do UWG apresentou-se acima dos valores do INMET. Nos meses mais quentes do ano, representados por cores quentes, os valores do INMET passam a ser mais altos que os do UWG mais cedo (6h30min) enquanto nos meses mais amenos ocorre um pouco mais tarde (7h30min). O mesmo ocorre na inversão dos valores, no qual o UWG passa a ser maior que o INMET. A inversão ocorre mais cedo no período do verão, às 11h e às 13h no período do inverno.

Nos gráficos é possível observar que há uma maior variação dos resultados entre os diferentes meses do ano entre o período da noite e início da madrugada, alcançando uma diferença máxima de  $0,7^{\circ}\text{C}$  (UWG 1) e  $0,8^{\circ}\text{C}$  (UWG 2 e 3) entre os meses de novembro e maio às 2h da madrugada. As menores variações ocorrem justamente nos períodos de inversão dos valores entre INMET e UWG citados acima.

Figura 68: Diferença de temperatura entre o arquivo climático UWG 1 e o EPW INMET 2016 de Maceió

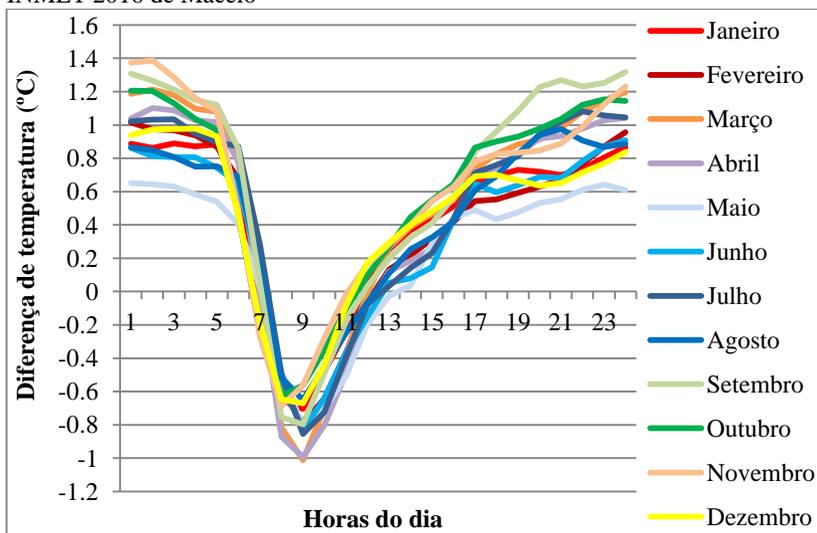


Figura 69: Diferença de temperatura entre o arquivo climático UWG 2 e o EPW INMET 2016 de Maceió

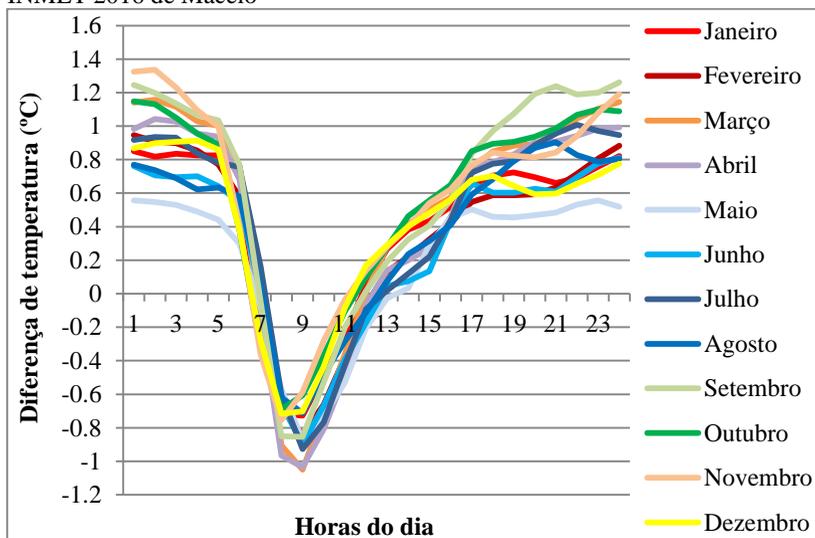
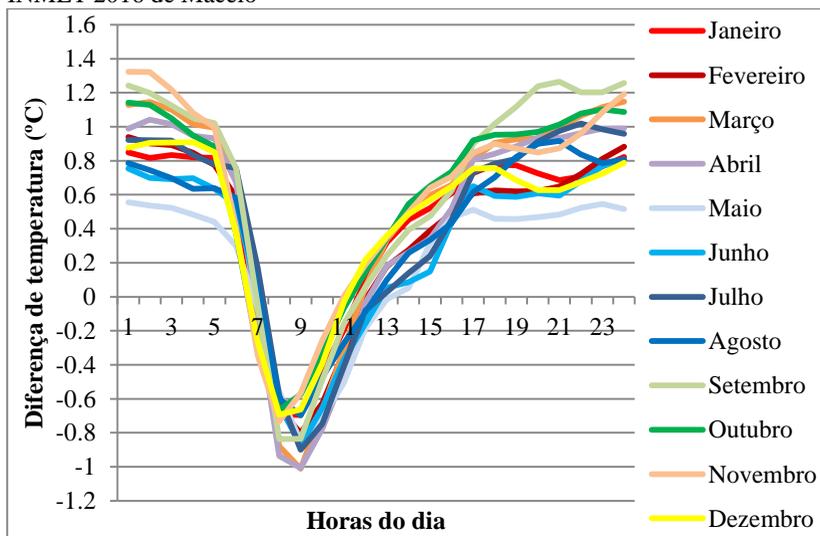
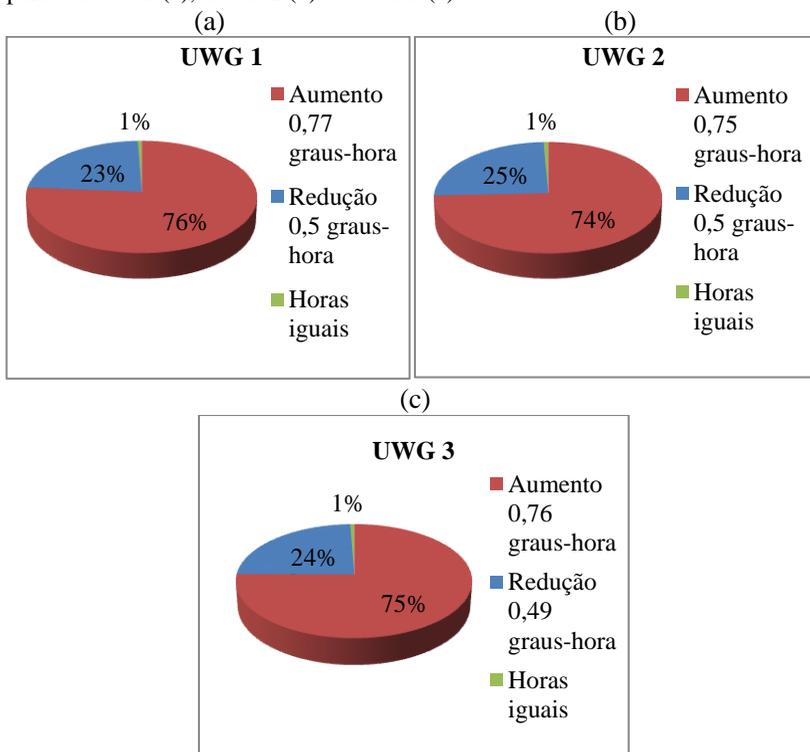


Figura 70: Diferença de temperatura entre o arquivo climático UWG 3 e o EPW INMET 2016 de Maceió



A partir dos gráficos não foi possível identificar um padrão de maior ou menor diferença entre o UWG e o INMET ao longo das estações do ano. Os meses que apresentaram as maiores diferenças foram os meses de março, abril, setembro, outubro e novembro.

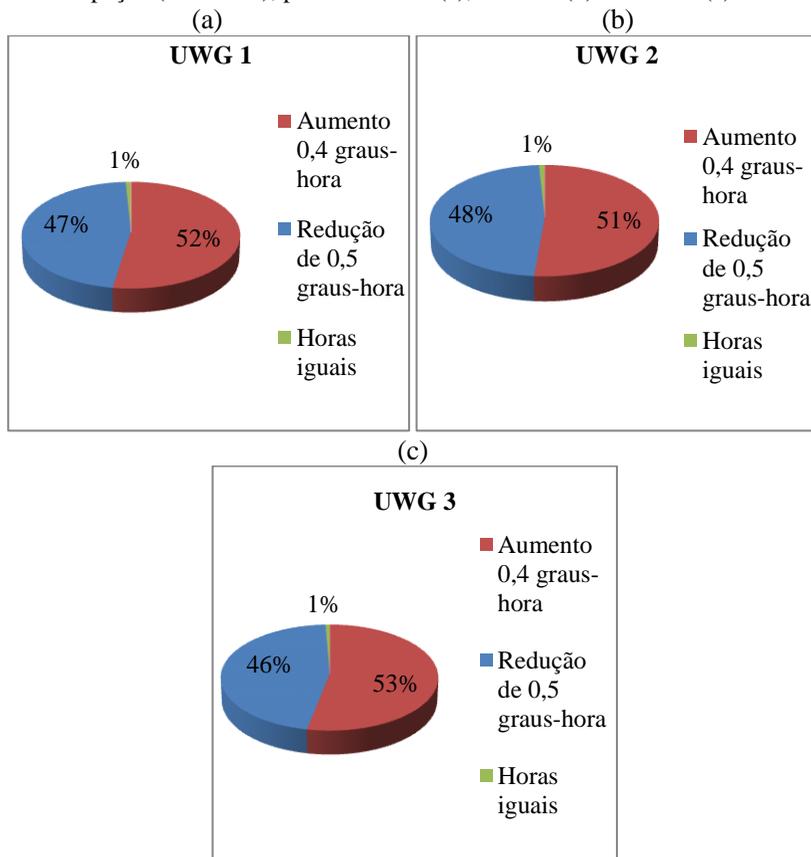
Figura 71: Comparação horária entre UWG e INMET em todas as horas do ano, para o UWG 1 (a), UWG 2 (b) e UWG 3 (c)



Analisando-se na Figura 71 o aumento e a redução da temperatura do ar externo ao longo de todas as horas do ano entre o valor simulado no UWG e o valor do INMET, para o UWG 1 encontrou-se que em 76% das horas do ano a temperatura do UWG apresentou-se mais alta, com uma média de 0,77 graus-hora. Já em 23% das horas do ano o valor do UWG foi 0,5 graus-hora em média mais baixo que o valor do INMET. Em apenas 1% das horas do ano os valores de temperatura entre os arquivos climáticos foram iguais. Já o UWG 2 apresentou um aumento pouco menor, de 0,75 graus-hora em

74% das horas do ano e uma redução de 0,5 graus-hora em 25% das horas do ano, mantendo as mesmas temperaturas também em 1% das horas do ano. No UWG 3 o houve um aumento de 0,76 graus a cada hora em 75% das horas do ano e uma redução de 0,49 graus em 25% das horas do ano. Esses resultados indicam, mais uma vez a baixa variação do resultado entre os diferentes contextos urbanos simulados.

Figura 72: Comparação horária entre UWG e INMET considerando as horas com ocupação (8h às 18h), para o UWG 1 (a), UWG 2 (b) e UWG 3 (c)



Porém, quando se restringe essa análise para as horas de ocupação do edifício, entre às 8h da manhã e às 18h da tarde, observa-se um equilíbrio entre a quantidade de horas em que a temperatura do UWG é maior que a do INMET e seu oposto, o que poderia justificar a

baixa variação da carga térmica entre as simulações dos cenários sem e com entorno. Há uma aproximação muito grande também no valor do aumento ( $0,44^{\circ}\text{C}$  por hora) e o valor da redução ( $0,55^{\circ}\text{C}$ ), e diferentemente do resultado referente a todas as horas do ano, quando se considera apenas as horas de uso o valor do aumento é menor que o valor da redução (Figura 72).

Desta forma, é possível prever que o efeito ilha de calor urbano, considerando as geometrias urbanas adotadas e o clima da cidade em estudo (Maceió), não possui tanto impacto em edificações de escritórios localizadas em centros comerciais com horário de funcionamento durante o dia, uma vez que os resultados demonstram um aumento e uma redução de temperaturas bem próximas.

### **Umidade Relativa**

Assim como na temperatura do ar, observou-se para a umidade relativa uma grande similaridade entre os resultados referentes aos cenários urbanos (UWG) tanto em março (Figura 73) quanto em agosto (Figura 74). A comparação entre o INMET e o UWG também apresentou as maiores diferenças durante o início da noite e início da manhã, enquanto durante o resto do dia seus valores mantiveram-se mais próximos. A diferença máxima entre o UWG e o INMET foi de 14,4% às 22h para o UWG 1 e 2 e de 14,6% às 22h para o UWG 3 no dia 18 de julho. Uma maior variação diária de umidade relativa pôde ser observada na semana mais quente, em relação a semana mais fria e dessa forma as maiores umidades foram observadas no inverno.

Principalmente no verão é possível observar um comportamento cíclico da umidade relativa do ar ao longo do dia, que é inversamente proporcional ao comportamento da temperatura. Pela manhã os valores da umidade relativa são altos, pois a quantidade de vapor d'água presente na atmosfera acumulado do período da madrugada ainda é grande. Ao longo do dia a umidade vai reduzindo até o meio da tarde (3h), quando a atmosfera está mais seca devido a grande exposição à radiação solar que já sofreu e atinge seu menor valor de umidade relativa do dia. A partir desse momento, quando as temperaturas começam a ficar mais amenas os valores voltam a subir aos poucos porque os materiais de superfície do recorte são absorvedores de calor e, como receberam radiação o dia inteiro, levam um tempo para que se resfriem novamente. Durante a noite e madrugada, a temperatura dos materiais de superfície vai reduzindo e, conseqüentemente, a quantidade de vapor d'água continua subindo até o início da manhã (6h), quando

atinge seu maior patamar e novamente a presença da radiação volta a diminuir os valores da umidade relativa.

Figura 73: Umidade relativa do ar externo entre uma semana de março/abril

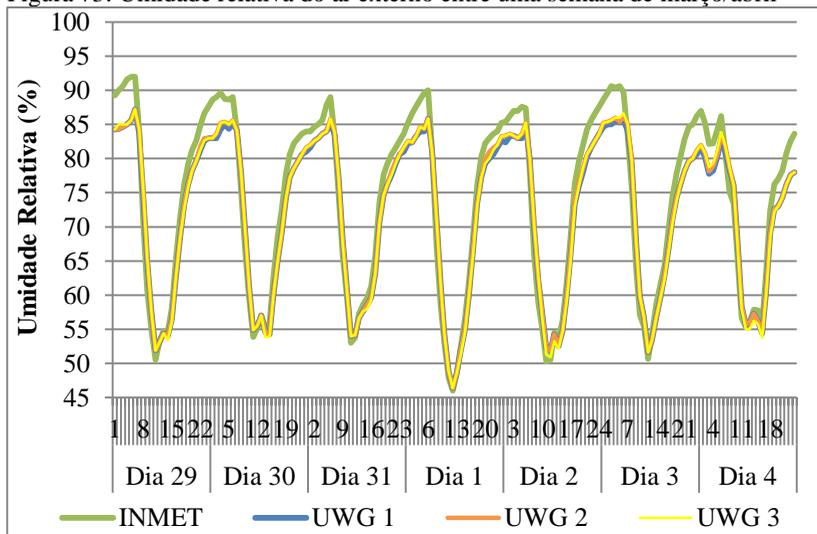
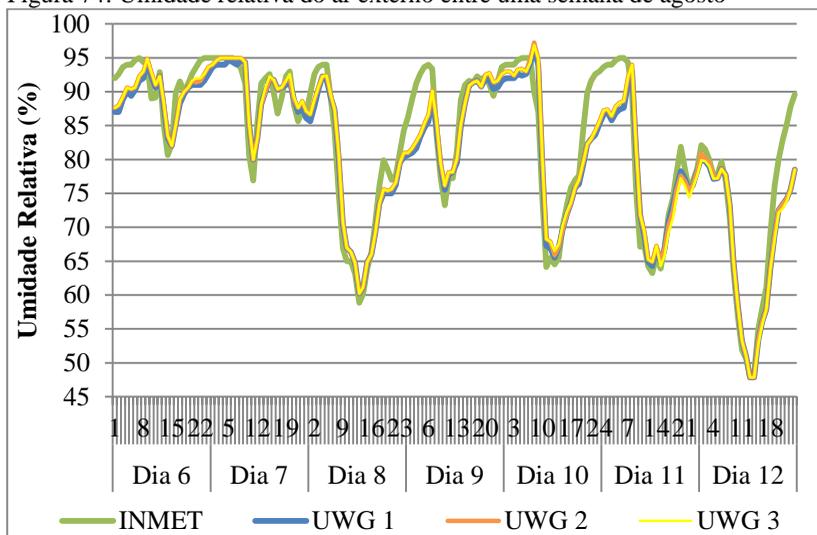


Figura 74: Umidade relativa do ar externo entre uma semana de agosto



A Figura 75, Figura 76 e Figura 77 indicam, respectivamente, a diferença da umidade relativa entre os arquivos UWG 1, 2 e 3 e o arquivo EWP INMET 2016. Nas figuras é possível observar que a partir das 7h da manhã os valores de umidade relativa do UWG apresenta-se acima do INMET até o meio da tarde (15h) com diferenças médias máximas de 4,5% a 5% a depender do UWG de análise no mês de julho. Ressalta-se também que as maiores disparidades nesse horário ocorreu entre os meses de março e agosto. Porém a maior disparidade de valores ocorreu durante o período da madrugada, onde os valores do INMET foram mais altos que os do UWG (a partir do início da tarde), com maior diferença de 6,5% a 7% (a depender do UWG de análise) às 2h da madrugada durante o mês de novembro.

Nos gráficos é possível observar que há uma maior variação dos resultados entre os diferentes meses do ano entre o período da noite e início da madrugada, alcançando uma diferença máxima média de 3,7% (UWG 1) e 4% (UWG 2 e 3) entre os meses de novembro e maio às 2h da madrugada. As menores variações ocorrem justamente nos períodos de inversão dos valores entre INMET e UWG (7h e entre 13h e 15h).

Figura 75: Diferença de umidade relativa entre o arquivo climático UWG 1 e o EPW INMET 2016 de Maceió

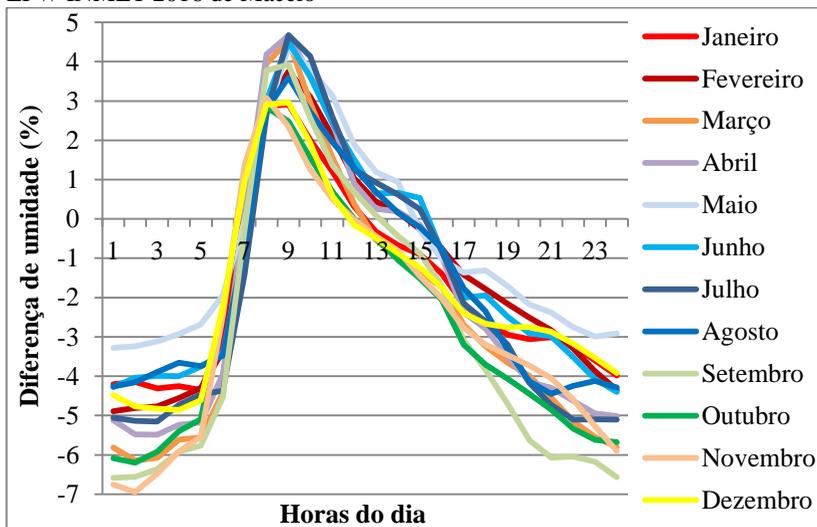


Figura 76: Diferença de umidade relativa entre o arquivo climático UWG 2 e o EPW INMET 2016 de Maceió

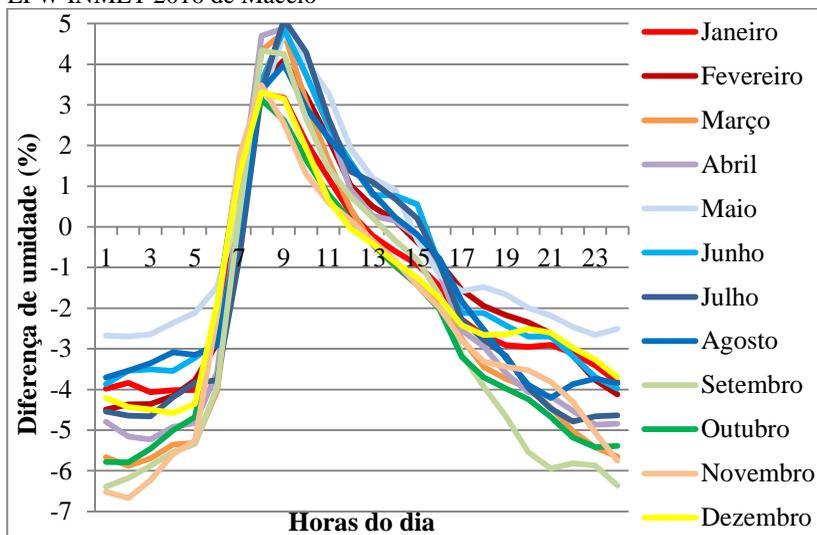
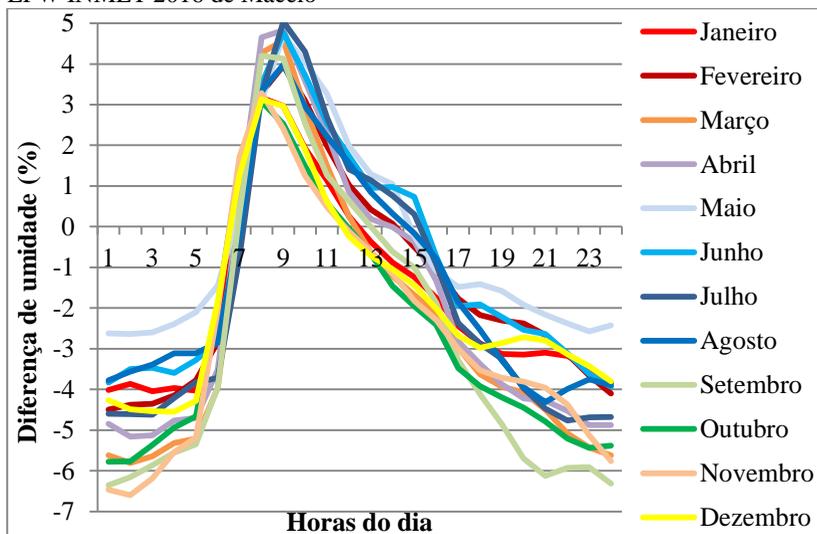


Figura 77: Diferença de umidade relativa entre o arquivo climático UWG 3 e o EPW INMET 2016 de Maceió





## APÊNDICE F: Relação entre radiação solar incidente e carga térmica para resfriamento

Figura 78: Relação entre radiação solar incidente e carga térmica para resfriamento para as zonas Norte e Sul do cenário T1 N

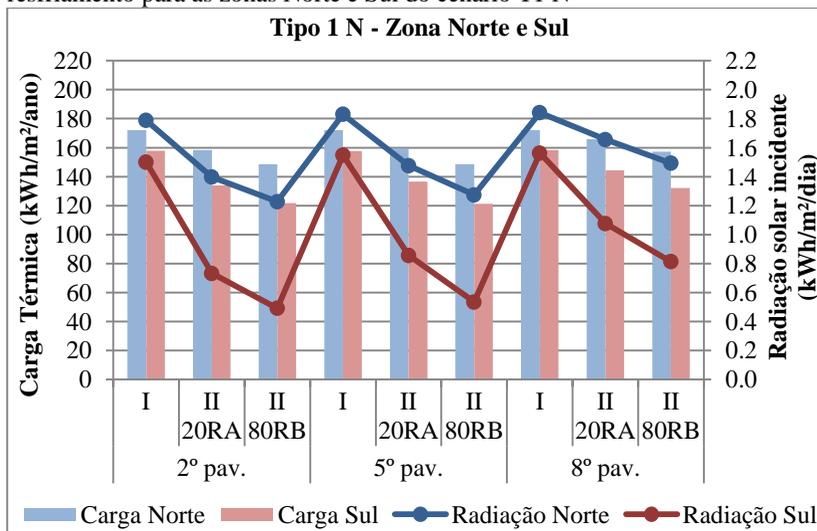


Figura 79: Relação entre radiação solar incidente e carga térmica para resfriamento para as zonas Leste e Oeste do cenário T1 N

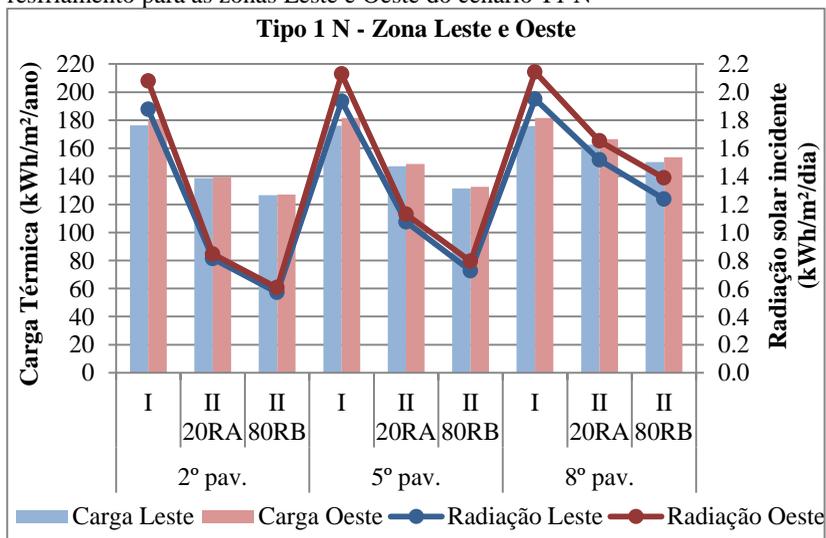


Figura 80: Relação entre radiação solar incidente e carga térmica para resfriamento para as zonas Norte e Sul do cenário T1 S

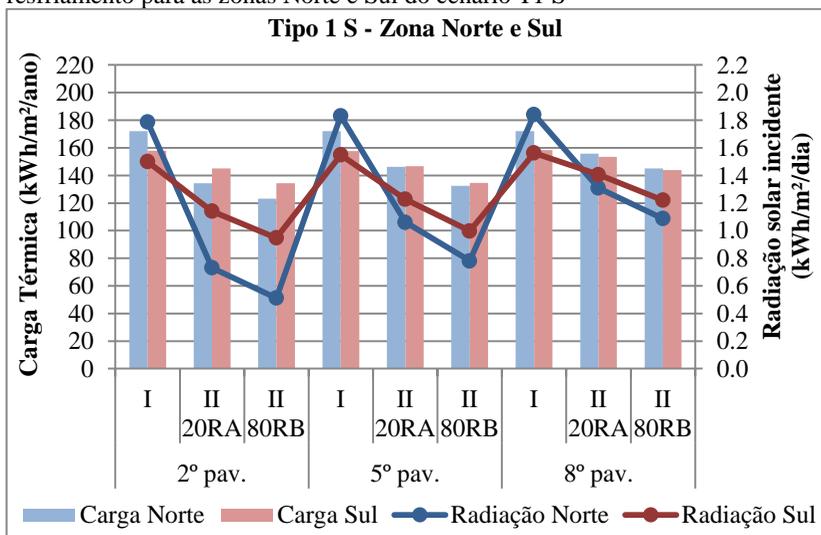


Figura 81: Relação entre radiação solar incidente e carga térmica para resfriamento para as zonas Leste e Oeste do cenário T1 S

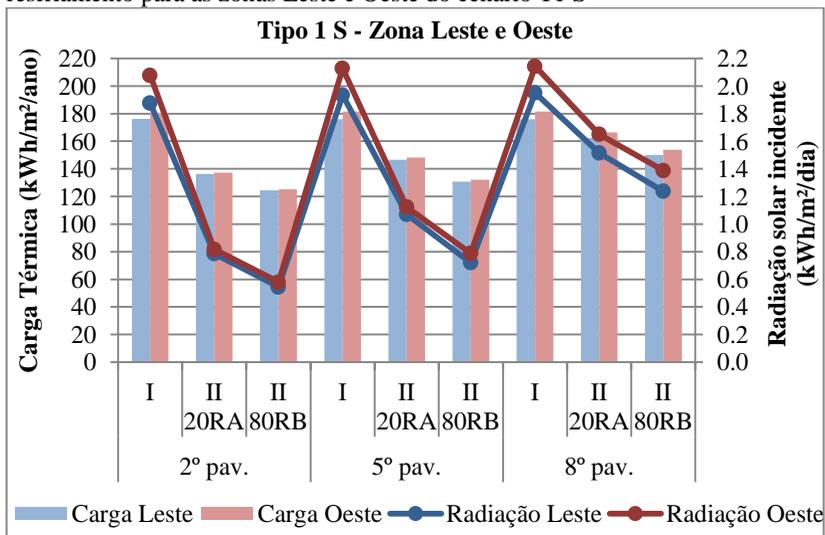


Figura 82: Relação entre radiação solar incidente e carga térmica para resfriamento para as zonas Norte e Sul do cenário T2 N

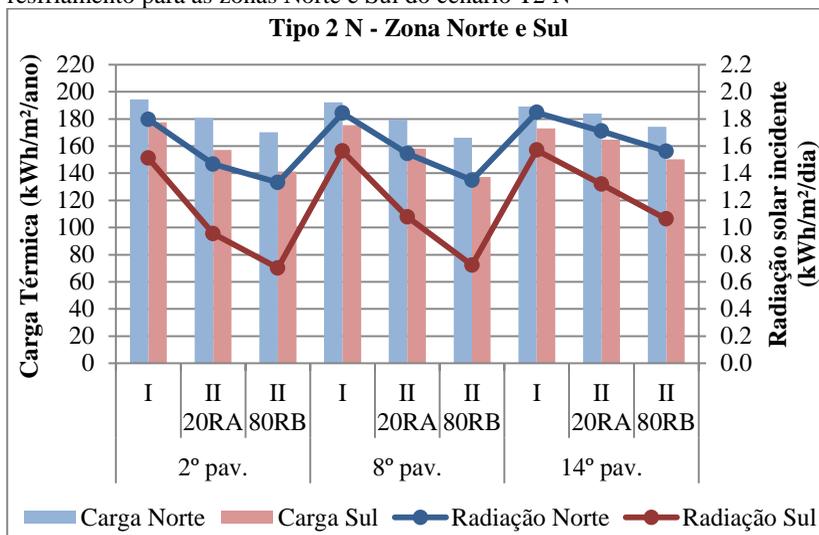


Figura 83: Relação entre radiação solar incidente e carga térmica para resfriamento para as zonas Leste e Oeste do cenário T2 N

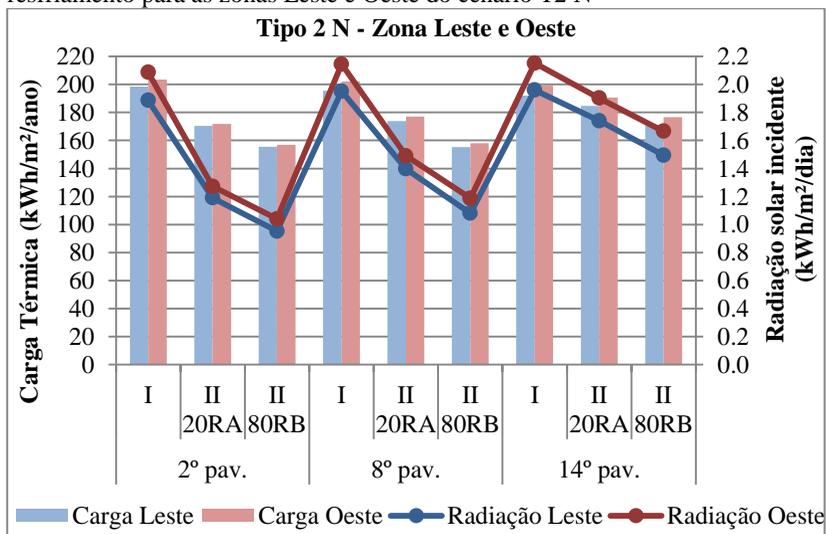


Figura 84: Relação entre radiação solar incidente e carga térmica para resfriamento para as zonas Norte e Sul do cenário T2 S

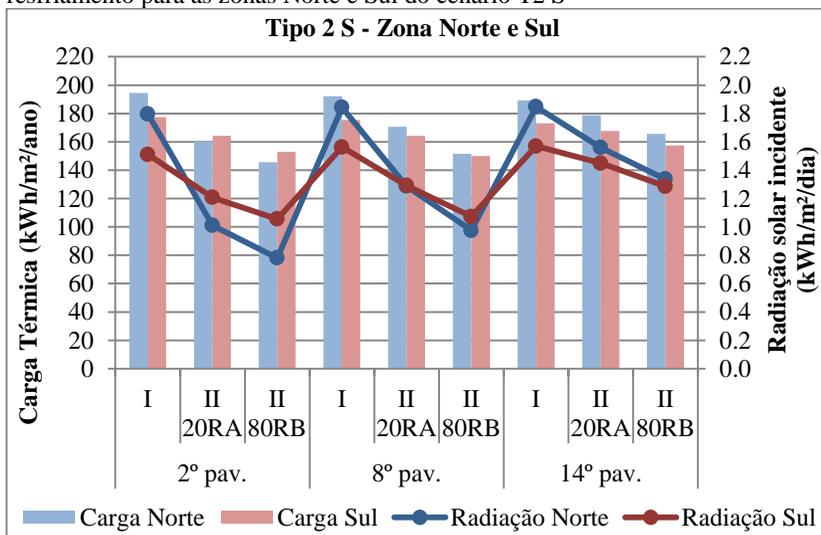


Figura 85: Relação entre radiação solar incidente e carga térmica para resfriamento para as zonas Leste e Oeste do cenário T2 S

